

Hydrologické dny 2021

IX. národní konference českých a slovenských hydrologů a vodohospodářů

Sborník plných článků



Sborník plných článků

HYDROLOGICKÉ DNY 2021

**IX. národní konference českých a slovenských
hydrologů a vodohospodářů**

9. – 10. 9. 2021 Brno

Praha 2021

**Český
hydrometeorologický
ústav**



Hlavní organizátor


Český
hydrometeorologický
ústav

Pod záštitou



Spolupracující organizace

Česká vědeckotechnická
vodohospodářská společnost



Povodí Moravy, s. p.



Český národní výbor pro hydrologii

Český národní
výbor pro hydrologii

Český národní
výbor pro hydrologii

CREA Hydro & Energy, z. s.



© Český hydrometeorologický ústav
ISBN 978-80-7653-032-4

Obsah

Úvodní slovo	5
TÉMA 1	
POZOROVÁNÍ, NOVÉ METODY MĚŘENÍ, BIG DATA, HISTORICKÁ VARIABILITA A PROXYDATA.....	6
Vyhodnocení vodnosti na tocích v Jihomoravském kraji za posledních 40 let.....	7
Pavel COUFAL	
Srovnání dvou ultrazvukových metod pro měření dna vodního toku	20
Zdenka KRMELOVÁ	
Využití ADCP ke sledování prostorové distribuce plavenin v profilu Morava – Lanžhot	32
Libor MIKL, Pavel STIERAND, Robert ŽALIO, Jarmila HALÍŘOVÁ, Vít KODEŠ	
Významnosť a veľkosť trendov minimálnych a priemerných ročných prietokov na Slovensku za obdobie 1961–2015 a ich zmeny v porovnaní s referenčným obdobím 1961–2000.	38
Viliam ŠIMOR, Ľudovít LUPTÁK	
Návrh metodiky posúdenia povodňového rizika	52
Mária ŠUGAREKOVÁ, Martina ZELENÁKOVÁ	
Režim průtoků na vybraných povodích ČR ve vztahu na průběh hladin podzemních vod v mělkých vrtech	57
Radovan TYL, Pavel KUKLA	
TÉMA 2	
HYDROLOGICKÉ EXTRÉMY, MODELOVÁNÍ A PREDIKCE.....	73
Neistoty klimatických impaktových štúdií v hydrologických aplikáciách	74
Hana HLAVÁČIKOVÁ, Eva KOPÁČIKOVÁ, Danica LEŠKOVÁ	
Povodňové situace roku 2020 pohledem Regionálního předpovědního pracoviště ČHMÚ Ostrava.....	85
Alena KAMÍNKOVÁ, Ondřej KOSÍK, Jarmila ŠUSTKOVÁ	
Varovný systém lokálních povodní založený na měření infiltrace srážek.....	102
Zbyněk KULHAVÝ, Jana KALIBOVÁ, Pavel KREJZEK	
Vplyv rozdielnej priestorovej reprezentácie krajinného pokryvu a kvartérnej geológie na výsledky prepojeného modelu MIKE SHE/MIKE11	110
Stanislav RUMAN, Tom BALL, Andrew R.BLACK, Julian R. THOMPSON	
Modelování hydrologické odezvy zelených střech – aktuální výzvy	124
Vojtěch SKALA, Michal DOHNAL	

Post-processing krátkodobých hydrologických předpovědí pomocí aplikace metody DRESSING	138
Tomáš VLASÁK, Jakub KREJČÍ	
Projekt DAREFFORT – Mezinárodní spolupráce a výmena údajov v oblasti predpovedných systémov v povodí Dunaja	146
Valéria WENDLOVÁ, Marcel ZVOLENSKÝ	
TÉMA 3	
EKOHYDROLOGIE, SPOLEČENSKÉ POTŘEBY A VZDĚLÁVÁNÍ V HYDROLOGII A VODNÍM HOSPODÁŘSTVÍ	151
Zavodňování lužního lesa při soutoku Moravy a Dyje	152
Jana BÁRTOVÁ, Karel KNĚŽÍNEK, Hana HORNOVÁ	
Kvalita vody v povodí jihočeské Blanice.....	166
Kateřina FRAINDOVÁ, Milada MATOUŠKOVÁ, Zdeněk KLIMENT, Vojtěch VLACH	
Stabilní izotopy vodíku a kyslíku v hydrologické praxi.....	182
Martin ŠANDA	
Aktualizace rozvodnic základních ploch povodí 4. řádu s využitím DMR5G jako klíčového podkladu při odvozování hydrologických údajů.....	191
Radovan TYL, Jana BÁRTOVÁ	

Úvodní slovo

První konference, které jsem se jako hydrologický elév Českého hydrometeorologického ústavu zúčastnil, byly Hydrologické dny 2000 v Plzni. Dovolte mi proto být v tomto úvodu o něco více osobní, nežli bývá běžné.

Při vzpomínce na plzeňské Hydrologické dny se mi dnes popravdě nevybaví žádná z přednášek, ale vzpomínám si spíše na celkovou atmosféru celé akce, která pro mne byla uvedením do široké rodiny hydrologů. Právě zde jsem se poprvé setkal s mnohými kolegy, s nimiž mám tu čest pracovat dodnes, a musím jim poděkovat za to, jak bezprostředně mě přijali za svého. Zpětně mohu hodnotit, že právě otevřenost a pohodovost všech lidí, které jsem potkal, byla jedním z důvodů, proč jsem se rád stal (a zůstávám) hydrologem.

Tehdejší atmosféra však obsahovala i takový nádech výjimečnosti akce, jakoby říkala: „tohle není nějaká konference, to je TA konference“.

Jistě, rok 2000 byl spíše ještě rokem staré analogové doby, kdy k článkům a výsledkům práce kolegů se člověk dostával především na stránkách papírových časopisů, nebo právě na konferencích. V tomto se svět velmi proměnil a dnes jsou informace „na jeden klik daleko“. I proto jsme konferenci Hydrologických dnů chtěli tentokrát pojmout poněkud odlišně – chtěli jsme dát prostor diskusi nad směřováním české a slovenské hydrologie v kontextu okolních vlivů, jež na ně působí. Nepředpokládali jsme však, že nám pandemie COVID-19 neumožní naplnit ten hlavní cíl Hydrologických dnů, a sice jednou za delší dobu se osobně setkat a na pár dní vytvořit tu zvláštní atmosféru, o které píší výše.

Tentokrát jsou tedy Hydrologické dny „jinou konferencí“, ale přesto mají svůj význam a naplňují to, co se od konference čeká – sdílení poznatků mezi kolegy. A našťastí nejen formou virtuálních prezentací, ale i v podobě tohoto sborníku příspěvků, který se zařadí k předchozím publikacím poskytujícím průřez aktuálními problémy a úkoly řešenými na území České a Slovenské republiky v oblasti hydrologie. Za to, že i ve složitých podmínkách vznikl, patří dík všem autorům a editorům.

Projděte tedy následující stránky, a pokud Vás nějaký z příspěvků zaujme, prosím kontaktujte jeho autora, tak jak byste to udělali na konferenci o nejbližší přestávce či později večer, vždyť právě z dialogu nad hydrologickými problémy a jejich možným řešením vznikají kroky směrem dál.

Jan Daňhelka

Téma 1

Pozorování, nové metody měření, big data, historická variabilita a proxydata



Vyhodnocení vodnosti na tocích v Jihomoravském kraji za posledních 40 let

Pavel COUFAL

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Česká republika, email: pavel.coufal@chmi.cz

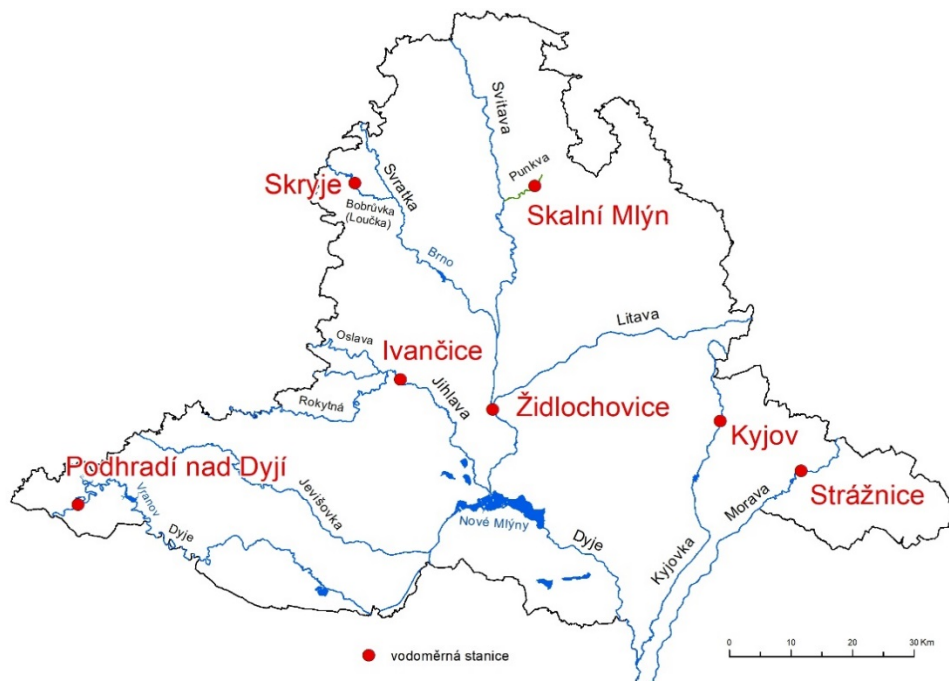
Úvod

Jihomoravský kraj je z hlediska hydrografie specifický v tom, že jeho větší část leží v ploché sníženině, kde ty největší vodní toky na Moravě mají svá zaústění. Řeka Morava, odvodňující Jeseníky a Beskydy, či Svatava, protékající městem Brnem, přivádí vodu z plochy několika tisíc kilometrů čtverečních. Tyto vodní toky protékají většími městy, kde případné zvýšení či delší pokles průtoků na historická minima mohou mít výrazný vliv na socioekonomickou sféru. Cílem tohoto konceptu je vyhodnotit vodnost na vybraných vodoměrných stanicích sítě ČHMÚ za období 40 let. Zjištěné skutečnosti poté použít ke srovnání řad M-denních průtoků v pozorovaných profilech mezi aktuálním referenčním obdobím 1981–2010 a nově navrženým obdobím 1991–2020. Tyto vyhodnocené řady se používají v aplikované hydrologii jako podklad pro poskytování standardních hydrologických údajů povrchových vod dle ČSN 75 1400.

Metodika

Výběr vhodných vodoměrných stanic

Před samotnou analýzou vodnosti na tocích v Jihomoravském kraji bylo nejdříve nutné vybrat vhodné vodoměrné stanice (viz Obr. 1.), aby odpovídaly kritériu v délce časové řady denních průtoků 40 let, tzn. od 1. 11. 1980 do 31. 10. 2020 (použit hydrologický rok).



Délka období 40 let byla vybrána z toho důvodu, že odpovídá počátku časové řady denních průtoků, která sloužila k vyhodnocení referenčního období 1981–2010, které se dosud používá v aplikované

hydrologii při poskytování hydrologických údajů podle ČSN 75 1400. To vše proto, aby došlo k překryvu mezi oběma řešenými referenčními obdobími a následnému vyjádření rozdílů mezi nimi.

Zpracování časových řad a vyhodnocení řady M-denních průtoků

Z důvodu přehlednosti a poskytnutí přehledu o vodnostech v daných letech byly údaje o vodnosti graficky vyjádřeny v průměrných ročních průtocích s vyznačením referenčních období. Srovnání řad M-denních průtoků bude vyjádřeno v tabelární podobě. Pro následné hodnocení rozdílů dlouhodobého průměrného průtoku a řad M-denních průtoků ve vodoměrných stanicích mezi aktuálně používaným (1981–2010) a nově navrženým referenčním obdobím (1991–2020) bylo použito průměrných denních průtoků, které byly převedeny do křivky překročení průtoků s využitím pravděpodobnosti stanovené dle vzorce Čegodajevova [1].

$$p = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} \quad (1)$$

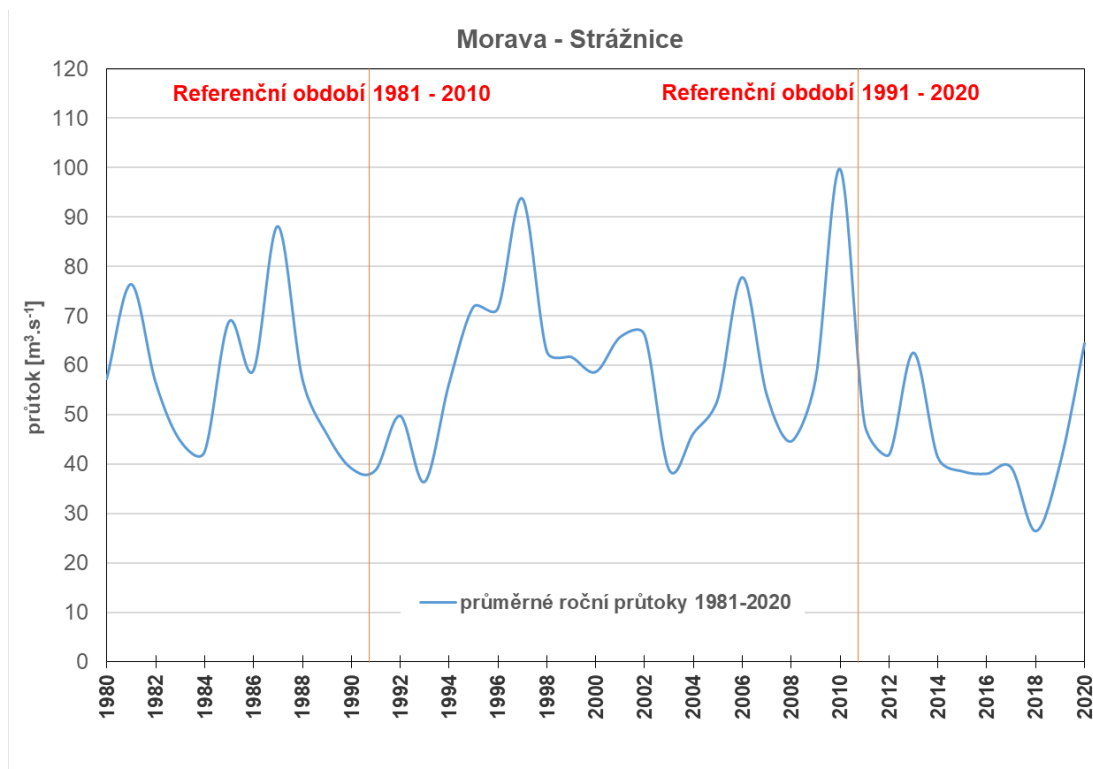
Kde m je pořadí dané hodnoty v časové řadě, která je uspořádaná sestupně (tzn. že na prvním místě je nejvyšší hodnota denního průtoků za 30 let) a n je počet hodnot v časové řadě (za 30 let jde o bezmála 10 960 hodnot denních průtoků). Vzorce Čegodajevova k výpočtu pravděpodobnosti překročení je použito z toho důvodu, že pracujeme s časovými řadami průtoků, které jsou prakticky vždy výběrovým výsekem ze základního statistického souboru, u kterého neznáme všechny hodnoty, jež by se mohly pravděpodobně v dané časové řadě vyskytnout. Poslední člen řady tedy nemá pravděpodobnost výskytu 1 neboli 100 %, ale má pravděpodobnost nižší (Němec, 1964).

Z vyjádřené křivky překročení je pak možné odvodit k dané pravděpodobnosti hodnotu průtoků. Takže například pro vyjádření 355-denního průtoků odvodíme z křivky překročení hodnotu s pravděpodobností výskytu 97 %. Hodnotu dlouhodobého průměrného průtoků pak spočítáme jako aritmetický průměr všech denních průtoků za 30 let. Vyhodnocení N-letých průtoků není cílem tohoto konceptu.

Výsledky

Povodí Moravy

V případě povodí Moravy v Jihomoravském kraji byly použity vyhodnocené průtoky z vodoměrné stanice Strážnice za období posledních 40-ti let. Stanice Strážnice má plochu povodí 9 145 km² a leží v plochem Dolnomoravském úvalu, kde dochází za větších průtoků k rozsáhlým rozlivům do lužních lesů.



Obr. 2 Průměrné roční průtoky ve vodoměrné stanici Strážnice za období od listopadu 1980 do října 2020 s vyznačením referenčních období.

V grafickém vyjádření průměrných ročních průtoků je patrné období minimálních průtoků 1989 až 1993, které ostře kontrastuje s následujícím velmi vodným obdobím 1995 až 2002, kdy se průtoky držely nad $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (viz Obr. 2). Především je třeba zmínit rozsáhlé regionální povodně v červenci 1997, kdy se v povodí Moravy vyskytly průtoky i větší než stoleté.

Pokud se soustředíme na podnormální období vodnosti (kdy průtoky klesly v průměru pod $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), tak se jich od roku 1980 do 1990 vyskytovalo hned několik, avšak byla kompenzována nadnormálně vodnými roky nad $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. V období posledních 10 let (2010 až 2020) však k těmto kompenzacím nedocházelo, naopak se v letech 2017–2019 roční průtoky propadly pod $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ukázkovým příkladem je průměrný denní průtok v Moravě ve Strážnici ze dne 20. srpna 2018, který byl pouze $3,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (viz Obr. 3.), což je pod úroveň i té nejnižší hodnoty 364-denního průtoků u obou řešených referenčních období řad M-denních průtoků. Tyto skutečnosti se poté projeví v poklesu dlouhodobého průměrného průtoků Q_a ve Strážnici o 8 %, v minimech až o 15 %, což je patrné z tabulky č. 1.

Tab. 1 Srovnání řad M-denních průtoků pro stávající a navrhované referenční období ve vodoměrné stanici Strážnice.

	M-denní průtoky ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		rozdíl v %
	1981 –2010	1991 –2020	
Q_a	59,3	54,7	–8
Q_{30d}	135	124	–8
Q_{60d}	93,1	85,9	–8
Q_{90d}	72,6	66,2	–9
Q_{120d}	57,7	53,7	–7
Q_{150d}	47,5	44,4	–7
Q_{180d}	39,6	36,7	–7
Q_{210d}	33,5	31,0	–8

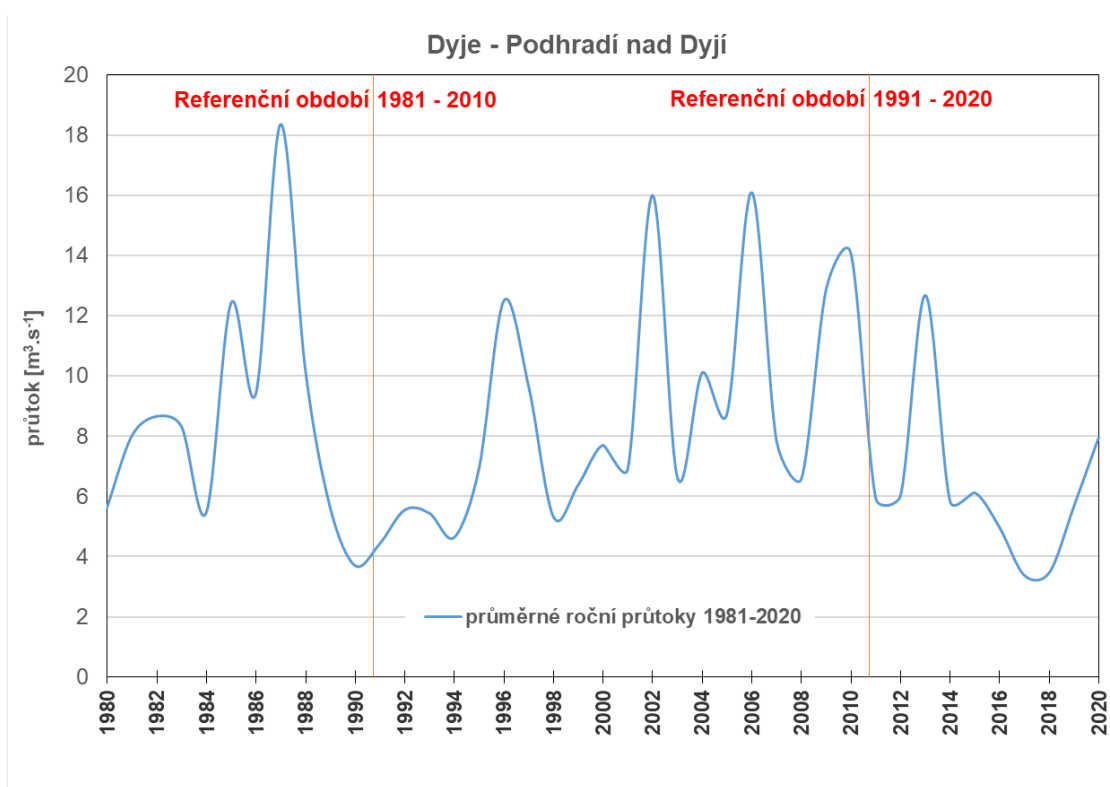
Q _{240d}	28,1	25,4	-9
Q _{270d}	23,3	20,8	-11
Q _{300d}	18,5	16,6	-10
Q _{330d}	14,1	12,6	-11
Q _{355d}	9,10	8,00	-12
Q _{364d}	5,30	4,49	-15



Obr. 3 Hladina Moravy ve vodoměrné stanici Strážnice dne 20. srpna 2018 v době kdy zde protékalo pouze něco málo přes $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Povodí Dyje

Na příkladu vodoměrné stanice Podhradí nad Dyjí za období posledních 40-ti let jsou zřejmá období s maximálními i minimálními ročními průtoky (viz Obr. 4). Nejvíce jsou patrné výrazné poklesy ročních průtoků na přelomu 80. až 90. let a také mezi léty 2016 až 2019. Zde se průtoky propadly do minim, kdy průměrný roční průtok poklesl výrazně pod $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (v průměrných denních průtocích především v srpnu 2018 průtoky klesaly až k historickým minimům). Maximální průtoky se vyskytly v dobách významných povodňových událostí v letech 1985–1988, 1996, 2002–2006, 2009–2010 a také v roce 2013.



Obr. 4 Průměrné roční průtoky ve vodoměrné stanici Podhradí nad Dyjí za období od listopadu 1980 do října 2020 s vyznačením referenčních období.

Tab. 2 Srovnání řad M-denních průtoků pro stávající a navrhované referenční období ve vodoměrné stanici Podhradí nad Dyjí.

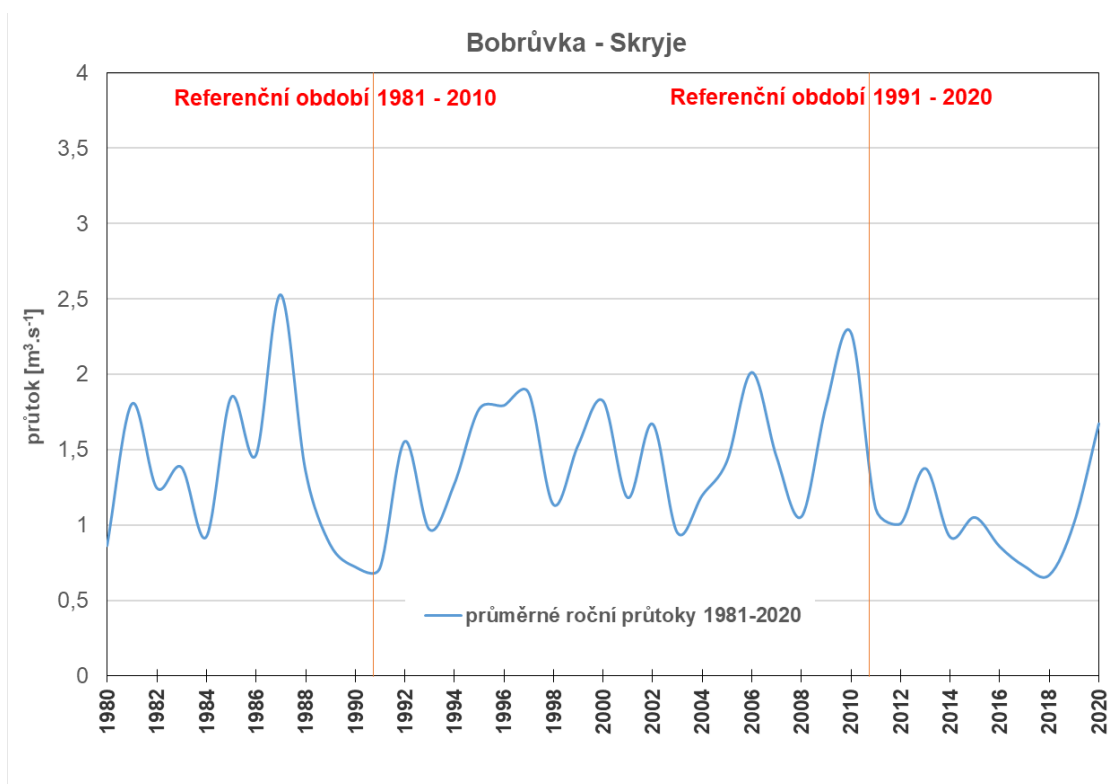
	M-denní průtoky ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		rozdíl v %
	1981–2010	1991–2020	
Q_a	8,81	7,86	–11
Q_{30d}	20,2	18,5	–8
Q_{60d}	12,7	11,5	–9
Q_{90d}	9,25	8,40	–9
Q_{120d}	7,39	6,68	–10
Q_{150d}	6,05	5,42	–10
Q_{180d}	5,07	4,50	–11
Q_{210d}	4,30	3,78	–12
Q_{240d}	3,68	3,21	–13
Q_{270d}	3,11	2,73	–12
Q_{300d}	2,57	2,27	–11
Q_{330d}	1,97	1,72	–13
Q_{355d}	1,30	1,05	–19
Q_{364d}	0,800	0,437	–45

Oproti referenčnímu období 1981–2010 nově navrhované období 1991–2020 zahrnuje navíc delší období s méně vodnými roky (2014–2019) než v předchozím případě (zde jen v letech 1983/84 a 1989/90). V tomto případě neuvažujeme s překryvným obdobím 1991–2010. Z výsledků srovnání řad M-denních průtoků za obě období (viz Tab. 2) je zřejmé, že dlouhodobý průměrný průtok Q_a za období 1991–2020 bude o 11 % nižší než za období předchozí. Minimální hodnoty v řadě M-denních průtoků

budou nižší až o 45 % (364-denní průtok) právě kvůli již zmiňovaným poklesům průtoků v letech 2016 až 2018 (denní průtoky mnohdy klesly pod $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Povodí Svratky

Svratka je v rámci řešeného kraje jedním z nejdůležitějších vodních toků. Protéká zastavěným územím města Brna a je nejvodnějším přítokem do soustavy vodních nádrží Nové Mlýny. Pro analýzu vodnosti bylo použito kromě vodoměrné stanice přímo na Svratce (Židlochovice) také vodoměrné stanice na významném přítoku Svratky – Bobrůvka (Skryje). Tato víceméně neovlivněná stanice byla zvolena jednak proto, že odvodňuje významnou část odtoku z vedlejšího Kraje Vysočina, ale také proto že zde průtoky v období 2016–2018 velmi výrazně klesaly na hodnoty historických minim. Podle údajů z hydrometrických měření pracovníků ČHMÚ zde bylo naměřeno dne 21. srpna 2018 pouze $20 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, což je dle dostupných záznamů nejnižší změřený okamžitý průtok v historii této vodoměrné stanice.



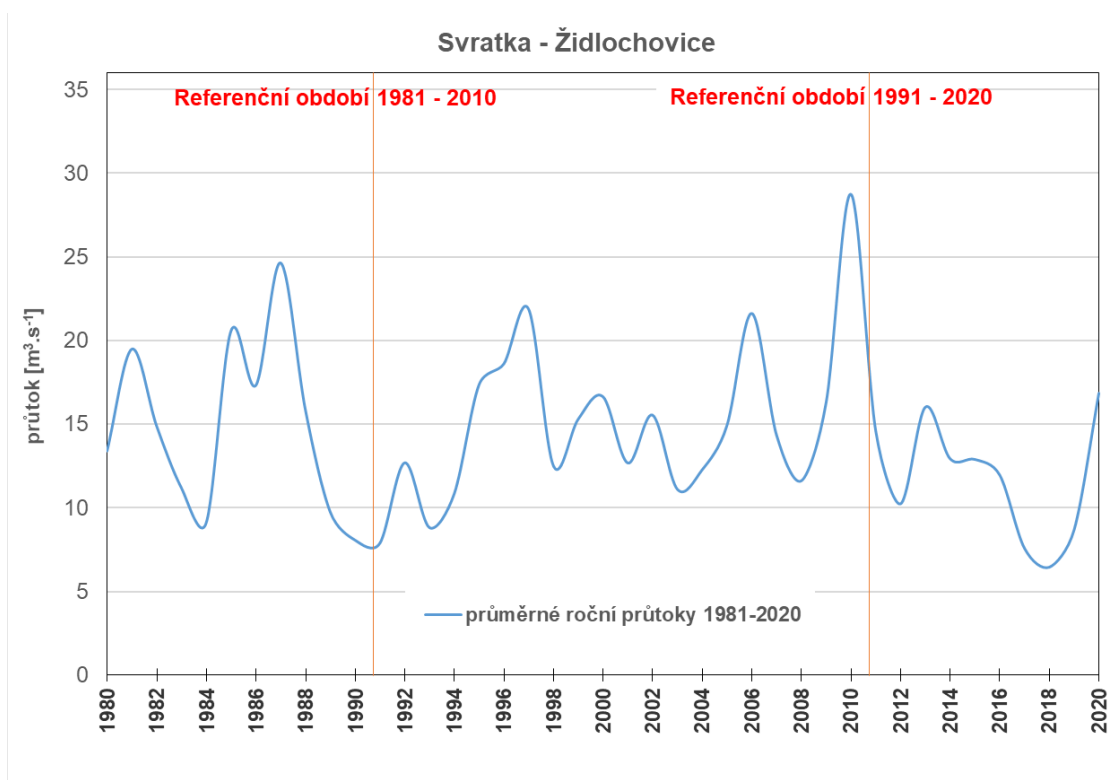
Obr. 5 Průměrné roční průtoky ve vodoměrné stanici Skryje za období od listopadu 1980 do října 2020 s vyznačením referenčních období.

Když tedy porovnáme referenční období mezi sebou, tak je zřejmé že roky 1980 až 1987 v prvním období byly vodnější, až poté na přelomu 80. a 90. let došlo k výraznému poklesu ročních průtoků pod $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (viz Obr. 5). Naproti tomu roky 2010 až 2019 v nově navrhovaném referenčním období byly z hlediska vodnosti podnormální. Dlouhodobý průměrný průtok za období 1991–2020 bude tedy o 9 % nižší než za předchozí období a v minimech denních průtoků dojde k poklesu až o 39 % vlivem historických minim (viz Tab. 3).

Tab. 3 Srovnání řad M-denních průtoků pro stávající a navrhované referenční období ve vodoměrné stanici Skryje.

	M-denní průtoky ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		rozdíl v %
	1981–2010	1991–2020	
Q_a	1,45	1,32	–9
Q_{30d}	3,50	3,20	–8
Q_{60d}	2,20	2,02	–8
Q_{90d}	1,60	1,49	–7
Q_{120d}	1,24	1,17	–6
Q_{150d}	0,985	0,943	–4
Q_{180d}	0,809	0,782	–3
Q_{210d}	0,686	0,660	–4
Q_{240d}	0,575	0,540	–6
Q_{270d}	0,480	0,432	–10
Q_{300d}	0,391	0,347	–11
Q_{330d}	0,300	0,262	–13
Q_{355d}	0,203	0,156	–23
Q_{364d}	0,118	0,072	–39

Pro vyhodnocení změn ve vodnostech za 40 let přímo na Svatce byla využita vodoměrná stanice Židlochovice, která zahrnuje i povodí Svitavy, Bobravy a Litavy. Z průběhu průměrných ročních průtoků je zcela zřejmé, že nové referenční období 1991–2020 bude zahrnovat výrazně minimální vodnosti než ve stávajícím období 1981–2010 (viz Obr. 6.). Je to způsobeno především výraznými poklesy vodností v období let 2016–2018.



Obr. 6 Průměrné roční průtoky ve vodoměrné stanici Židlochovice za období od listopadu 1980 do října 2020 s vyznačením referenčních období.

Zatímco v letech 1980–1990 dosáhly roční průtoky i přes $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tak v letech 2011–2020 k tomuto vůbec nedošlo a roční průměry dosahovaly maximálně úroveň dlouhodobého průměru. Z výsledků srovnání řad M-denních průtoků (Tab. 4) za obě období je zřejmé, že dlouhodobý průměrný průtok Q_a za období 1991–2020 bude o 7 % nižší než za období předchozí.

Tab. 4 Srovnání řad M-denních průtoků pro stávající a navrhované referenční období ve vodoměrné stanici Židlochovice.

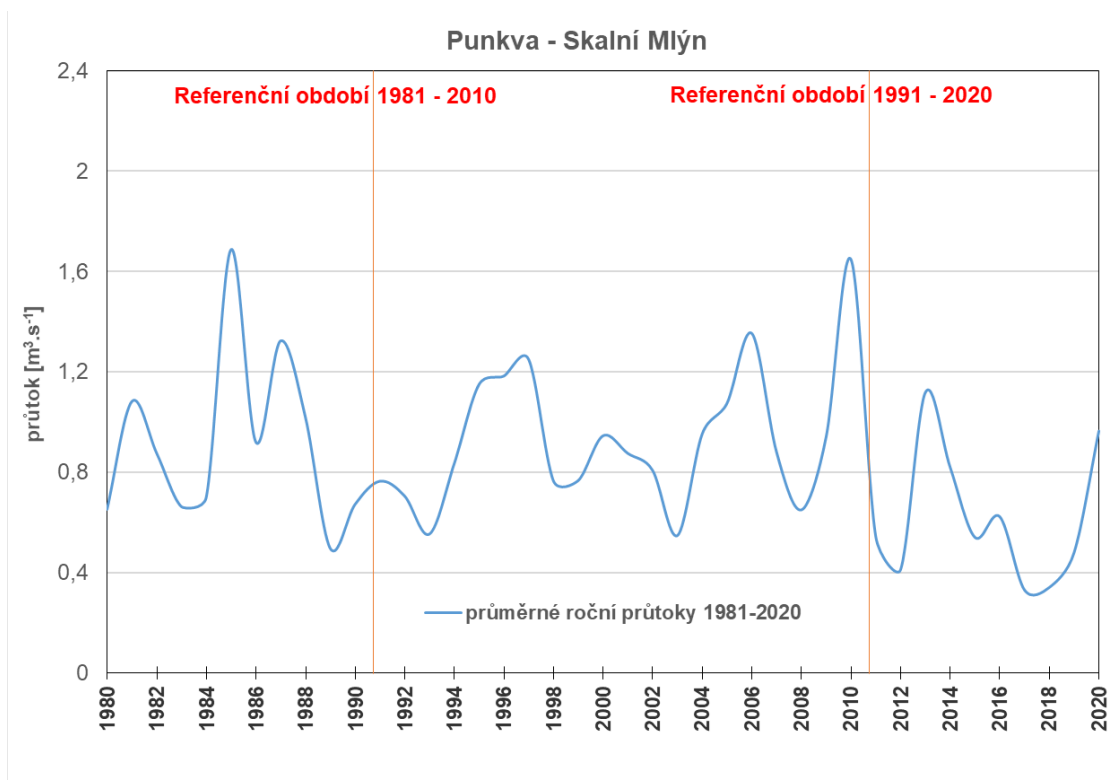
	M-denní průtoky ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		rozdíl v %
	1981–2010	1991–2020	
Q_a	15,1	14,0	-7
Q_{30d}	30,7	27,9	-9
Q_{60d}	21,5	19,5	-9
Q_{90d}	17,0	15,6	-8
Q_{120d}	13,9	13,0	-6
Q_{150d}	11,9	11,4	-4
Q_{180d}	10,5	10,1	-4
Q_{210d}	9,37	9,15	-2
Q_{240d}	8,38	8,23	-2
Q_{270d}	7,50	7,42	-1
Q_{300d}	6,72	6,62	-1
Q_{330d}	5,85	5,70	-3
Q_{355d}	4,45	4,32	-3
Q_{364d}	3,68	3,06	-17

Minimální hodnoty v řadě M-denních průtoků budou nižší až o 17 % (364-denní průtok) právě kvůli již zmiňovaným poklesům průtoků v letech 2016 až 2018. Je tedy zřejmé, že výskyt historicky významných minimálních průtoků měl vliv i na zásobu velkých vodních nádrží v povodí Svratky, které udržovaly odtoky na nezbytných minimech tak, aby měly samy dostatek vody k vlastnímu hospodaření.

Moravský kras

Hydrologický režim v Moravském krasu je velmi specifický a právě proto byl zařazen k vlastnímu hodnocení rozdílů ve vodnostech mezi oběma referenčními obdobími. K účelu vyhodnocení vodnosti za 40 let byla vybrána vodoměrná stanice Skalní Mlýn na vodním toku Punkva, která je umístěna pod rozsáhlým jeskynním systémem. Údaje z této stanice nám můžou poskytnout částečný přehled o tom, jak jeskynní systémy Moravského krasu ovlivňují odtok srážkových vod v povrchových vodách. Dle grafického vyjádření ročních průtoků za 40 let (viz Obr. 7) je zřejmé, že podobně jako v případě povodí Svratky jsou zde patrné roky 1980 až 1987, které byly vodnější, až poté na přelomu 80. a 90. let došlo k výraznému poklesu ročních průtoků až na $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Roky 2010 až 2019 v nově navrhovaném referenčním období byly z hlediska vodnosti podnormální, dlouhodobý normál byl překročen jen v roce 2013. V letech 2017 a 2018 roční průtok klesl až k $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což byl nejnižší pokles za celých 40 let. V denních průtocích ve stanici se minimální průtoky objevily 28. až 31. srpna 2018, kdy došlo k poklesu na pouhých $75 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ (pod úroveň 364-denního průtoky), což bylo potvrzeno i hydrometrickým měřením. Při tomto hydrometrickém měření dne 29. srpna 2018 bylo změřených $75 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ zároveň nejnižší hodnotou od roku 1928. Zajímavé je rovněž opoždění výskytu minimálních průtoků v této stanici na období 28. až 31. srpna 2018 oproti všem zmíněným stanicím, kde se minimální průtoky vyskytly nejčastěji od 12. do 24. srpna 2018, což by mohlo být způsobeno vlivem jeskynního systému Moravského krasu.

Výše zmíněné skutečnosti se následně projeví i v poklesu dlouhodobého průměrného průtoku mezi obdobími o 11 %. V minimech v referenčním období 1991–2010 se jedná o pokles až o 21 % (viz Tab. 5).



Obr. 7 Průměrné roční průtoky ve vodoměrné stanici Skalní Mlýn za období od listopadu 1980 do října 2020 s vyznačením referenčních období.

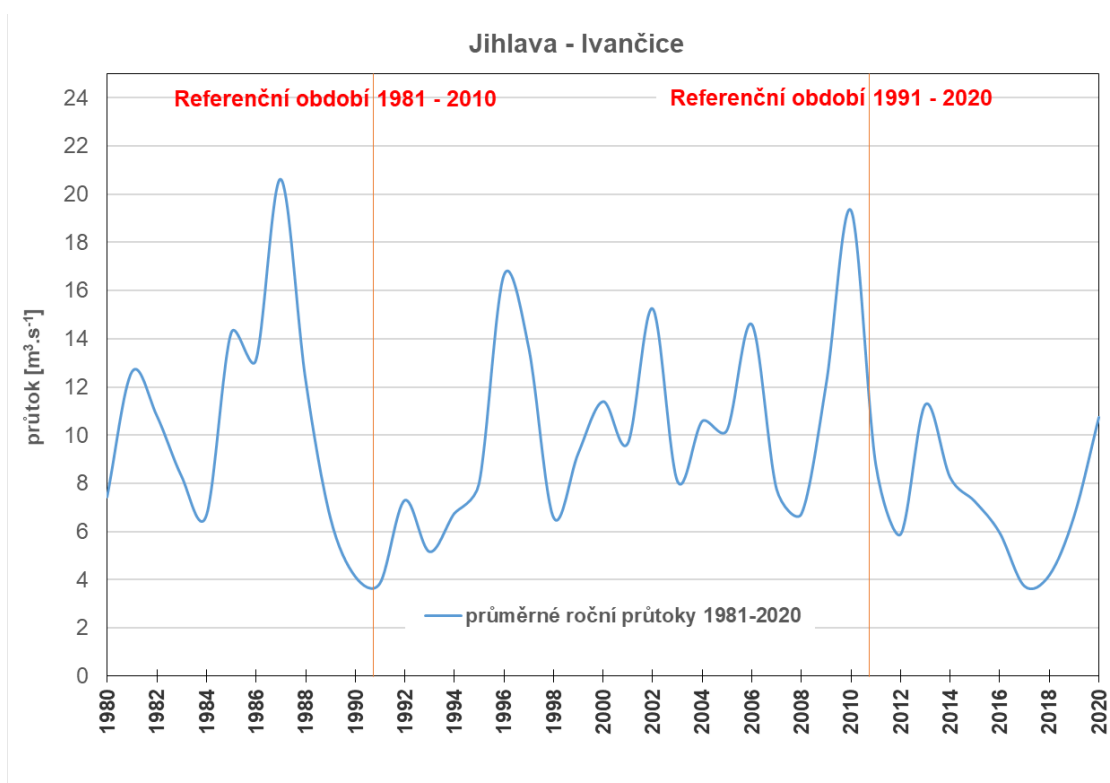
Tab. 5 Srovnání řad M-denních průtoků pro stávající a navrhované referenční období ve vodoměrné stanici Skalní Mlýn.

	M-denní průtoky ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		rozdíl v %
	1981–2010	1991–2020	
Q_a	0,933	0,827	-11
Q_{30d}	2,28	2,00	-12
Q_{60d}	1,40	1,25	-11
Q_{90d}	0,990	0,884	-11
Q_{120d}	0,733	0,649	-12
Q_{150d}	0,557	0,503	-10
Q_{180d}	0,456	0,398	-13
Q_{210d}	0,366	0,321	-12
Q_{240d}	0,306	0,259	-15
Q_{270d}	0,252	0,210	-17
Q_{300d}	0,200	0,175	-13
Q_{330d}	0,165	0,146	-11
Q_{355d}	0,129	0,114	-12
Q_{364d}	0,105	0,083	-21

Povodí Jihlavy

Pro hodnocení vodností v povodí Jihlavy byla zvolena závěrová vodoměrná stanice Ivančice. Stanice Ivančice je umístěna pod velmi významným soutokovým uzlem vodních toků Jihlava, Oslava a Rokytná. V této stanici, která má již plochu povodí 2680 km², protéká voda odtékající prakticky z poloviny území Kraje Vysočina.

Významným ovlivněním na řece Jihlavě je soustava nádrží Dalešice – Mohelno v těsné blízkosti jaderné elektrárny Dukovany. Odtok z těchto nádrží stabilizuje kolísání a propad vodnosti do minimálních průtoků, což je jednoznačně patrné z tabulky (Tab. 6), kde došlo k výraznému poklesu dlouhodobého průměrného průtoku Q_a mezi obdobími o 12 %, avšak rozdíl 364-denním průtoce zůstal beze změn. Pokles dlouhodobého průměrného průtoku a dalších údajů mezi obdobími v tabulce č. 6 je způsobeno podobně jako v předchozím případě výrazně vodnějším obdobím 1980–1989 (povodně v květnu 1985), které se v rámci referenčního období 1991–2020 nevyskytuje. Místo něj je v nově navrhovaném období výrazně podnormální, jen v roce 2013 a 2020 jsou roční průtoky alespoň na úrovni normálu. Ostatní roky jsou podnormální, největší poklesy jsou zaznamenány v roce 2017 a 2018 (viz Obr. 8.).



Obr. 8 Průměrné roční průtoky ve vodoměrné stanici Ivančice za období od listopadu 1980 do října 2020 s vyznačením referenčních období.

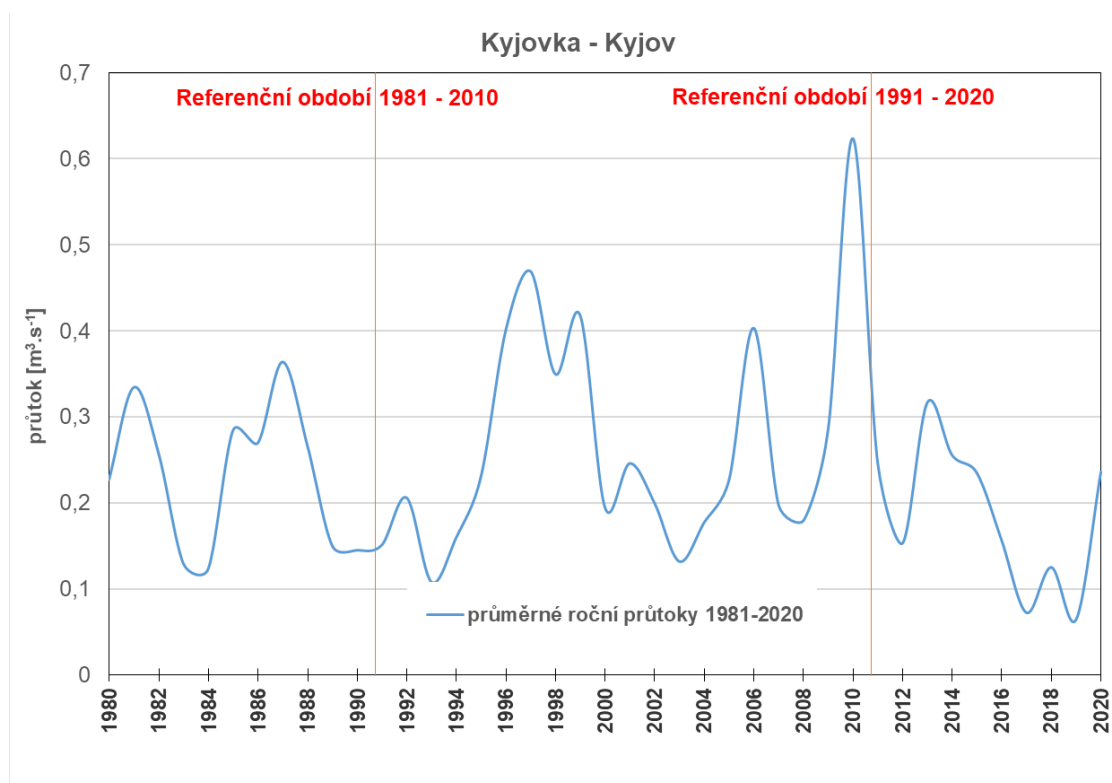
Tab. 6 Srovnání řad M -denních průtoků pro stávající a navrhované referenční období ve vodoměrné stanici Ivančice.

	M-denní průtoky (m ³ .s ⁻¹)		rozdíl v %
	1981–2010	1991–2020	
Q_a	10,4	9,15	–12
Q_{30d}	24,6	19,9	–19
Q_{60d}	14,6	13,1	–10
Q_{90d}	11,1	10,2	–8
Q_{120d}	9,25	8,45	–9

Q _{150d}	7,98	7,18	-10
Q _{180d}	7,00	6,10	-13
Q _{210d}	6,13	5,17	-16
Q _{240d}	5,34	4,49	-16
Q _{270d}	4,52	3,84	-15
Q _{300d}	3,78	3,28	-13
Q _{330d}	3,09	2,90	-6
Q _{355d}	2,50	2,39	-4
Q _{364d}	1,60	1,60	0

Povodí Kyjovky

Kyjovka (ve starších mapách je označována jako Stupava) je příkladem vodního toku, kde výskyt hydrologického sucha v období 2016–2018 způsobil výrazné rozdíly v minimech mezi referenčními obdobími. Pro hodnocení vodností byla zvolena vodoměrná stanice Kyjov. V horní části povodí Kyjovky je sice umístěna vodárenská nádrž Koryčany, avšak s rostoucí plochou povodí její vliv na stabilitu vodností v Kyjovce slábne. Navíc v posledních 5 letech hráz nádrže procházela rekonstrukcí, fungovala tedy po větší část roku v režimu přítok-odtok, což znamená, že nádrž Koryčany nemohla dostatečně nadlepšovat průtok v Kyjovce. Jak je patrné z grafického a tabelárního vyjádření vodností ve stanici Kyjov rozdíl v dlouhodobém průtoce mezi obdobími o 6 %, ale v minimálních průtocích (364-denní průtok) je až přes 60 % (viz Obr. 9 a Tab. 7.).



Obr. 9 Průměrné roční průtoky ve vodoměrné stanici Kyjov za období od listopadu 1980 do října 2020 s vyznačením referenčních období.

Tab. 7 Srovnání řad M-denních průtoků pro stávající a navrhované referenční období ve vodoměrné stanici Kyjov.

	M-denní průtoky ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		rozdíl v %
	1981–2010	1991–2020	
Q _a	0,255	0,240	–6
Q _{30d}	0,493	0,479	–3
Q _{60d}	0,329	0,321	–2
Q _{90d}	0,262	0,254	–3
Q _{120d}	0,220	0,209	–5
Q _{150d}	0,190	0,176	–7
Q _{180d}	0,170	0,156	–8
Q _{210d}	0,151	0,139	–8
Q _{240d}	0,137	0,121	–12
Q _{270d}	0,120	0,103	–14
Q _{300d}	0,105	0,086	–18
Q _{330d}	0,088	0,068	–23
Q _{355d}	0,065	0,039	–40
Q _{364d}	0,040	0,015	–62

Závěr

Na základě výše zmíněných výsledků je zřejmé, že suché období 2015 až 2020 hrálo významnější roli ve vodnostech v Jihomoravském kraji než suché období v 90. letech. Průměrné vodnosti za období 1981–1991, které jsou zahrnuty ve stále platném referenčním období 1981–2010, byly příznivější než průměrné vodnosti v období 2011–2020, které jsou zahrnuty v nově navrhovaném referenčním období 1991–2020. Tento rozdíl má vliv na pokles dlouhodobého průměrného průtoku a ostatních údajů v rámci M-denních průtoků. Vliv suchého období je patrný ve všech vybraných stanicích, např. ve stanici Strážnice na Moravě je patrný pokles dlouhodobého průměrného průtoku mezi obdobími o 8 %. Největší pokles je patrný v kvantilech kolem 300-denního až 364-denního průtoku, které reprezentují minimální průtoky v daném vodním toku (až o 15%).

Největší pokles dlouhodobého průměrného průtoku v nově navrženém referenčním období z hodnocených vodoměrných stanic bude patrný ve stanici Ivančice na Jihlavě o 12 %, jelikož z referenčního období 1991–2020 vypadnou vodnější 80. léta (např. povodně v květnu 1985). Naopak nejmenší pokles z hodnocených stanic bude patrný ve stanici Kyjov na Kyjovce (o 6 %). V minimálních průtocích je však situace přesně opačná. Hodnota 364-denního průtoku v novém období bude v Ivančicích beze změny (to je s velkou pravděpodobností způsobeno stabilizací kolísání a zamezení propadu vodnosti do minimálních průtoků vlivem manipulací na odtoku ze soustavy nádrží Dalešice – Mohelno). Kdežto v Kyjově bude patrný pokles až o 62 %, což je největší rozdíl mezi obdobími ze všech hodnocených stanic. V průměru ze všech hodnocených stanic jde o pokles dlouhodobého průměrného průtoku o 9 %, v minimech jde o pokles 28 % v období 1991–2020.

Dále z údajů vodoměrných stanic např. z povodí Svratky je zřejmé, že výskyt historicky významných minimálních průtoků měl vliv i na zásobu velkých vodních nádrží, které udržovaly odtoky na nezbytných minimech tak, aby měly samy dostatek vody k vlastnímu hospodaření.

Pro zajímavost byla vyhodnocena i vodoměrná stanice Skalní Mlýn na Punkvě v Moravském krasu. Zde je patrný pokles mezi obdobími v dlouhodobém průměrném průtoce (o 11%). V profilu stanice bylo navíc provedeno hydrometrické měření (srpen 2018), kde byl dle dostupných údajů změřen historicky nejnižší průtok od roku 1928. Zajímavé je rovněž opoždění výskytu minimálních průtoků v této stanici na období 28. až 31. srpna 2018 oproti výše zmíněným stanicím, kde se minimální průtoky vyskytly

nejčastěji od 12. do 24. srpna 2018, což by mohlo být způsobeno vlivem jeskynního systému Moravského krasu.

Výše zmíněné výsledky a závěry poslouží pro praktické použití v aplikované hydrologii, např. jako podklad pro stanovení minimálních zůstatkových průtoků ve vodohospodářské správě a jiné další účely v rámci poskytování standardních hydrologických údajů povrchových vod dle ČSN 75 1400.

Zdroje

Němec, Jaromír (1964). Inženýrská hydrologie, SNTL, 236 s.

Srovnání dvou ultrazvukových metod pro měření dna vodního toku

Zdenka KRMELOVÁ

Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita, 30. dubna 22, 701 03 Ostrava, email: P20158@student.osu.cz, zdenkakrmelova@seznam.cz

Úvod

V rámci přírodní krajiny hraje topografie velkou roli v distribuci a toku vody a energie. Jelikož výpočty nelze provést přímo v terénu, je krajina převedena do digitální formy modelu krajiny, který je používán jako alternativa ke klasickým průzkumům a ručnímu vyhodnocení topografických map (Maidment, Djokic 2000). Pod pojmem digitální model si představujeme abstrakci reality – zjednodušenou reprezentaci reality. Snaží se reprezentovat krajinu v co nejjednodušší digitální formě, avšak adekvátně k účelu modelování. Nejlepší model je vždy ten, který co nejlépe zobrazuje realitu s co nejmenší složitostí modelu. Účely modelů jsou různé – pro výzkum, pochopení, simulaci a predikci či jako virtuální laboratoř (Wainwright, Mulligan 2005).

Možnosti použití existujících digitálních modelů reliéfu v programech pro hydrologické modelování jsou značně omezeny – zejména dostupnost, kvalita a rozlišení dat jsou často nedostačující z pohledu aplikace pro analýzu (Maidment, Djokic 2000). Tvorba hydrodynamických modelů vyžaduje data v co nejvyšší kvalitě a přesnosti. Kvalita dat digitálních modelů terénu je však velmi často přehlížena, což může způsobovat komplikace při hydrologických analýzách (Kelly, Drake, Barr c2004). K přírodním analýzám se momentálně nejčastěji používá digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G). Představuje zobrazení zemského povrchu v digitální podobě ve formě nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN) bodů o souřadnicích X, Y, H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (BpV) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Model vznikl z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování výškopisu území České republiky v letech 2009 až 2013 (www.geoportal.cuzk.cz). DMR 5G je sice, mimo jiné, určen pro projektování a plánování vodo hospodářských staveb, avšak jako podklad pro hydrodynamické modelování je téměř nepoužitelný z důvodu velkých odchylek v prostoru vodních ploch. Vlastní koryto (zejména oblast pod vodou) a objekty na toku musí být dodatečně zaměřeny geodeticky či jinou měřickou metodou (v našem případě ultrazvukovou batymetrií) a z nich vytvořen model, který lze pro hydrodynamické analýzy použít (Uhlířová, Nováková 2011).

Cílem bylo porovnávání dvou ultrazvukových metod měření dna vodního toku se dvěma různými skenery, každý s jiným principem sběru dat, následná tvorba modelu koryta pod vodní hladinou a zjištění, který skener/ která metoda je pro tvorbu modelu lepší a přesnější.

Metodika

Pro porovnávání modelů byly zvoleny tři způsoby zaměření vodního dna. Zaměření sonarem RiverSurveyor S5 pomocí ultrazvukové batymetrie (Single beam echo sounder – SBES), zaměření sonarem GeoSwath 4R společnosti Kongsberg (Multibeam echo sounder – MBES) a pro kontrolu přesnosti byly geodeticky zaměřeny dva vybrané profily pomocí tachymetrické metody. Touto metodou byly v průběhu terénních prací zaměřeny i všechny břehové linie.

Tab. 1 Technické specifikace sonarů (převzato z: Sontek A Xylem Brand: RiverSurveyor® S5 and M9 a Kongsberg Geoacoustics LTD: GeoSwath 4R.)

Specifikace	River Surveyor S5	GoeSwath 4R
Rozsah profilování – vzdálenost	0,06 až 5 m	–
Šířka záběru		190 m

Záznam	až 128 buněk	30 záznamů za sekundu
Velikost buněk	0,02 až 0,05 m	–
Transduktory	4 x 3 MHz a 1 x 1 MHz (ultrazvuk)	0,5 MHz
Hloubka – rozsah	0.20 až 15 m	až 50 m
Hloubka – přesnost	1 %	–
Hloubka – rozlišení	1 mm	1,5 mm
Vnitřní paměť	8 GB	4 GB + pevný disk 480 GB

Měření probíhala na 600 m dlouhém úseku řeky Odry v lokalitě Polanka and Odrou v průběhu čtyř týdnů od 4. 10. 2019 do 1. 11. 2019 každý pátek, zhruba od 9h ráno do 15h odpoledne. Měřená část toku je přírodní, meandrovité koryto s mrtvým ramenem řeky, v blízkosti několika rybníků (viz Obr. 1). Měření končí v urbanizované části toku, tedy před uměle vytvořenou kaskádou. Tok je značně znečištěn malými částicemi z okolních polí a viditelnost ve vodě je téměř nulová. Na březích byla jasně viditelná abraze a boční eroze v takové míře, že docházelo k jejich řícení.



Obr. 1 Ortofoto měřené lokality (Převzato z: www.cuzk.cz)

Geodetická měření probíhala z několika volných stanovišek, která byla zvolena tak, aby vždy šlo vidět jak na orientaci, tak na měřenou část toku. Celkem bylo zvoleno sedm stanovišek. Měřeny byly dva příčné profily toku, břehové linie Odry, včetně překážky v toku v podobě železné opory poblíž břehu, část mrtvého ramene řeky a začátky a konce profilů měřených sonarem RiverSurveyor S5 pro pozdější přiřazení měření do souřadnicového systému S-JTSK a výškového systému Balt po vyrovnání.

Měření příčných profilů probíhalo pomocí soustavy ADCP (Obr. 2) pro ultrazvukovou batymetrii (RiverSurveyor S5). Všechny profily byly měřeny minimálně dvakrát (tam a zpět). Celkem bylo zaznamenáno 57 měření.



Obr. 2 Měření příčného profilu soustavou ADCP (autor Zdenka Krmelová)

Pro skenování dna byl použit sonar GeoSwath 4R společnosti Kongsberg. Během měření museli být na člunu dva měřiči – jeden, který pádloval a druhý obsluhující počítač. Plovák se skenerem a GNSS přijímačem byl tažen pomalu za člunem (Obr. 3). Koryto bylo skenováno tak, aby byla pokryta jak pravá, tak levá strana, včetně jeho středu. Výška hladiny byla zaměřena geodeticky.

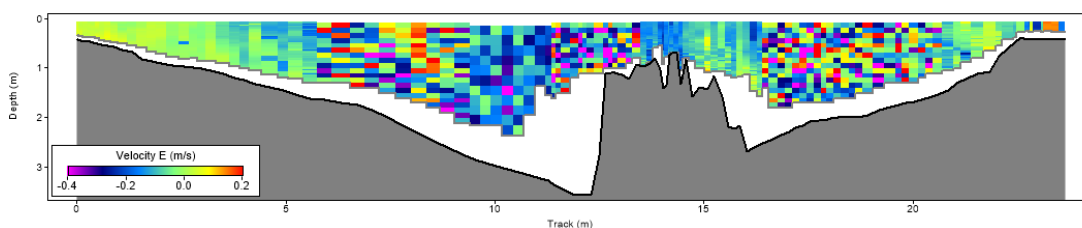


Obr. 3 Skenování Odry se skenerem GeoSwath 4R (Autor: Martin Bolek)

Veškeré výpočty souřadnic bodů byly provedeny v programu Groma. Pro připojení geodetického měření byly použity 4 nivelační body.

Tvorba geodeticky zaměřených profilů byla uskutečněna v programu Microsoft Excel. Jelikož trigonometrické zaměření výšek by mělo být ze všech tří měření nejpřesnější, posloužily tyto profily jako kontrola přesnosti měření sonarů RiverSurveyor S5 a GeoSwath 4R.

Před tvorbou modelů z příčných profilů sonaru RiverSurveyor S5 byla eliminována chybná data a vybrány ty nejlepší profily s nejnižším, nebo ideálně žádným počtem chyb (Obr. 4). Z celkových 57 měření bylo vybráno 27. Následně byly profily vřícovány pomocí geodeticky měřených vřícovacích bodů do souřadnicového systému, a nakonec čistá opravená data byla použita k tvorbě modelu koryta.



Obr. 4 Ukázka výstupu z měření RiverSurveyor S5

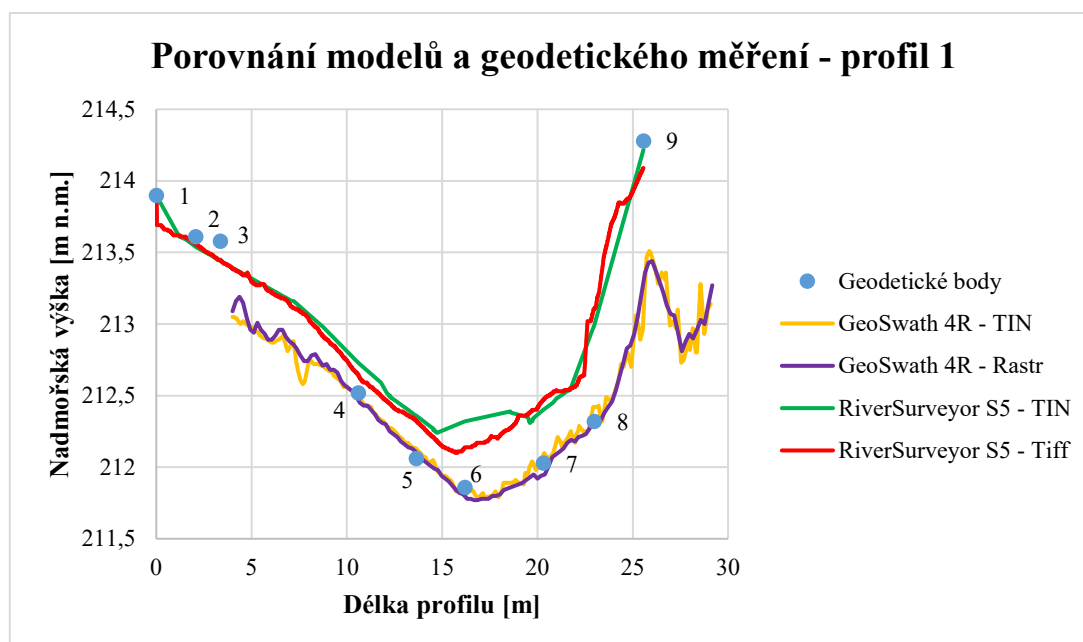
Všechna data byla přetransformována do souřadnicového systému S-JTSK, data měřena sonarem RiverSurveyor S5 byla poté agregována na počáteční a koncové geodeticky zaměřené body profilů, data měřena sonarem GeoSwath 4R byla manuálně posunuta o 4 m, jelikož i přes transformaci souřadnicové soustavy došlo k odchýlení měření mimo koryto přibližně o tuto hodnotu z důvodu vlivů způsobujících odchylky (pozice satelitů, vegetace v korytě, rychlost pohybu přijímače a další možné vlivy).

Výsledky

Porovnávání modelů

Porovnávání přesnosti modelů probíhalo několika způsoby. V první řadě byly porovnávány výstupy dvou softwarů, ArcGIS a HEC-RAS, a přesnost jejich sestavených digitálních modelů koryta a zároveň porovnání přesnosti formátů rastr vs. TIN. Poté porovnání přesností modelů sestavených ze SBES a MBES metod měření a v konečné fázi i porovnání těchto modelů na základě vhodnosti pro hydrodynamické modelování.

Porovnávání modelů se provádělo vůči geodetickému měření přímo v zaměřených bodech geodetického profilu. Model vytvořen ze sběru dat pomocí SBES byl vytvářen v programu ArcGIS ve formátu TIN a v programu HEC-RAS ve formátu TIFF. Model vytvořen ze sběru dat pomocí MBES byl vytvořen v programu ArcGIS ve formátu TIN a Rastr. Jelikož měření neprobíhala ve stejný den a hladina nebyla ve stejné výšce, byly některé body u dat z GeoSwath 4R z porovnávání vynechány.

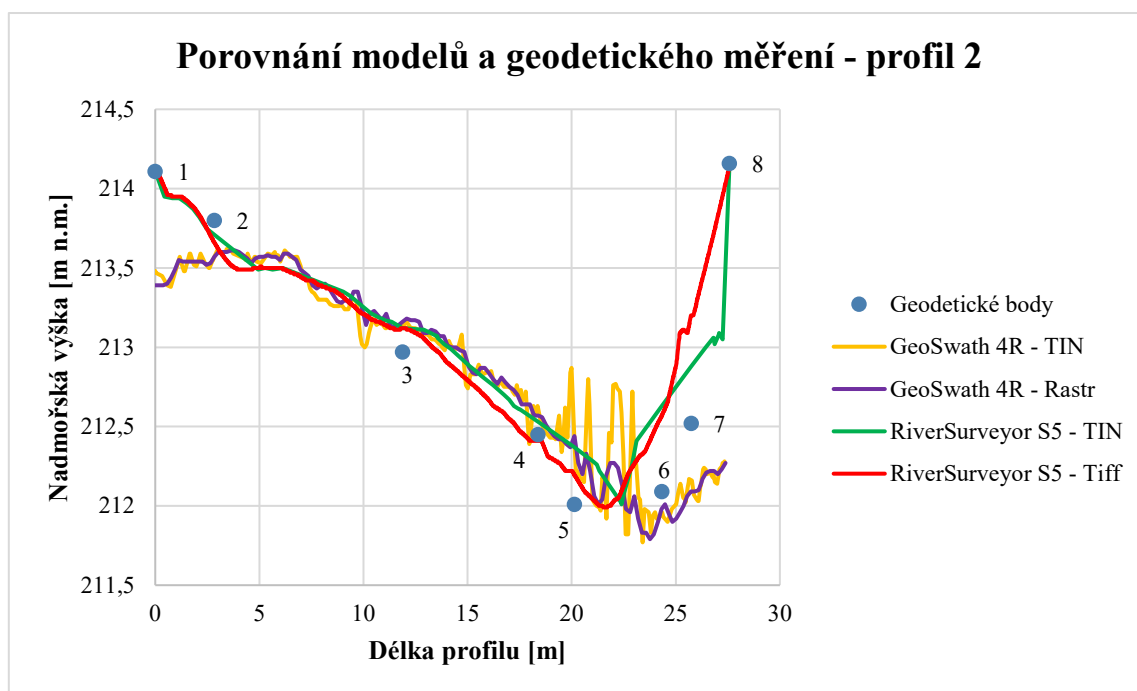


Obr. 5 Porovnání modelů z metody MBES a SBES s geodetickým měřením – profil 1

Tab. 2 Porovnání odchylek u modelů Měřených sonarem RiverSurveyor S5 a GeoSwath 4R – profil 1

		Odchytky od geodetického měření [m]			
		RiverSurveyor S5		GeoSwatr 4R	
Bod	Geodézie	TIN	TIFF	TIN	Rastr
1	213.900	0,000	-0,044	–	–
2	213.610	-0,067	-0,049	–	–
3	213.580	-0,140	-0,134	–	–
4	212.520	0,214	0,127	-0,02	-0,03
5	212.060	0,297	0,262	0,07	0,05
6	211.860	0,457	0,275	-0,03	-0,05
7	212.030	0,366	0,441	0,04	-0,08
8	212.320	0,673	0,785	0,10	0,01
9	214.280	-0,063	-0,198	–	–
Celková odchylka		2,277	2,315	0,260	0,220
Průměrná odchylka		±0,231	±0,247	±0,045	±0,044
Směrodatná odchylka		0,218	0,234	0,033	0,026

Při porovnání odchylek v tabulce 2 lze sledovat, že model zaměřen sonarem GeoSwath 4R vykazuje razantně přesnější výsledky, než model sestaven z příčných profilů měřených RiverSurveyor S5. Rozdíly v modelech zaměřených metodou SBES se pohybují v řádech až desítek centimetrů, oproti tomu model z metody MBES má odchylky v tomto případě v řádech pár centimetrů. Odchylka dokonce nepřekročila ani hranici 10 cm.



Obr. 6 Porovnání modelů z metody MBES a SBES s geodetickým měřením – profil 2

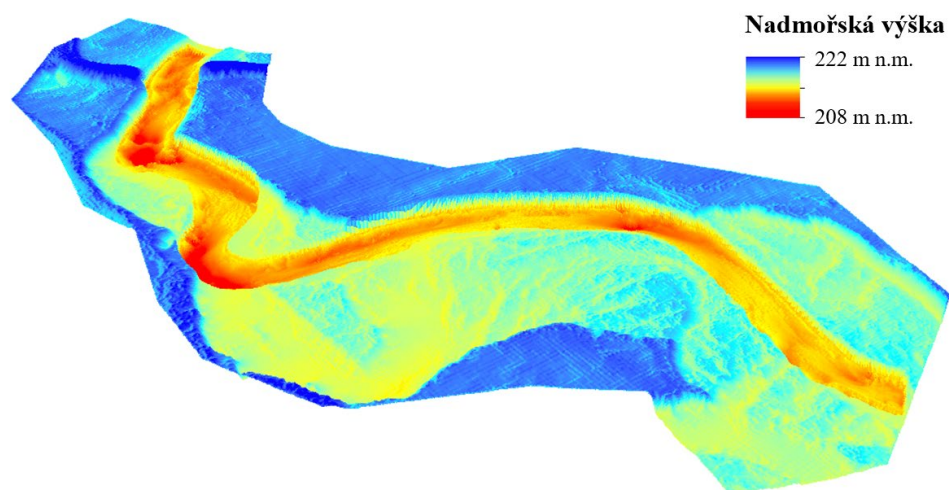
Tab. 3 Porovnání odchylek u modelů Měřených sonarem RiverSurveyor S5 a GeoSwath 4R – profil 2

		Odchytky od geodetického měření [m]			
		RiverSurveyor S5		GeoSwatr 4R	
Bod	Geodézie	TIN	TIFF	TIN	Rastr
1	214.110	0,000	0,011	–	–
2	213.800	–0,090	–0,154	–0,25	–0,23
3	212.970	0,153	0,149	0,16	0,19
4	212.450	0,076	–0,043	0,18	0,12
5	212.010	0,356	0,183	0,40	0,43
6	212.090	0,538	0,480	–0,13	–0,11
7	212.520	0,366	0,680	–0,36	–0,43
8	214.160	–0,004	–0,034	–	–
Celková odchylka		2,277	1,583	1,480	1,510
Průměrná odchylka		±0,231	±0,184	±0,247	±0,252
Směrodatná odchylka		0,218	0,198	0,111	0,145

Přestože odchylky u profilu 2 vykazovaly i u dat měřených sonarem GeoSwath4R velké rozdíly (Tab. 3), nepřekročily tak jako u sonaru RiverSurveyor S5 odchylku půl metru a celkově měla data i menší rozdíly od geodetického měření. Stejně jako v předchozím případě se tak jevíly modely sestaveny z metody MBES jako přesnější i přes možnou chybu posunu měření.

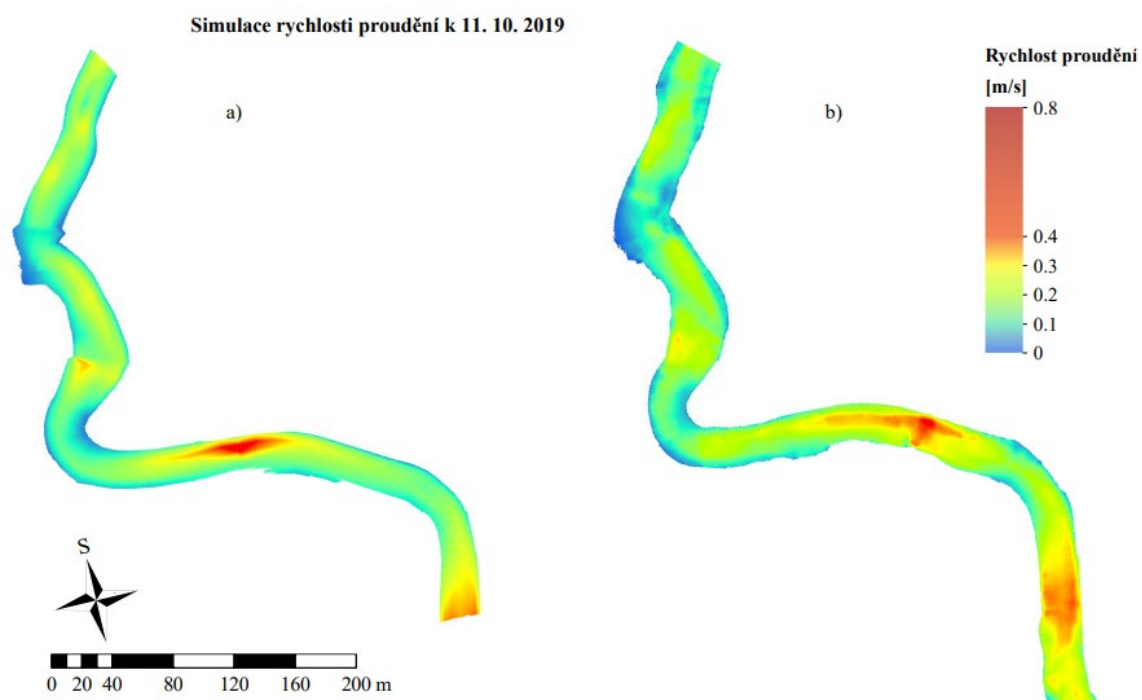
Hydrodynamická modelování

Veškerá modelování probíhala v programu HEC-RAS. Pro postavení 1D hydrodynamického modelu z dat RiverSurveyor S5 byla data vkládána do programu HEC-RAS v podobě příčných profilů a dat okolí z DMR 5G ze souboru vytvořeného preprocessingem v programu ArcGIS. Sestaveny byly modely neustáleného a ustáleného proudění. Pro postavení 2D hydrodynamického modelu z dat GeoSwath 4R byl do programu HEC-RAS vložen digitální model koryta doplněn o data okolí z DMR 5G (Obr. 7).

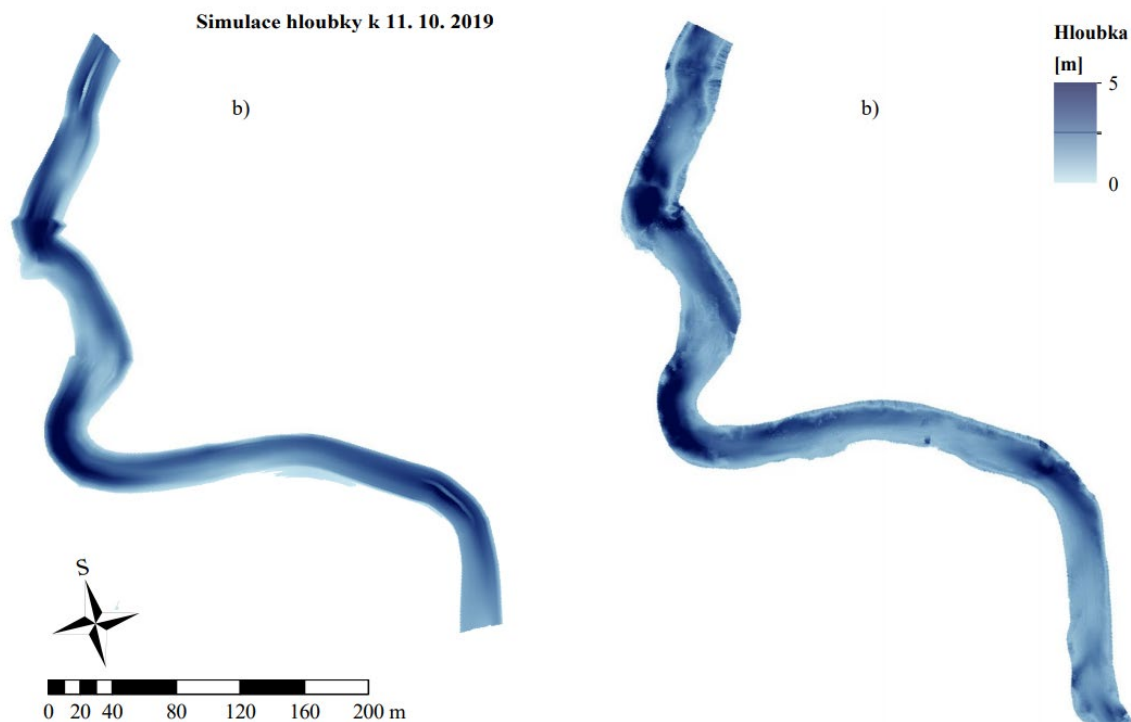


Obr. 7 Vytvoření rastru z metody MBES a DMR 5G zobrazené v programu ArcScene s dvounásobným převýšením terénu

Vytvořeny byly modely neustáleného proudění a pro nasimulování stejných výsledků jako je u ustáleného proudění, které u 2D modelování nelze vytvořit, byly rozlivy n-letých průtoků nasimulovány jako průtoky s intervalem jednoho týdne.



Obr. 8 Simulace rychlosti proudění v korytě k 11. 10. 2019 v a) 1D modelu; b) 2D modelu



Obr. 9 Simulace hloubky v korytě k 11. 10. 2019 v a) 1D modelu; b) 2D modelu

U výsledků map rychlostí a hloubek, lze pozorovat, že odpovídají rozlišení terénu. Když se podíváme na modely hloubek v obr. 9, až tak razantní rozdíly zde nejsou. Samozřejmě je model vytvořený metodou MBES přesnější, ale celkové hloubky jsou porovnatelné. Z pohledu rychlosti proudění v obr. 8, jsou zde samozřejmě jisté rozdíly způsobené metodou modelování. 2D model vytvořen z digitálního modelu koryta z plošných dat počítá i s prouděním do stran, oproti 1D modelu z profilů, který počítá pouze s prouděním po směru proudnice. Z důvodu, že modely na sebe dostatečně polohově nesedí nebylo možné udělat objektivní rastrovou analýzu rozdílů hloubek a rychlostí. I přesto však stojí za zmínění rozdíl v rychlosti v některých částech koryta. Zda je tento rozdíl způsoben řícením břehů nebo podrobností měření není zcela jasné.

V případě map rozlivů N-letých průtoků lze v obr. 10 pozorovat, že mapy z 1D modelování nezobrazují zejména oblast okolí mrtvého ramene s takovou přesností, jako tomu je u mapy ze 2D modelování. Celkové rozlivy 2D modelu jsou také o dost menší a přesnější.

Jelikož zaměřené oblasti nebyly stejné a rozlivy 1D modelování byly omezeny délkou příčných profilů, byl vytvořen polygon oblasti, kde byly rozlivy v rámci podkladu pro oba modely (Obr. 11). Díky velikosti oblasti by i odchylky způsobené posunutím měření GeoSwath 4R neměly být zásadní při výpočtech. Přes tuto oblast bylo přepočítáno procentuální zastoupení daných rozlivů vůči velikosti samotné oblasti (Tabulka 4).

Tab. 4 Procentuální zastoupení a rozdíly rozlivů 1D a 2D modelů

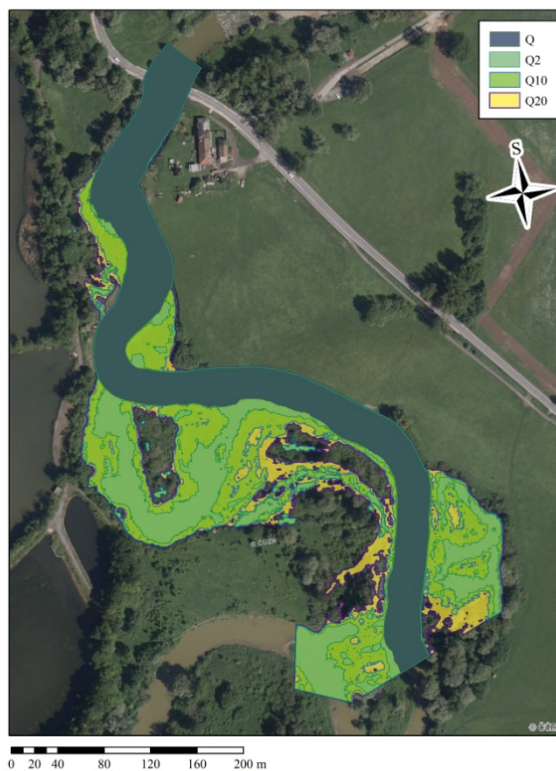
Oblast	1D (%)	2D (%)	Rozdíly (%)
Q2	60,339	41,763	18,575
Q10	78,057	60,076	17,982
Q20	79,786	67,371	12,415
Celek	100	100	0

Jak lze z tabulky 4 pozorovat, velikost rozlivů se v dané oblasti od sebe liší od 12 % až po téměř 19 %, tedy o tolik procent jsou rozlivy 1D modelu větší, oproti rozlivům 2D modelu.

Oblasti rozlivů z 1D modelu v měřené oblasti Polanka nad Odrou



Oblasti rozlivů ze 2D modelu v měřené oblasti Polanka nad Odrou

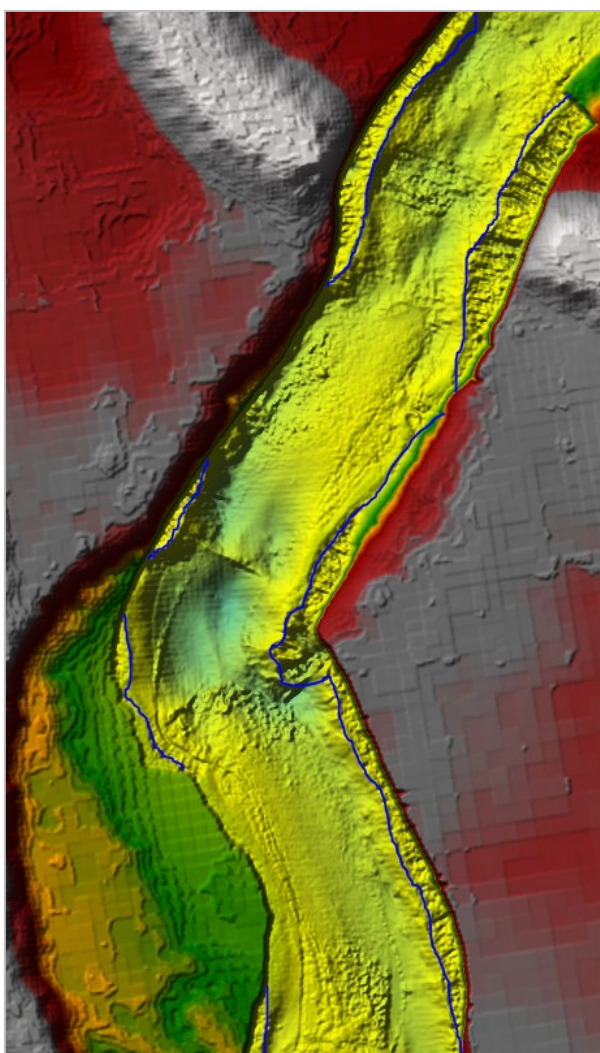


Oblasti rozlivů v 1D a 2D modelu



Obr. 11 Oblast zkoumání velikosti rozlivů 1D a 2D modelování

Během přípravy hydrodynamického modelování byla nalezena anomálie, která byla viditelná zejména v RAS Mapperu v programu HEC-RAS. Zdá se, že sonar GeoSwath 4R v některých úsecích projevuje chybu v měření. Skenované hodnoty přesahují až za okraj břehu (koryto je širší, než má být; viz obrázek 12, kde modré linie značí přibližně kraje břehů), což lze pozorovat i v případech výstupů hloubkových a rychlostních map (Obr. 8–9), kde je spodní část koryta mnohem širší u 2D modelu, než u 1D modelu, ačkoliv průtoky i vodní stav byly v době měření pomocí GeoSwath 4R nižší, než při měření pomocí sonaru RiverSurveyor S5. Pravděpodobně byly zanechány i následné odrazy, které se projevují mimo koryto. Filtrace je hodně náročná na zkušenosti operátora – v kombinaci s náročným tvarem dna, které rychle střídá oblasti s malými a velkými hloubkami. To způsobuje problémy ve vyhodnocení dat. Také to byl jeden z prvních měřených úseků, takže nezkušenost operátora hraje roli. Může to být i problém v kombinaci se zmíněnou polohovou chybou. Právě tato chyba přetažení břehů ovlivnila oblasti rozlivů. Zejména v koncové části měřeného úseku lze pozorovat (Obr. 10), že 2D model z dat GeoSwath 4R zasahuje s klasickým průtokem přes oblast, kde se u 1D modelování z dat RiverSurveyor S5 rozlily modelace Q2, Q10 i Q20. Chybu v šířce koryta a oblasti měření lze odstranit jednoduchým geodetickým zaměřením břehů v době měření sonarem, aby bylo jasné, kam až koryto opravdu sahá a bylo tak možné eliminovat případné chyby v měření.



Obr. 12 Chyby v měření břehů řek za modrou čarou, při měření sonarem GeoSwath 4R

Závěr

Ve výsledku bylo zjištěno, že formát výstupu má na přesnost zanedbatelný vliv. Co ale nemá zanedbatelný vliv je metoda měření. Bylo zjištěno, že digitální model koryta z dat sonaru GeoSwath 4R

vykazuje menší odchylky, a je mnohem přesnější než digitální model koryta RiverSurveyor S5. Oba modely však byly vhodné pro hydrodynamické modelování (Krmelová 2020).

Zda při tvorbě modelu zvolit formát rastru či TINu záleží na tom, jaké bude další využití modelu. Jestliže, hlavně u modelu z příčných profilů, jde o co nejpřesnější model, pak je vhodnější použít formát TINu, ovšem v případě, že se bude model propojovat s jinými výškovými daty a výsledek bude použit pro HD modelování, pak je vhodné vložit data příčných profilů přímo do programu HEC-RAS. U plošných dat se jevil vhodnější formát rastru. Nejen že jej lze po transformaci do TIFFu možno použít přímo v programu HEC-RAS, model se jevil i hladší a jeho vykreslování trvalo oproti modelu TIN mnohem kratší dobu. I tak je vždy tedy třeba při výběru formátu předem uvažovat nad účelem tvorby modelu.

Každý z použitých sonarů má svá pozitiva i negativa. Mezi pozitiva RiverSurveyor S5 lze zařadit například pořizovací cenu či zpracování dat. Také zabere poměrně málo místa a je lehce přenositelný na dané místo měření. Oproti tomu GeoSwath 4R je v ceně na úplně jiných příčkách. Manipulace s ním je těžká a bez řádného proškolení pravděpodobně nebude měřič vůbec schopen přístroj zapojit, či zprovoznit. I samotné zpracování dat je problematické, zejména kvůli jejich objemu a závislosti na zkušenosti operátora. Pokud bude brán v potaz čas a složitost samotného měření, zde vede sonar GeoSwath 4R. Dokonce ještě větší úsek, než byl zaměřován dva dny metodou SBES pak s GeoSwath 4R trval pouze hodinu. Měření je mnohem pohodlnější a méně komplikované. Kde projede člun, tam se může měřit. Oproti tomu měření s RiverSurveyor S5 je vázáno pouze na místa, kde na březích dokážou měřiči manipulovat se samotnou soustavou.

V případě rozhodování mezi SBES či MBES hraje velkou roli pořizovací cena a účel modelování. Jestliže postačí pouze přibližné modely, někde mimo ohrožení civilizace a extrémně přesné výsledky tedy nejsou nezbytné, máme zaměřit krátký rovný dostupný úsek, nebo urbanizované (zpevněné či vydlážděné) koryto, pak se SBES jeví jako dostačující metoda. MBES jsou sice finančně i znalostně velmi zatěžující, na druhou stranu jsou také velmi přesné a velkou roli zde hraje i samotná efektivita měření. I přes téměř hodinovou instalaci, která odpadá v případě, že je zařízení trvale připevněno na plavidle, jsou schopné během poměrně krátké doby zaměřit i několika kilometrový úsek. V případě hydrodynamického modelování také výstup z MBES nabízí výhodu tvorby velmi přesného podkladu pro detailní 2D, případně i 1D, 2.5D a 3D modely. Rozhodnutí pro použití SBES či MBES tak spočívá zejména na účelu měření, finančních prostředcích a subjektivnímu rozhodnutí měřiče. Přestože SBES je stále použitelná metoda, je MBES na velmi dobré cestě tuto metodu jednou zcela nahradit.

Příspěvek vznikl za podpory projektu Specifika fluviální krajiny v kontextu historických a budoucích změn

Název zakázky: 1610-spec.výzkum Ruman SGS 10/PŘF/21,

Číslo zakázky: 316186,

Zdroj: 1610,

Typ: 021978

Zdroje

GEOPORTÁL ČÚZK: Přístup k mapovým produktům a službám resortu, Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) [online]. 2010 [cit. 26-02-2020]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(b535yqtozyhj4ethcaexxss\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis &metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp& menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(b535yqtozyhj4ethcaexxss))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis &metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp& menu=302).

KELLY, R. E. J., DRAKE, N. A., BARR, S. L. (c2004): Spatial modelling of the terrestrial environment. Wiley, Hoboken, NJ.

Krmelová Z. (2020): Srovnání ultrazvukových metod pro měření dna vodního toku. Diplomová práce. Ostravská Univerzita. Ostrava.

SONTEK A XYLEM BRAND: RiverSurveyor® S5 and M9: A new perspective to the notion of measuring open channel Hydraulics [online]. 2018 [cit. 26-02-2020]. Dostupné z: <https://www.sontek.com/riversurveyor-s5-m9>.

KONGSBERG GEOACOUSTICS LTD: GeoSwath 4R, [online]. 2019 [cit. 22-02-2020]. Dostupné z: <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/portable-wide-swath-bathymetry-and-side-scan-geoswath-4r>.

MAIDMENT, D., DJOKIC, D. (2000): Hydrologic and Hydraulic: modeling support with geographic information systems. ESRI Press, Redlands, Calif.

UHLÍŘOVÁ, K., NOVÁKOVÁ, H. (2011): Využití dat leteckého laserového skenování na tocích a v pobřežních zónách. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha.

WAINWRIGHT, J., MULLIGAN, M. (2005): Environmental Modelling: Finding implicity in Complexity. Environmental Monitoring and Modelling Research Group, Department of Geography, King's College London, UK, London. XYLEM: Let's solve water: SonTek RiverSurveyor S5 and M9, [online]. 2020 [cit. 26-02-2020]. Dostupné z: <https://www.xytem.com/en-sg/brands/sontek/sontek-products/river-surveyor-s5-and-m9>.

Data a jejich zpracování:

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV: Hlásná a předpovědní povodňová služba, Detail stanice Bartošovice, [online]. 2019 [cit. 01-11-2019]. Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfdyn.php?seq=20823334

DRBAL, K., ŠTĚPÁNKOVÁ, P., LEVITUS, V., ŘÍHA, J., DRÁB, A., SATRAPA, L., HORSKÝ, M., VALENTA, P., VALENTOVÁ, J., FRIEDMANNOVÁ, L. (2009): Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka.

HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources, Version 5.0, February 2016.

GEOPORTÁL ČÚZK: Přístup k mapovým produktům a službám resortu, Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) [online]. 2010 [cit. 26-02-2020]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(b535yqtozyhj4ethcaexxss\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(b535yqtozyhj4ethcaexxss))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302).

MATTAS, D. (2014): Výpočet průtoku v otevřených korytech. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, Praha.

MIKLÍN, J., DUŠEK, R., KRTIČKA, L., KALÁB, O. (2018): Tvorba Map: učební text Ostravské univerzity. Ostravská univerzita, Ostrava.

ArcGIS Desktop: ArcGIS 10.4.1 for Desktop quick start [online]. ESRI. 2018 [cit. 19-04-2021]. Dostupné z: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/get-started/setup/arcgis-desktop-quick-start-guide.htm>.

GROMA: Groma – geodetický software v prostředí MS Windows [online]. 2017 [cit. 19-04-2021]. Dostupné z: <https://www.groma.cz/cz/groma>.

Využití ADCP ke sledování prostorové distribuce plavenin v profilu Morava – Lanžhot

Libor MIKL, Pavel STIERAND, Robert ŽALIO, Jarmila HALÍŘOVÁ, Vít KODEŠ

Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4 – Komořany, email: Libor.mikl@chmi.cz

Abstract

Voda v krajině hraje významnou roli a informace o jejích změnách jsou pro lidskou společnost nepostradatelné. Pohybu a množství nerozpuštěných látek (plavenin) ve vodních tocích je věnována poměrně malá pozornost ve srovnání se sledováním vodních stavů. I přes to, jsou průtokové poměry plavenin na našem území poměrně dobře zdokumentovány – jejich monitoring probíhá již přes dvě desetiletí. V současnosti hojně používané metody odběrů vzorků plavenin pomocí automatických a ručních vzorkovačů jsou robustní, spolehlivé, nicméně neposkytují informaci o prostorové distribuci plavenin v příčném profilu. Tyto parametry je možné efektivně sledovat s využitím ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Cílem studie je posouzení jednotlivých metod odběrů vzorků a prostorové distribuce plavenin při měnících se průtokových poměrech. Výsledky ukazují významné rozdíly v měření průtoku plavenin získaných jednotlivými metodami odběrů vzorků. Nejvyšší rozdíly (až 98%) byly zaznamenány mezi ADCP a vzorky odebranými automatickými vzorkovači. Rozdíly mezi ADCP ve srovnání s ručními vzorkovači byly minoritní. Prostorová distribuce plavenin není homogenní, mění se v závislosti na morfologii koryta, zejména na výšce hladiny a průtoku. Nejmenší rozdíly byly zaznamenány při průtoku $19,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($2\text{--}3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$), naopak největší byly evidovány při průtoku $288,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($500\text{--}700 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Koncentrace plavenin se výrazně mění, se vzdáleností od břehů směrem do středu toku, s rostoucím průtokem byly vyšší koncentrace nalezeny zejména v okrajových částech toku.

Klíčová slova: ADCP, plaveniny, prostorová distribuce, vodní toky, odběr vzorků

Úvod

V posledních desetiletích dochází k výrazným změnám/výkyvům počasí, které mají za následek nárůst extrémních událostí povodně/sucho (Trnka et al. 2016, Ledvinka and Coufal 2019), jež významně dopadají na lidskou činnost i celou krajinu (Trnka et al. 2016). V souvislosti s těmito extrémními událostmi se odvíjí i množství nerozpuštěných látek (plavenin), které jsou transportovány po proudu toku níže (Guerrero et al. 2011, Latosinski et al. 2017, Kemper et al. 2019). Sledování pohybu a množství nerozpuštěných látek (plavenin) je v hydrologii poněkud opomíjenou avšak důležitou disciplínou. Vodní toky nejsou unifikované kanály s homogenním prouděním a rozptylem látek, proto při hodnocení množství plavenin hraje významnou roli zvolená metoda a způsob odběru vzorků stejně jako přírodní podmínky (tj. morfologie koryta, přirozené nebo umělé překážky, Defendi et al. 2010, Kemper et al. 2019). Ještě v nedávné minulosti bylo možné sledovat množství plavenin jen za pomoci odběru vzorků s využitím ručních vzorkovačů, později se uplatnily automatické vzorkovače (Gartner JW, 2002, Betteridge et al 2008). Obě metody umožňují odhad množství plavenin v tocích, ale neposkytují informaci o jejich prostorové distribuci (Thorne and Buckingham 2004, Sahin et al. 2020). V souvislosti s dostupností technického i softwarového vybavení je studium rozdílů nejen v prostorové distribuci plavenin, ale i mezi jednotlivými metodami odběru vzorků v současnosti mnohem přístupnější. Proto jsme se rozhodli využít novou metodu, která umožňuje získat tyto informace, ta je založena na kvantifikaci plavenin (Moore et al. 2012, Sahin et al. 2020) pomocí zpětného odrazu zvuku, získaného prostřednictvím ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, Wall et al. 2006). ADCP je v hydrologii běžně využíváno k měření průtoků (Defendi et al. 2010, Baranya and Józsa, 2013, Huang 2019), vedlejším produktem jsou data o zpětném odrazu (Kostaschuk et al. 2005, Defendi et al. 2010, Baranya and Józsa, 2013), jež nejsou dále využívána.

Tyto údaje jsme se rozhodli využít a doplnit poznatky pro monitoring plavenin a jejich kvantifikaci, který provozujeme v denním režimu (tj. Český hydrometeorologický ústav). Cílem studie je posouzení prostorové distribuce plavenin v příčném profilu a jejich porovnání s naměřenými hodnotami z monitoringu.

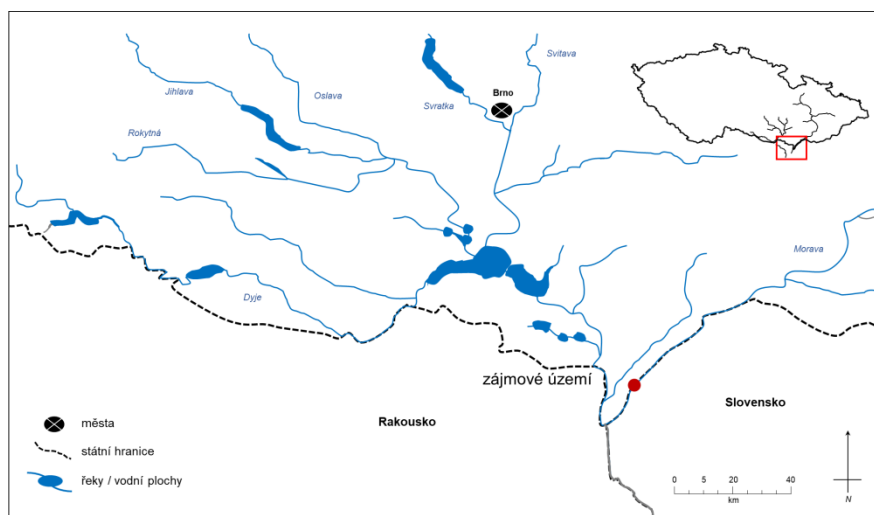
Metodika

Terénní měření a odběr vzorků probíhal na dolním toku Moravy mezi lety 2018 a 2020. Řeku Moravu je možné charakterizovat jako tok s polopřirozeným odtokovým režimem, který je upravován pouze jezovými zdrži. Celkem bylo odebráno 57 vzorků, provedena 4 měření na profilu Morava – Lanžhot (Obr. 1), kde byl sledován průtok a prostorová distribuce plavenin při 4 různých vodních stavech/průtokových poměrech ($H = 41 \text{ cm} / Q = 19,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $H = 79 \text{ cm} / Q = 39,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $H = 101 \text{ cm} / Q = 65,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $H = 360 \text{ cm}$ a průtoku $288,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Pro zjištění průtokových poměrů, rychlosti proudu a zpětného odrazu byly použity přístroje, Riverpro a Streampro s frekvencí 1200 a 2000 kHz od společnosti Teledyne RD Instruments. Počet a rozmístění odebraných vzorků na sledovaných lokalitách byl stanoven na základě průzkumu ADCP (4 až 6 měření). Vzorky byly odebírány s ohledem na vodní stav, rychlost proudu, charakter dna a břehů (tj. počet odebraných vzorků úměrně rostl s diverzitou prostředí ve vztahu „benefit cost ratio“, pohyboval se v rozmezí 8–24). Vzorky byly odebírány pomocí dvou druhů vzorkovačů, Vandorn a modifikovaný USP-61 sampler („torpedo“). Jejich použití se odvíjelo od vodního stavu a rychlosti proudění, s ohledem na odběr vzorků v předem stanovené hloubce (Vandorn – nízké až průměrné, torpedo – nadprůměrné až extrémní vodní stavy). Po odběru vzorků následovalo opět měření ADCP ve 4 až 6 opakováních, s ohledem na posouzení stálosti / proměnlivosti vodního prostředí. Po odběru byly vzorky odvezeny do laboratoře ke stanovení množství plavenin, poté byly výsledky vyhodnoceny prostřednictvím programu Visea Das (Aqua Vision 2017). Výsledky průtoků plavenin byly porovnány s hodnotami získanými z denního monitoringu, kdy vzorky byly odebírány bodově (pomocí ručního [PR] a automatického vzorkovače [PS – slévaný vzorek, odběr probíhal 2x denně v rozmezí 12h, PA – okamžitý vzorek]) a následně bylo množství plavenin přepočítáno pro daný průtok podle následujícího vztahu.

$$\overline{flux} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \times C_i$$

$flux$ = průměrný průtok plavenin, Q = průtok, C = koncentrace plavenin

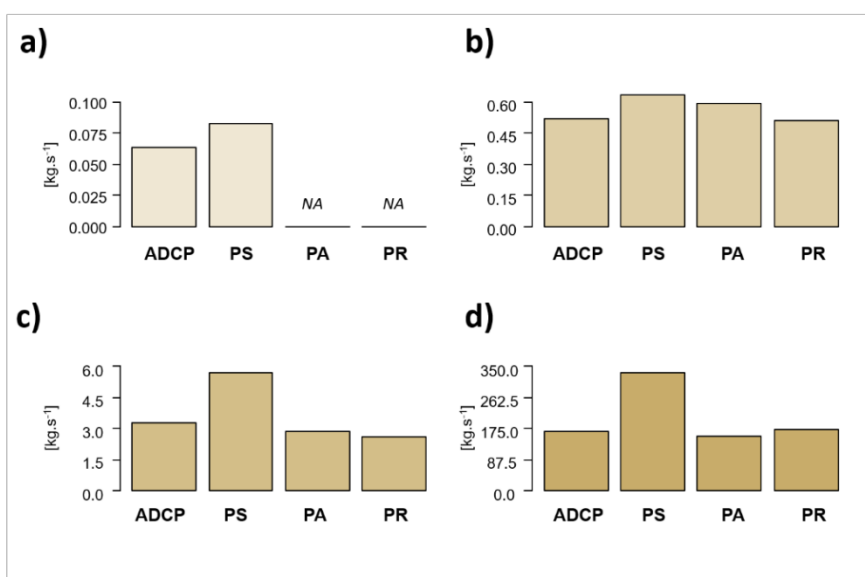


Obr. 1 mapa zájmového území, Morava – Lanžhot

Výsledky

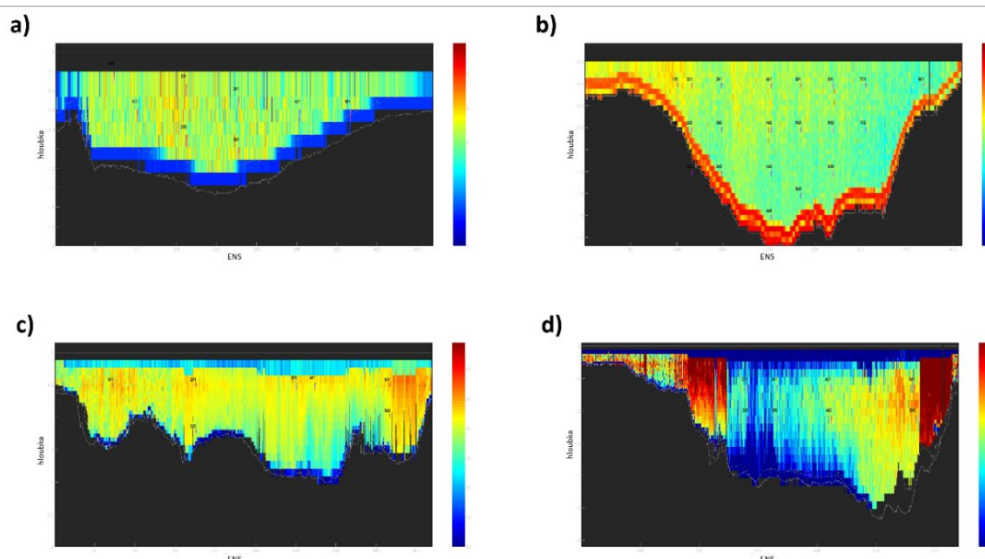
Mezi jednotlivými metodami odběru vzorků byly nalezeny významné rozdíly v množství průtoků plavenin (Obr. 2). Nejvyšší rozdíly byly zaznamenány mezi odběrem vzorků s využitím ADCP

a slévaných vzorků z automatického vzorkovače (PS), pohybovaly se v rozmezí od 3 do 98 % (medián 26 %). Rozdíly mezi hodnotami získanými ADCP a ručními vzorky (PR) byly v rozmezí 3 % až 62 % (medián 9 %) a mezi okamžitými vzorky z automatu (PA) byly 8 % až 64 % (medián 16 %). Nejmenší rozdíly v průtoku plavenin (max. 23%) mezi jednotlivými typy odběrů/vzorkování byly zaznamenány při vodním stavu $H = 79$ cm a průtoku $Q = 39,8$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, průměrný průtok plavenin se pohyboval v rozmezí $\text{ADCP} = 0,515$ vs. $\text{PS} = 0,634$ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 2b). Naopak nejvyšší zjištěné rozdíly (max. 98 %) mezi jednotlivými metodami odběru vzorků byly zaznamenány při vodním stavu $H = 360$ cm a průtoku $288,2$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kde průtok plavenin se pohyboval v rozmezí, $\text{PA} = 154,7$ až $\text{PS} = 332,6$ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, hodnoty průměrného průtoku plavenin změřeného prostřednictvím ADCP dosahovali $168,2$ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 2d). Při nízkém vodním stavu $H = 41$ cm a $Q = 19,4$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, průtok plavenin dosahoval hodnot: $\text{ADCP} = 0,064$ až $\text{PS} = 0,082$ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 2a, tj. rozdíl mezi jednotlivými metodami odběru byl max. 28 %). Průtok plavenin při průměrném vodním stavu $H = 101$ cm a $Q = 65,3$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ byl zaznamenán v rozmezí: $\text{PR} = 2,613$, $\text{ADCP} = 3,263$, $\text{PS} = 5,690$ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 2c), max. rozdíl pro jednotlivé typy vzorků byly 80 %.



Obr. 2 rozdíly v průtoku plavenin mezi jednotlivými metodami od odběru vzorků, a) vzorky odebrané při: $H = 41$ cm s $Q = 19,4$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) při $H = 79$ cm s $Q = 39,8$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) při $H = 101$ cm s $Q = 65,3$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) při $H = 360$ cm a průtoku $288,2$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ADCP = vzorky odebrané při měření s ADCP, PS – slévané vzorky z automatu, PA – okamžité vzorky z automatu, PR – ruční vzorky.

Prostorová distribuce plavenin v příčném profilu významně roste při zvětšujícím se průtoku, koncentrace plavenin se výrazně mění od břehů směrem do středu toku (obrázek 3.). Nejmenší rozdíly v příčném profilu byly zaznamenány při průtoku $19,4$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($2\text{--}3$ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$, obr. 3a), mírně větší množství plavenin bylo evidováno od břehu směrem ke středu toku – přibližně v $1/3$ toku (14 m od břehu). Při narůstajícím průtoku dochází k heterogenizaci distribuce plavenin, které jsou soustředěny převážně v blízkosti břehů, jejich koncentrace narůstají od břehu s pomalejším prouděním – jesep (obr. 2b) po návodní břeh (obr. 2c). Nejvyšší rozdíly v koncentraci plavenin byly zaznamenány při nejvyšším změřeném průtoku $288,2$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($500\text{--}700$ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$, obr. 2d), nejvyšší hodnoty byly evidovány v blízkosti obou břehů.



Obr. 3 prostorová distribuce plavenin při rozdílných průtokových poměrech, a) $H = 41 \text{ cm}$ s $Q = 19,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $H = 79 \text{ cm}$ s $Q = 39,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) i $H = 101 \text{ cm}$ s $Q = 65,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $H = 360 \text{ cm}$ a průtoku $288,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ENS – číslo buňky změřené ADCP.

Diskuse

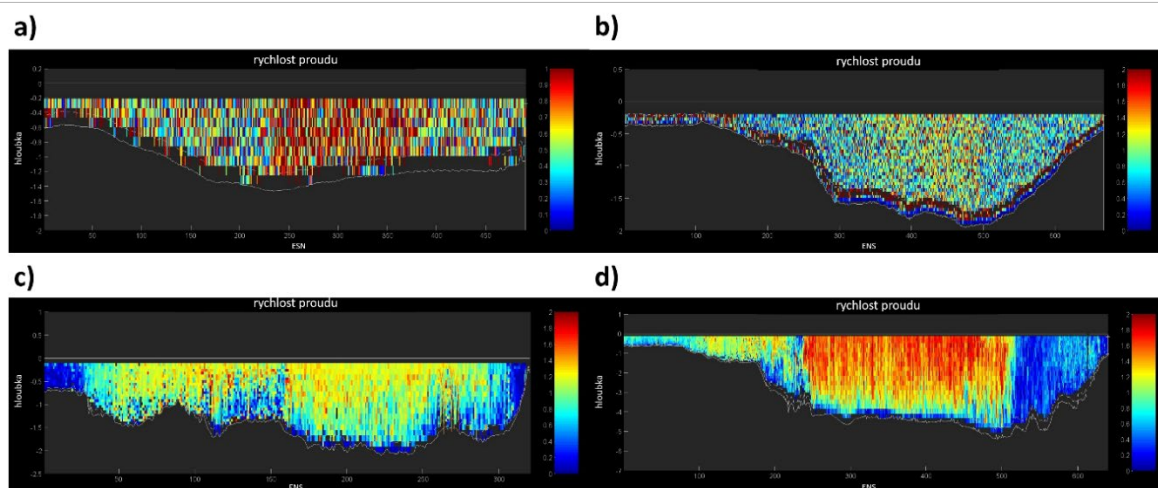
Na základě provedených měření při 4 různých průtokových poměrech jsme dokumentovali možnost využití ADCP při hodnocení průtoku plavenin a jeho srovnání s konvenčně používanými metodami (vzorkování pomocí ručních vs. automatických vzorkovačů). Hlavní předností ADCP, kromě poměrně přesného výpočtu celkového průtoku plavenin, je zejména možnost posouzení jejich prostorové distribuce, která je jen velmi obtížně až téměř nezjistitelná běžnými metodami (Kostaschuk et al. 2005, Defendi et al. 2010).

Největší rozdíly v průtoku plavenin byly zaznamenány mezi ADCP a slévanými vzorky (PS) odebrané automatickým vzorkovačem (98 %, obr. 2). Tento rozdíl je způsoben několika faktory,

- i) zejména zvolenou metodikou vzorkování, kdy slévaný vzorek prezentuje průměrné denní množství plavenin – jelikož je odebírán 2x denně (v 6 a 18 h) – rozdíl se zvyrazňuje při měnících se průtokových poměrech (Defendi et al. 2010). Naopak data získaná z ADCP představují okamžitý průtok plavenin, vztahující se k dané události (Wall et al. 2006).
- ii) měnícími se přírodními podmínkami – změny vodního stavu/průtoku (Defendi et al. 2010) během 24 h. Nejvyšší rozdíly v průtoku plavenin mezi jednotlivými metodami odběru vzorků (ADCP vs. PS, PA a PR) byl zaznamenán při průtoku $65,3$ a $288,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 2 c, d). Výrazné rozdíly mezi jednotlivými typy vzorků odebrané při průtoku $65,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 2c) byly způsobené měnícím se vodním stavem (tj. první část vzorku byla odebrána v 6 h při vodním stavu 76 cm, druhá část v 18 h, hladina dosahovala výšky 82 cm). Při průtoku $288,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 2d) vzorky byly odebírány až po kulminaci, tj. první část slévaného vzorku byla odebrána v 6 h při výšce hladiny 380 cm, naproti tomu začátek odběru vzorků s ADCP byl až v 11 h, kdy výška hladiny klesla o 22 cm. S klesající výškou hladiny dochází k výraznému poklesu množství plavenin v toku (Latosinski et al. 2017).
- iii) Rozdíly v průtokových poměrech plavenin mezi slévanými vzorky a ADCP mohou být také způsobeny pozicí sacího zařízení v toku, které je umístěno v blízkosti břehu (max. 2 m od břehu), kde tak dochází ke zvýšené koncentraci plavenin (Defendi et al. 2010, Latosinski et al. 2017) v důsledku nižších rychlostí proudu z důvodu zvýšeného tření o nerovný povrch dna a břehů (Gaeuman and Jacobson 2007). Zaznamenané rozdíly v průtoku plavenin získaných prostřednictvím ADCP vs. PA a PR již nebyly tak vysoké jako u PS, také v důsledku toho, že byly odebírány v blízkém časovém úseku tj. před a následně po vlastním odběru vzorků s ADCP.

Prostorová distribuce plavenin není homogenní (obr. 3), mění se v závislosti na morfologii koryta (Rennie et al. 2002), zejména pak na výšce hladiny a průtoku, kdy dochází ke změnám odtokových

poměrů v krajině i unášecí schopnosti vodního toku (Metadier and Bertrand-Krajewski 2012, Rügner et al. 2019, Sharma et al. 2020). Nejmenší rozdíly v rozložení plavenin $2\text{--}3 \text{ mg.l}^{-1}$ byly pozorované při nejnižší průtoku $19,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 3a), vyšší koncentrace byly soustředěny v proudnici směrem ke středu toku. S narůstajícím průtokem se vyšší koncentrace plavenin posouvají od středu toku k jeho okrajům, nejprve dochází k jejich nárůstu u břehu s pomalejším prouděním (jesep, obr 3b), posléze s narůstajícím průtokem vyšší koncentrace se vyskytují poblíž obou břehů (obr 3 c, d). Podle dosud získaných výsledků se jeví, že koncentrace plavenin rostou v nepřímém poměru s rychlostí proudu (obr. 4.), tj. zvýšené koncentrace se nacházejí na okraji proudového pole. V důsledku snížení rychlosti proudu o nerovný povrch dna a břehů, kde dochází k „vypadávání“ a kumulaci unášených látek a tedy i ke zvýšení koncentrací plavenin (Kostaschuk et al. 2005, Defendi et al. 2010, Kemper et al. 2019).



Obr. 4 rozložení rychlosti proudění v toku, **a)** $H = 41 \text{ cm}$ s $Q = 19,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, **b)** $H = 79 \text{ cm}$ s $Q = 39,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, **c)** i $H = 101 \text{ cm}$ s $Q = 65,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, **d)** $H = 360 \text{ cm}$ a průtoku $288,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ENS – číslo buňky změřené ADCP.

Dosud provedená měření ukázala významné rozdíly v prostorové distribuci plavenin při měnících se průtokových poměrech. Přes poměrně malý data-set (4 měření), který jsme dosud analyzovali, věříme, že výsledky naší studie jsou správné. Avšak jsme si vědomi potřeby studie prostorové distribuce plavenin i na jiných tocích, abychom potvrdili/vyvrátili dosud zjištěné výsledky, které budu předmětem navazujících studií.

Závěr

Na základě provedených měření při 4 výrazně rozdílných vodních stavech jsme dokumentovali využití ADCP při hodnocení průtoků plavenin a jeho srovnání s konvenčně používanými metodami (vzorkování pomocí ručních vs. automatických vzorkovačů). Výsledky prokázaly významné rozdíly v průtoku plavenin při použití různých metod odběru vzorků. Nejvyšší rozdíly (až 98 %) byly zaznamenány mezi ADCP a slévanými vzorky z automatického vzorkovače a tento rozdíl se zvyrazňuje při měnících se průtokových poměrech. Naopak výrazně menší rozdíly byly pozorované mezi ADCP a vzorky odebranými ručním vzorkovačem. Dále výsledky našeho šetření ukazují, že prostorová distribuce plavenin v příčném profilu významně roste s narůstajícím průtokem, a jejich koncentrace se výrazně mění od břehů směrem do středu toku v závislosti na průtokových poměrech.

Zdroje

Baranya S, Józsa J, (2013) Estimation of suspended sediment concentration with ADCP in Danube River. *Journal of Hydrology and Hydromechanic*, číslo 61 (3), s. 232–240.

Betteridge KFE, Thorne PD, Cooke R.D, (2008) Calibrating multi-frequency acoustic backscatter systems for studying near-bed suspended sediment transport processes, *Continental Shelf Research*, číslo 28, s. 227–235.

- Defendi V, Kovačević V, Areana F, Zaggia L, (2010) Estimating sediment transport from acoustic measurements in the Venice Lagoon inlets. *Continental Shelf Research*, číslo **30**, s. 883–893.
- Gary R, Wall, Elizabeth AN, and Litten S, (2006) Use of an ADCP to Compute Suspended– Sediment Discharge in the Tidal Hudson, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia 2006.
- Gaeuman D, and Jacobson RB, (2007) Field assessment of alternative bed-load transport estimators, *Journal of Hydraulic Engineering*, číslo **133** (12), s. 1320–1328.
- Gartner JW, (2002) Estimation of suspended solids concentrations based on acoustic backscatter intensity: theoretical background, Turbidity and Other Sediment Surrogates, Workshop Proceedings, Reno, NV, USA, 2002.
- Guerrero M, Szupiany RN, Amsler M, (2011) Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation, *Flow Measurement and Instrumentation*, číslo **22** (5), s. 392–401.
- Huang H, (2019) The importance of ADCP alignment with gps in moving-boat streamflow measurements. *Flow measurement and instrumentation*, číslo: **67**, s. 33–40.
- Kemper JT, Miller AJ, Welty C, (2019) Spatial and temporal patterns of suspended sediment transport in nested urban watersheds. *Geomorphology*, číslo: **336**, s. 95–106.
- Kostaschuk R, Best J, Villard P, Peakall J, Franklin M, (2005) Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, číslo **68**, s. 25–37.
- Metadier M, and Bertrand-Krajewski, JL, (2012) The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes. *Water Research*. **46** (20), s. 6836–6856.
- Moore SA, Coz JLe, Hurher D, Paquier A, (2012) On the application of horizontal ADCP to suspended sediment transport surveys in rivers. *Continental Shelf Research*, číslo **46**, s. 50–63.
- Latosinski FG, Szupiany RN, Guerrero M, Amsler ML, Vionnet C, (2017) The ADCP's bottom track capability for bedload prediction: Evidence on Method reliability from sandy river applications. *Flow Measurement and Instrumentation*, číslo **54**, s. 124–135.
- Ledvinka O, and Coufal P, (2019) Development of streamflow drought indices in the Morava river basin. In: Electronic book with full papers from XXVIII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, sborník konference: s. 119–132. ISBN 978-966-7067-38-0.
- Rennie CD, Millar RG, Church MA, (2002) Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler, *Journal of Hydraulic Engineering*, číslo **128** (5), s. 473–483.
- Rügner H, Schwientek M, Milačič R, Zuliani T, Vidnar J, Paunović, Laschou S, Kalogianni E, Skoulidikis NT, Diamantini E, Majone B, Bellin A, Chiogna G, Martinez E, López de Alda M, Díaz-Cruz MS, Garthwohl P, (2019) Particle bound pollutants in rivers: Results from suspended sediment sampling in Globaqua River Basin, *Science of the Total Environment*, číslo **647**, s. 645–652.
- Sahin C, Ozturk M, Aydogan B, (2020) Acoustic Doppler velocimeter backscatter for suspended sediments measurements: Effect of sediment size and attenuation. *Applied Ocean Research*, číslo **94**, s. 1–10.
- Sharma RK, Kumar R, Shresta DG, (2020) Suspended sediment dynamics and associated hydro-meteorological interrelations in est rathong glacier, eastern himalaya, india. *Materials Today: Proceeding*, **46** (8), s. 1–10
- Thorne PD, and Buckingham MJ, (2004) Measurements of scattering by suspensions of irregularly shaped sand particles and comparison with a single parameter modified sphere model, *The Journal of the Acoustical Society of America*, číslo **116**, s. 2876–2889.
- Trnka M, Balek J, Štěpánek P, Zahradníček P, Možný M, Eitzinger J, Žalud Z, Herbert F, Turňa M, Nejedlík P, Semerádová D, Havlinka P, Brázdil R, (2016) Drought trends over part of central Europe between 1961 and 2014. *Climatic Research*, číslo: **70**, s. 143–160.

Významnosť a veľkosť trendov minimálnych a priemerných ročných prietokov na Slovensku za obdobie 1961–2015 a ich zmeny v porovnaní s referenčným obdobím 1961–2000

Viliam ŠIMOR, Ľudovít ĽUPTÁK

Slovenský hydrometeorologický ústav v Bratislave, Slovensko, email: viliam.simor@shmu.sk,
ludovit.luptak@shmu.sk

Úvod

Príspevok sa zaoberá vývojom trendov minimálnych a priemerných ročných prietokov obdobia 1961–2015 a ich porovnaním s trendami za obdobie 1961–2000, ktoré požíva Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ) od roku 2006 ako referenčné obdobie. Pri hodnotení obidvoch období sme sa zaoberali ich vzájomným porovnaním a následnou analýzou prípadnej zmeny. Trendy časových radov sa vo všeobecnosti môžu stať dôležitým indikátorom, či dochádza k zmene vo vybraných hydrologických charakteristikách a preto sú takým základným alebo tiež prvotným nástrojom pri analýze údajov. V predkladanom článku boli prietokové rady spracované a štatisticky analyzované pomocou jednoduchého lineárneho trendu a neparametrického Mann – Kendallovho testu, ktorý podrobnejšie je popísaný napr. v Drápela, Drápelová (2011).

Použitie údajov

Minimálny prietok je najmenší okamžitý prietok v danom profile za zvolené obdobie. Na prirodzených tokoch sa za minimálny prietok považuje spravidla najmenší priemerný denný prietok, udáva sa v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ alebo $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$. V zmysle uvedenej definície minimálny ročný prietok v našom prípade predstavuje najmenší priemerný denný prietok v danom hydrologickom roku.

Priemerný prietok je aritmetický priemer všetkých prietokov v danom profile za uvažované obdobie (napríklad deň, mesiac, sezóna, rok a pod.). Stanovuje sa spravidla aritmetickým priemerom priemerných denných prietokov (priemerný denný, aritmetickým priemerom hodinových prietokov) alebo podielom celkového pretečeného množstva (objemu) vody a počtu sekúnd za uvažované obdobie. Udáva sa v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ alebo v $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$. V zmysle uvedenej definície priemerný ročný prietok predstavuje v našom prípade priemerný denný prietok v danom hydrologickom roku (Hydrologia, Terminologický výkladový slovník).

Prietokové údaje za obdobie 1961–2015 boli prevzaté z databázy hydrologickej služby, ktorá umožňuje priame reportovanie minimálnych a priemerných ročných prietokov. Trendy boli hodnotené vo vybraných 65 vodomerných staniách (VS) s dlhodobým pozorovaním, ktoré považujeme za neovplyvnené (1 v povodí Bodva, 8 v povodí Bodrog, 2 v povodí Dunaj, 4 v povodí Hornád, 4 v povodí Ipel', 2 v povodí Morava, 7 v povodí Nitra, 3 v povodí Dunajec a Poprad, 7 v povodí Hron, 4 v povodí Slaná a 23 v povodí Váh (pozn. povodie Váh bolo rozdelené na sub – povodia)).

Postup riešenia

Získané súbory hydrologických údajov boli spracované a štatisticky analyzované pomocou dvoch metód jednoduchého lineárneho trendu a neparametrického Mann-Kendallového testu, ktorý sa používa na detekciu významných trendov v časových radoch. Výhodou Mann-Kendallovho testu je v tom, že nie je ovplyvnený aktuálnym rozdelením dát a zároveň je menej citlivý na extrémne hodnoty v časovom rade (Adámyová, 1989). Test je vhodný predovšetkým pre štatistické súbory väčšieho rozsahu, v ktorých sa nachádza viac ako 40 údajov (WMO, 2008).

Mann-Kendall test je založený na štatistickej hodnote “S”, ktorá sa vypočítava porovnaním každých dvoch hodnôt x_i, x_j , ($i > j$) v časovom rade, pričom štatistická hodnota “S” je daná vzťahom:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

kde:

n – je počet hodnôt v časovom rade.

x_i a x_j – sú porovnávané hodnoty (prietoky)

$\text{sign}(x_i - x_j)$ je:

$$\begin{cases} +1 & \text{ak } x_i - x_j > 0 \\ 0 & \text{ak } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{ak } x_i - x_j < 0 \end{cases}$$

(Pozn. sign znamená znamienko – znamienková metóda).

Mann-Kendallová štatistika (Z) vychádza zo štandardného normálneho rozdelenia a je daná nasledovným vzťahom:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\sigma_s}} & \text{ak } S > 0 \\ 0 & \text{ak } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\sigma_s}} & \text{ak } S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

kde:

σ_s – predstavuje rozptyl a je definovaný ako:

$$\sigma_s = n \cdot (n - 1) \cdot (2n + 5) / 18 \quad (3)$$

kde:

n – je počet hodnôt v časovom rade.

Znamienko štatistiky “Z” udáva, či tento trend je rastúci ($Z > 0$) alebo klesajúci ($Z < 0$), pričom odhad veľkosti získaných trendov nie je možné určiť týmto testom (Santos et al., 2007).

Odhad veľkosti významných trendov (Sen’s slope):

Veľkosti štatisticky významných trendov prietokov v hodnotenej stanici boli vypočítané pomocou odhadu sklonu (smernice) podľa autora Sena (Sen, 1968). Metóda je založená na jednoduchom neparametrickom postupe, ktorý bol vyvinutý spomínaným autorom nasledovne:

Ak existuje lineárny trend v časovom rade, môžeme jeho skutočný sklon vyjadriť pomocou lineárnej rovnice:

$$f(t) = Qt + B \quad (4)$$

kde:

Q – je sklon,

B – je konštanta.
f(t) – je lineárny model.

Odhad sklonu “Q” pre všetky páry v časovom rade sa vypočíta ako:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}, i = 1, 2, \dots, N, \quad j > k \quad (5)$$

kde:

x – sú hodnoty v časovom rade,
N – je počet odhadnutých sklonov pričom platí, že:

$$N = n \cdot (n - 1) / 2$$

kde:

n – je počet hodnôt v pôvodnom časovom rade.

Výsledný odhadnutý sklon (hľadaná smernica) je mediánom týchto N hodnôt z odhadnutých sklonov Q_i .

Pri určovaní jednotlivých významností trendu, jeho rastu a poklesu hodnotíme iba významnosť na hladine 95% (pokiaľ bola vo VS zaznamenaná, považujeme tento trend za významný), ktorá sa používa vo väčšine štatistických úloh. Trendy, ktoré sa vyskytli na nižšej hladine významnosti (90%, 85% a nižšej), považujeme za nevýznamné. Pri vzájomnom porovnaní obidvoch období 1961–2000 a 1961–2015, hľadáme také VS, na ktorých sa táto významnosť zmení. Pokiaľ zmena významnosti nastane, tak v príslušných VS zhodnotíme aj veľkosť trendov pomocou jednoduchého lineárneho trendu a vyššie spomínaného Sen’s slope. Všetky trendové výpočty boli spracované v programe MS Excel.

Dosiahnuté výsledky

Minimálne ročné prietoky ($Q_{r,min}$)

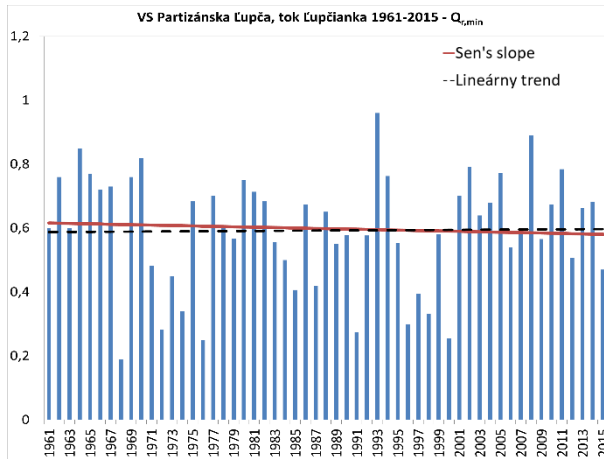
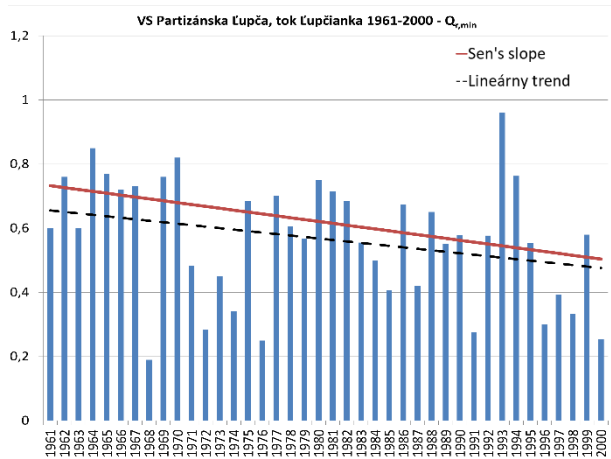
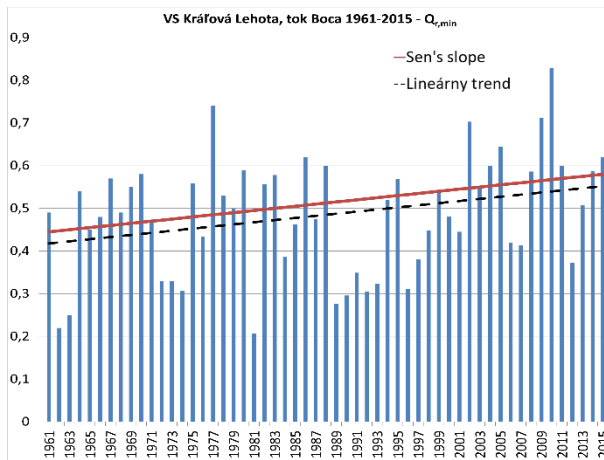
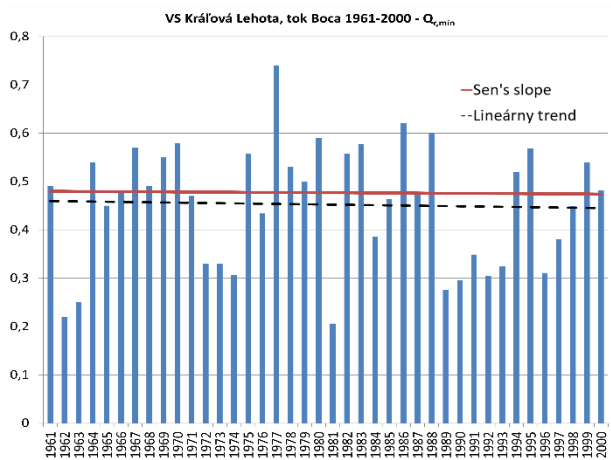
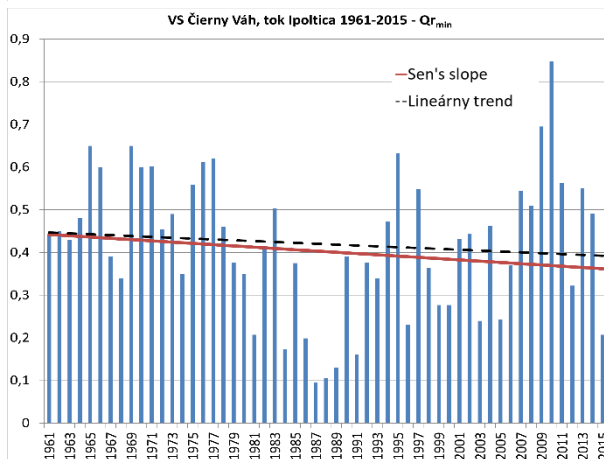
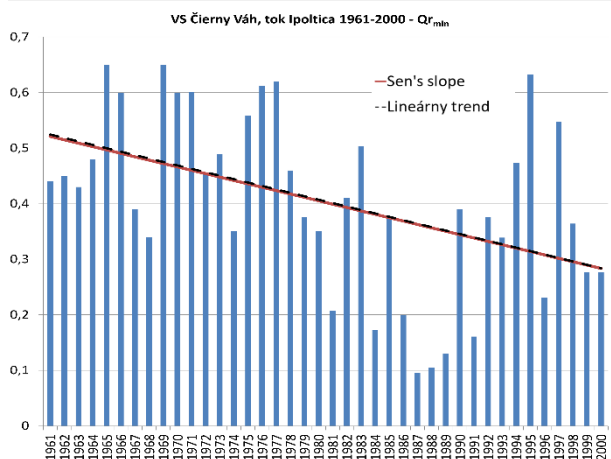
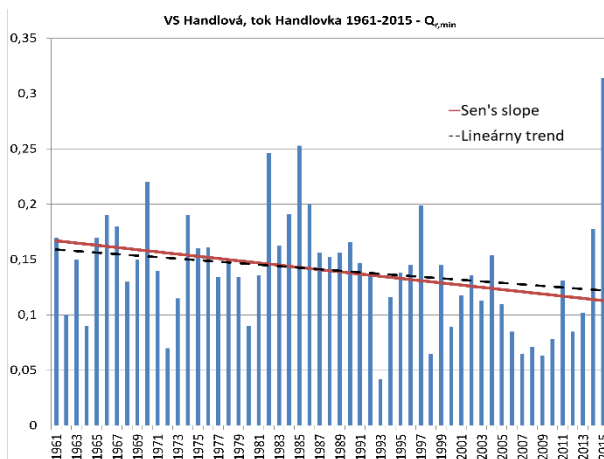
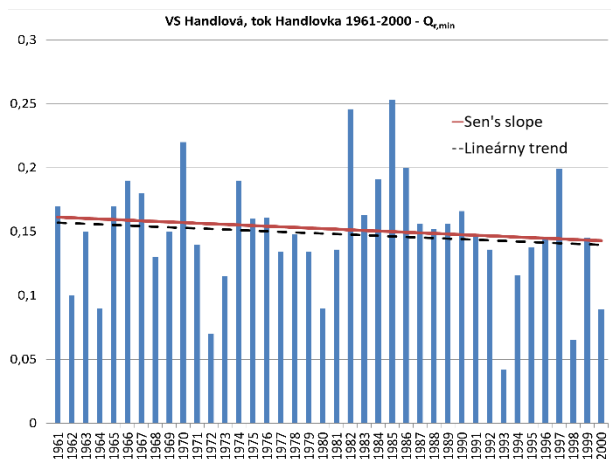
V období 1961–2000 sa na hladine významnosti 95% vyskytlo 7 VS s rastúcimi trendami, 13 VS s klesajúcimi trendami a v 45 VS sa vyskytli nevýznamné trendy. V období 1961–2015 sa na hladine významnosti 95% vyskytlo 7 VS s rastúcimi trendami, 14 VS s klesajúcimi trendami a v 44 VS sa vyskytli nevýznamné trendy alebo žiadne trendy (tab. 1).

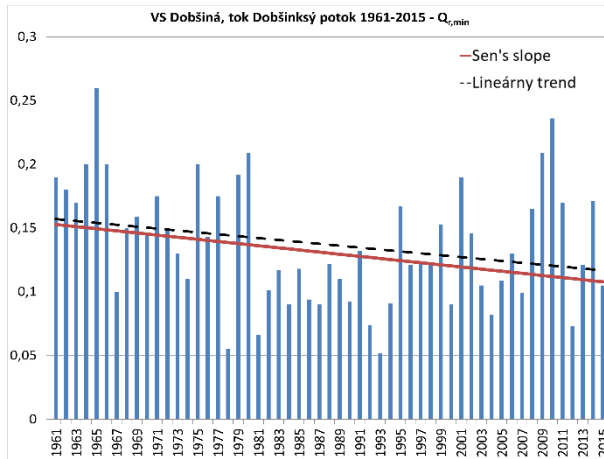
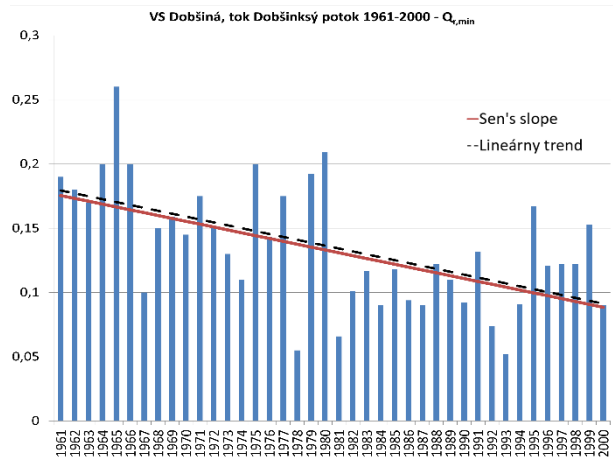
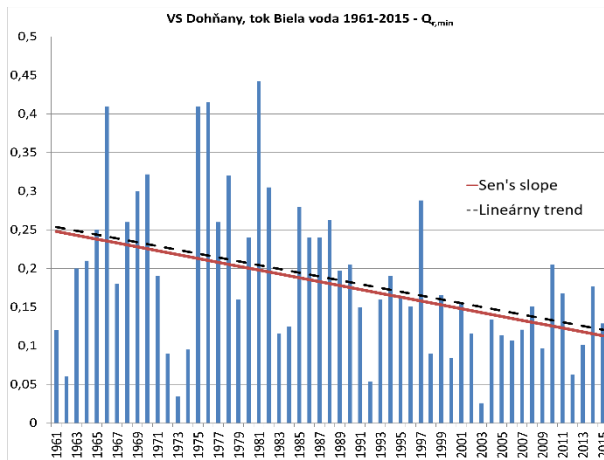
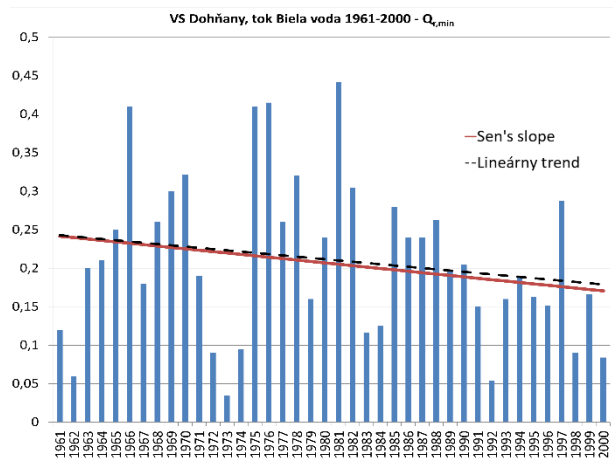
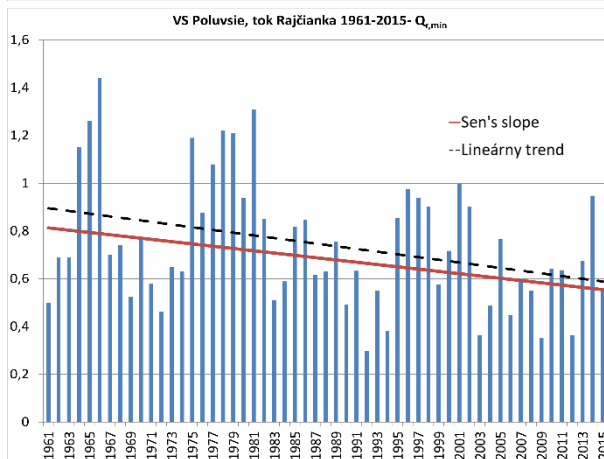
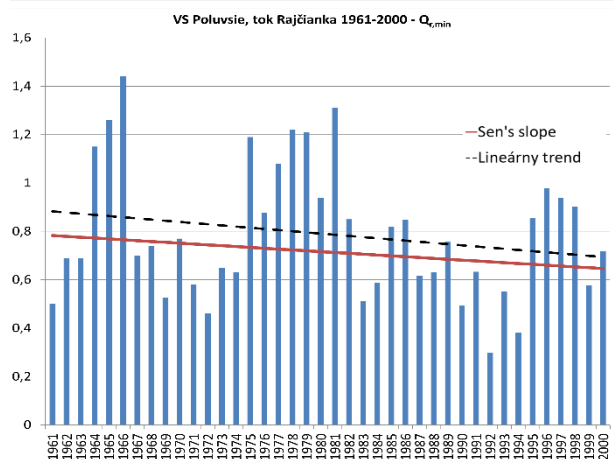
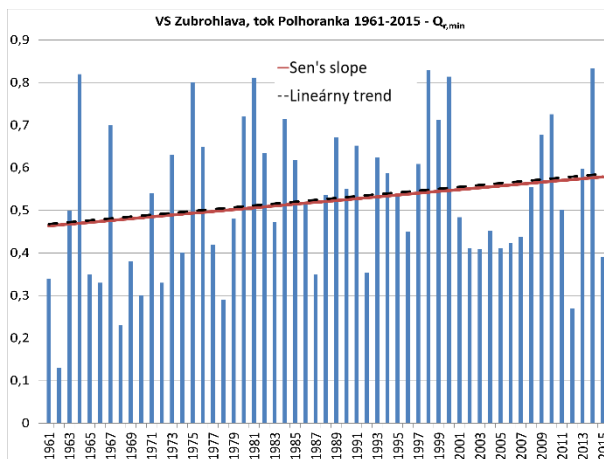
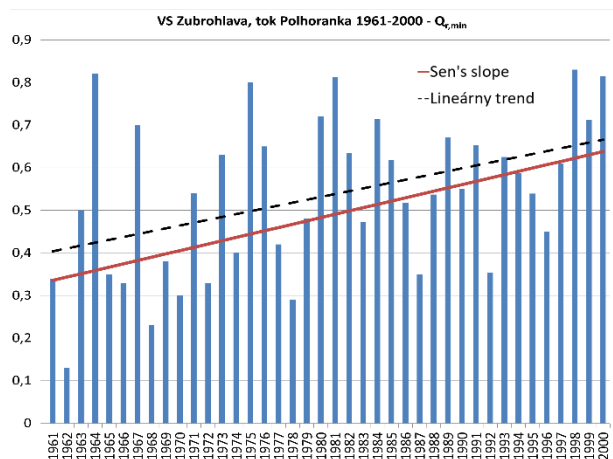
Zmena významnosti trendov po pridaní 15 rokov nastala celkovo v 11 VS. V štyroch VS sa trendy zmenili z nevýznamných na významné klesajúce v troch VS sa trendy zmenili z významných klesajúcich na nevýznamné, v dvoch VS sa zmenil trend z nevýznamného na významný rastúci a v dvoch VS sa zmenil trend z významného rastúceho na nevýznamný (tab. 1).

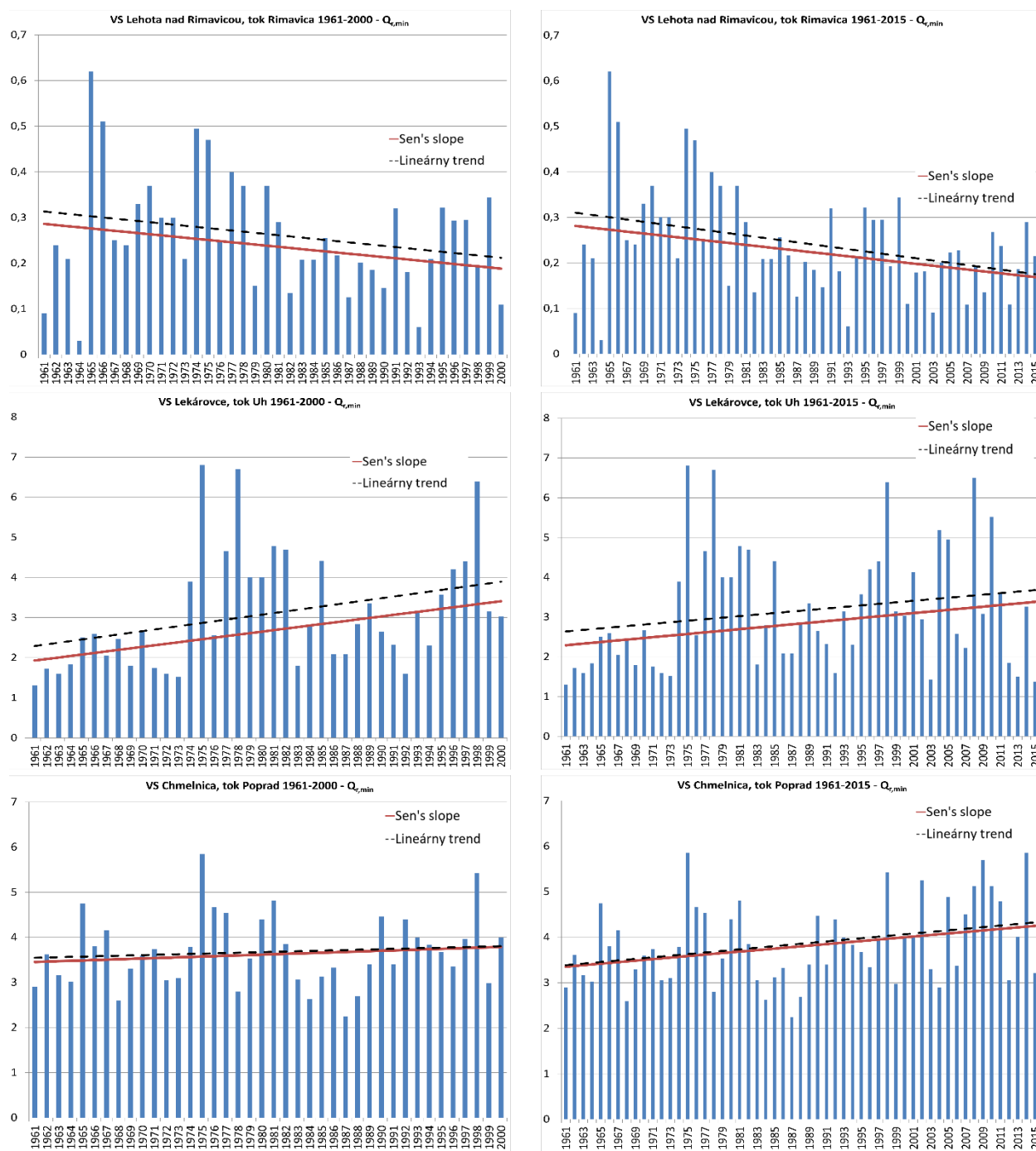
Na obr. 1 sú znázornené veľkosti trendov (Sen’s slope aj lineárneho trendu) vo vodomerných staniaciach, v ktorých nastala zmena významnosti. Výraznejšia rozdielnosť sklonov nastala až v stanici VS Partizánska Ľupča, tok Ľupčianka obdobie 1961–2000. Trend v tomto období je významný klesajúci, pričom obidva veľkosti sklonu sa líšia v strmosti. Lineárny trend má menší sklon ako Sen’s slope, zmena je spôsobená výskytom extrémne nízkeho prietoku v roku 1968, na ktorý lineárny trend reaguje. Vo VS Zubrohlava, tok Polhoranka obdobie 1961–2000 vznikol podobný prípad ako vo VS Partizánska Ľupča, rozdielnosť sklonov je však spôsobená výskytom extrémne vysokého prietoku v roku 1964. Vo VS Poluvsie, tok Rajčianka sa klesajúci nevýznamný trend obdobia 1961–2000 zmenil po pridaní 15-tich rokov na klesajúci významný. V obidvoch obdobiach je možné vidieť rozdielnosť veľkosti sklonov. Tento je spôsobený výskytom extrémne vysokého prietoku v roku 1966.

Tab. 1 Zmena významnosti minimálnych ročných prietokov (Q_{rmin}) v jednotlivých vodomerných stanicích.

Stanica	Tok	Povodie	Významnosť na hladine 95 %		zmena významnosti
			obdobie 1961-2000	obdobie 1961-2015	
Moravský Ján	Morava	Morava	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Láb	Močiarka	Morava	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Spariská	Vydrica	Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Bratislava	Dunaj	Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Pezinok	Blatina	Malý Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Bernolákovo	Čierna voda	Malý Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Horné Orešany	Parná	Malý Dunaj	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Píla	Gidra	Malý Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Nedožery	Nitra	Nitra	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Handlová	Handlovka	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Chalmová	Nitra	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Liešťany	Nitrica	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Nadlice	Bebrava	Nitra	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Nitrianska Streda	Nitra	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Vieska n. Žitavou	Žitava	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Čierny Váh	Ipoltica	Váh	klesajúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Východná	Biely Váh	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Kráľová Lehota	Boca	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	rastúci trend	áno
Podbanské	Belá	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Liptovský Mikuláš	Váh	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Partizánska Ľupča	Ľupčianka	Váh	klesajúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Podsuhá	Revúca	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lubochňa	Lubochňanka	Váh	rastúci trend	rastúci trend	nie
Lokca	Biela Orava	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Oravská Jasenica	Veselianka	Váh	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Zubrohľava	Polhoranka	Váh	rastúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Trstená	Oravica	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Martin	Turiec	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Čadca	Kysuca	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Poluvsie	Rajčianka	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Bytča	Petrovička	Váh	rastúci trend	rastúci trend	nie
Vydrná	Petrinovec	Váh	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Dohňany	Biela voda	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Horné Srnie	Vlára	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Zlatno	Hron	Hron	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Brezno	Hron	Hron	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Hronec	Čierny Hron	Hron	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Bystrá	Bystrianka	Hron	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Mýto p. Dúmbierom	Štiavnička	Hron	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Dolná Lehota	Vajskovský potok	Hron	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Brehy	Hron	Hron	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Holiša	Ipeľ	Ipeľ	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Plášťovce	Krupinica	Ipeľ	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Plášťovce	Litava	Ipeľ	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lučenec	Krivánsky p.	Ipeľ	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Dobšiná	Dobšinský potok	Slaná	klesajúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Štítnik	Štítnik	Slaná	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lenartovce	Slaná	Slaná	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lehota nad Rimavicou	Rimavica	Slaná	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Nížny Medzev	Bodva	Bodva	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Stratená	Hnilec	Hornád	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Jaklovce	Hnilec	Hornád	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Košické Olšany	Torysa	Hornád	rastúci trend	rastúci trend	nie
Ždaňa	Hornád	Hornád	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Koškovce	Laborec	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lekárovce	Uh	Bodrog	rastúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Remetské Hámre	Okna	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Veľké Kapušany	Latorica	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Hanušovce nad Topľou	Topľa	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Svidník	Ondava	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Jasenovce	Olka	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Streda nad Bodrogom	Bodrog	Bodrog	rastúci trend	rastúci trend	nie
Ždiar, Podspády	Javorinka	Poprad	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Poprad, Matejovce	Slavkovský potok	Poprad	rastúci trend	rastúci trend	nie
Chmelnica	Poprad	Poprad	nevýznamný alebo žiadny trend	rastúci trend	áno







Obr. 1 Veľkosť trendov minimálnych ročných prietokov ($Q_{r,min}$) vo vybraných vodomerných staniciach za obdobie 1961–2000 a 1961–2015.

Priemerné ročné prietoky (Q_r)

V období 1961–2000 sa na hladine významnosti 95% vyskytla 1 VS s rastúcim trendom, 12 VS s klesajúcimi trendami a v 52 VS sa vyskytli nevýznamné trendy. V období 1961–2015 sa na hladine významnosti 95% vyskytli 2 VS s rastúcimi trendami, 13 VS s klesajúcimi trendami a v 50 VS sa vyskytli nevýznamné trendy alebo žiadne trendy (tab. 2).

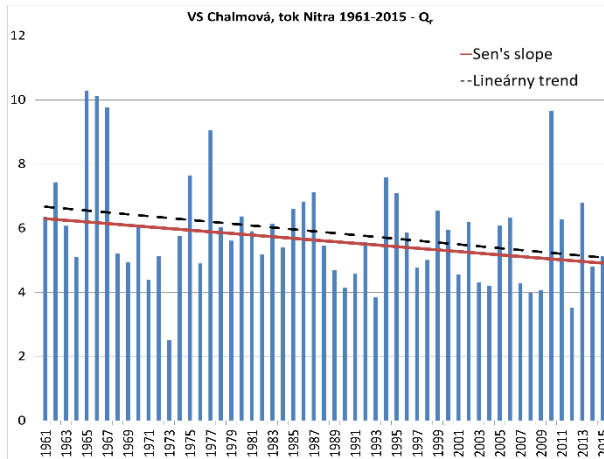
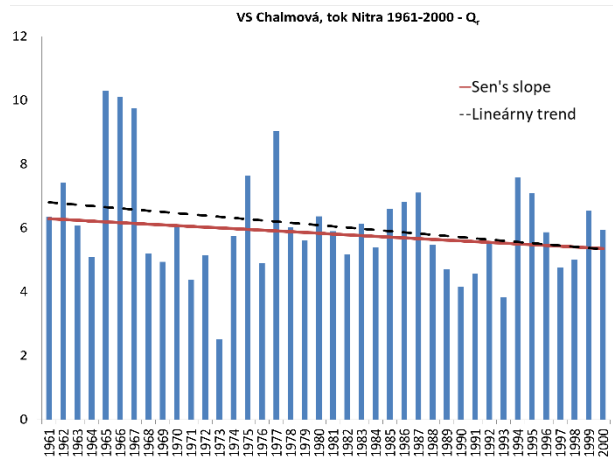
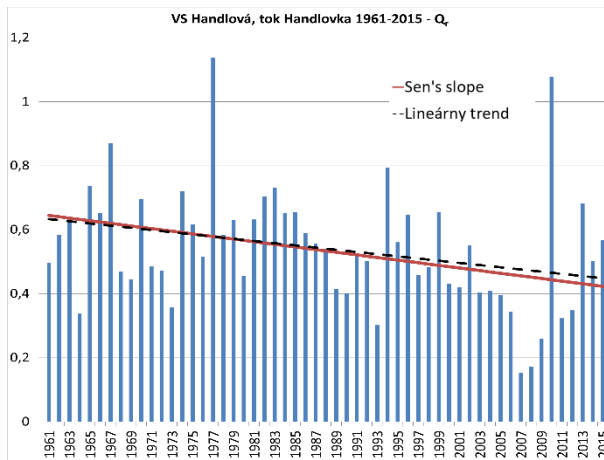
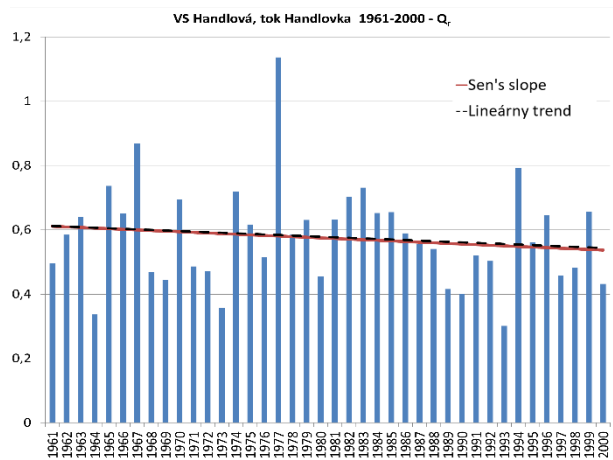
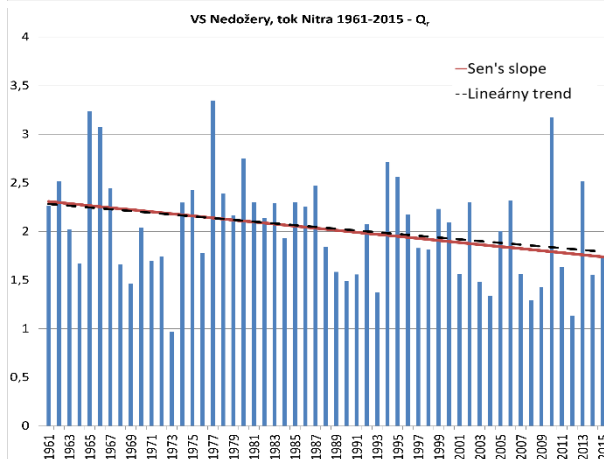
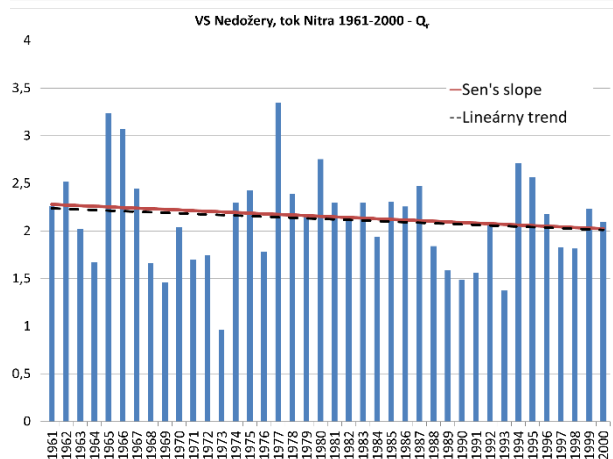
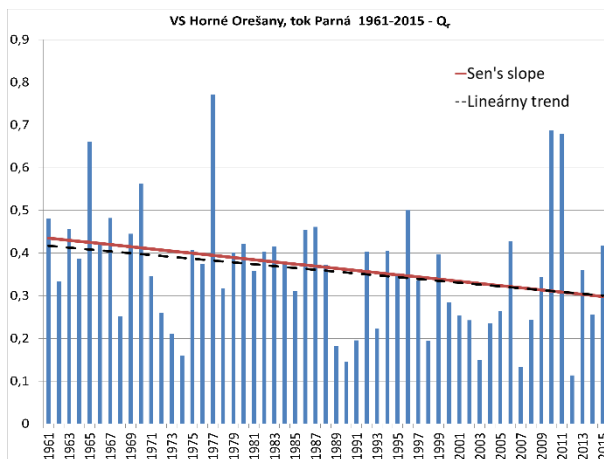
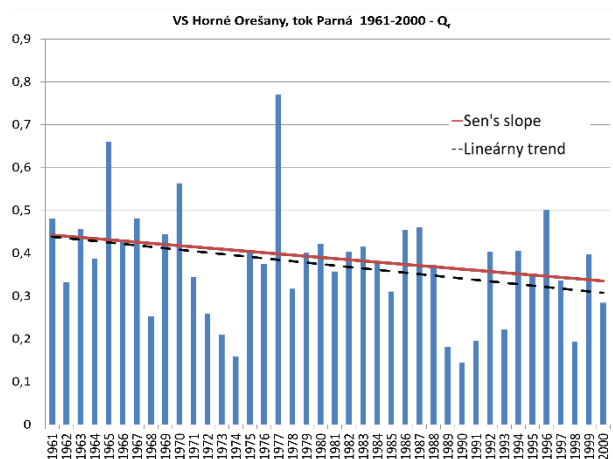
Zmena významnosti trendov po pridaní 15 rokov nastala celkovo v 14 VS. V siedmich VS sa trendy zmenili z nevýznamných na významné klesajúce, v šiestich VS sa trendy zmenili z významných klesajúcich na nevýznamné a v jednej VS sa zmenil trend z nevýznamného na významne rastúci (tab. 2).

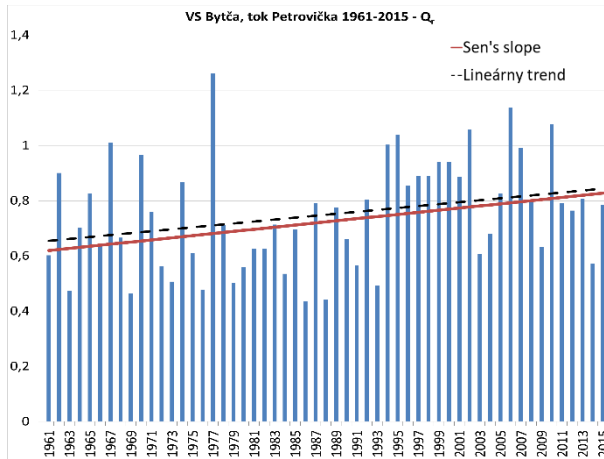
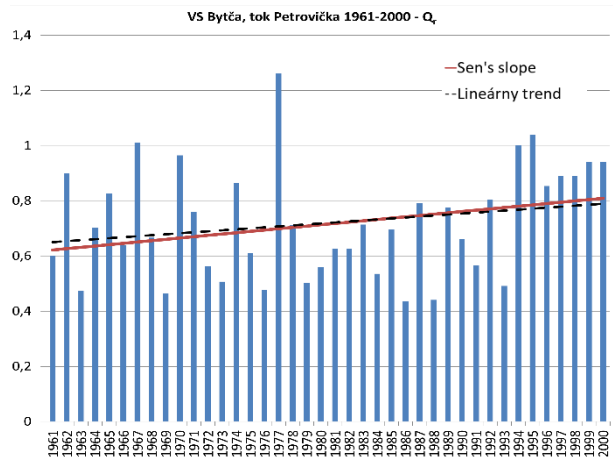
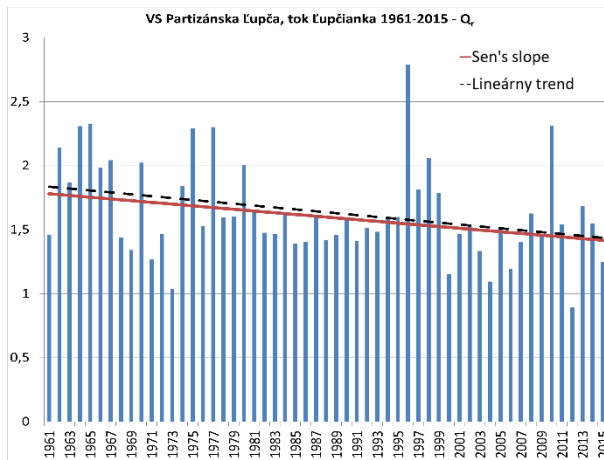
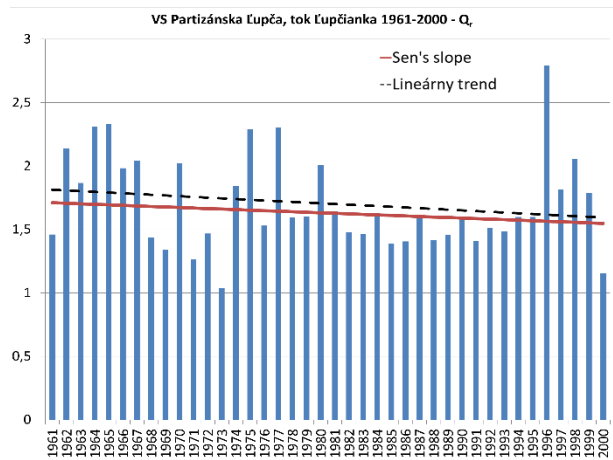
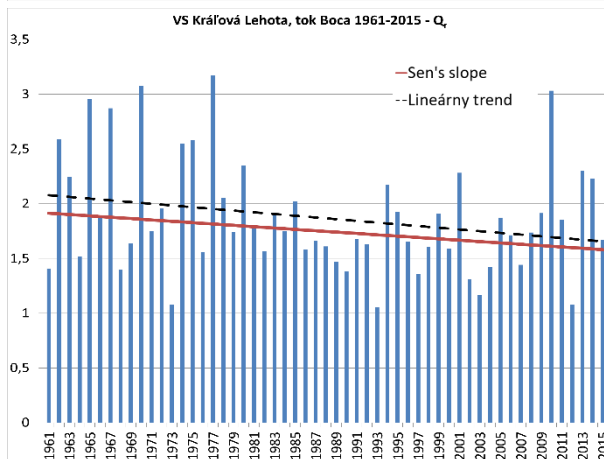
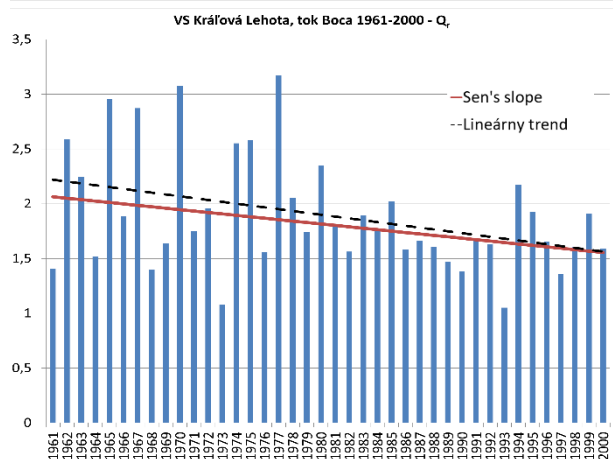
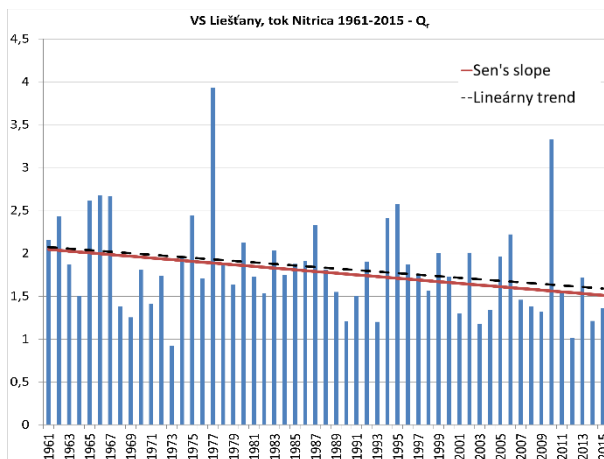
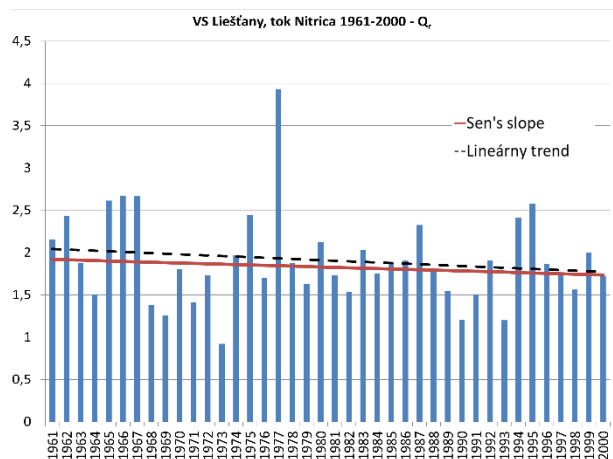
Výraznejšia rozdielnosť veľkosti sklonov bola zaznamenaná vo VS Chalmová, tok Nitra obdobie 1961–2000, lineárny trend má väčšiu strmosť oproti Sen's slope, táto je spôsobená výskytom extrémne vysokých prietokov v rokoch 1965 a 1966. Vo VS Kráľová Lehota, tok Boca sa rozdielnosť veľkosti trendov vyskytla v oboch obdobiach, rozdielnosť je spôsobená výskytom vysokých prietokov v rokoch 1965 a 1967.

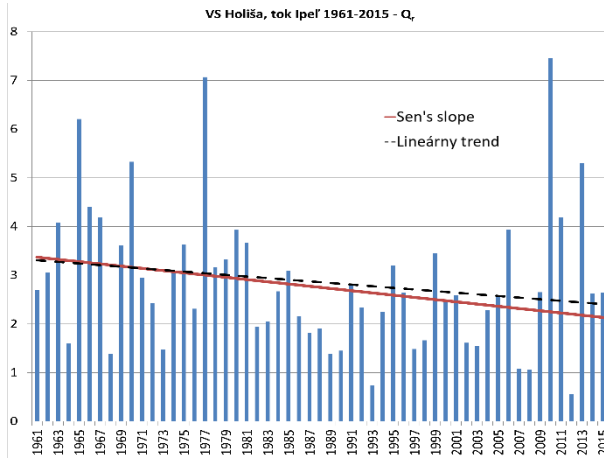
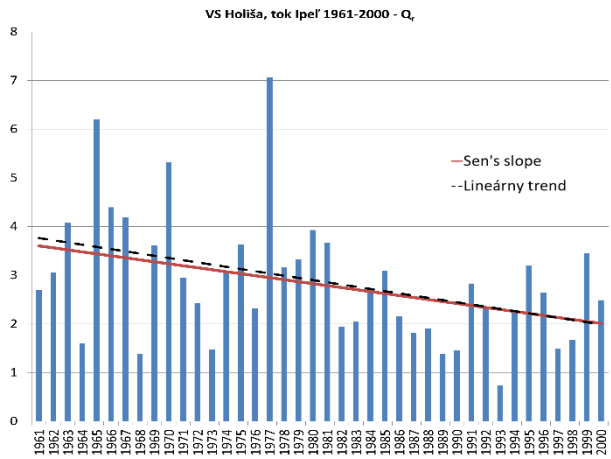
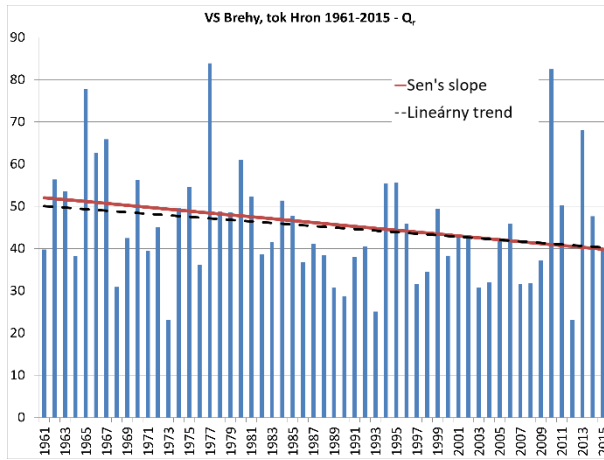
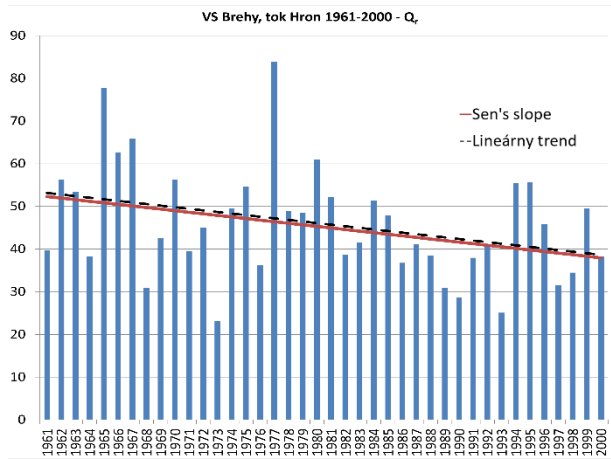
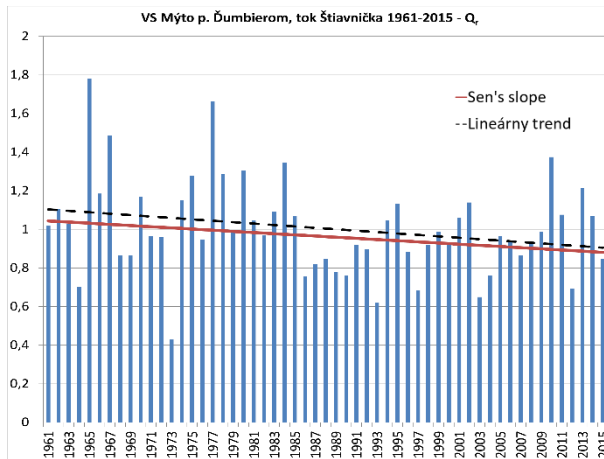
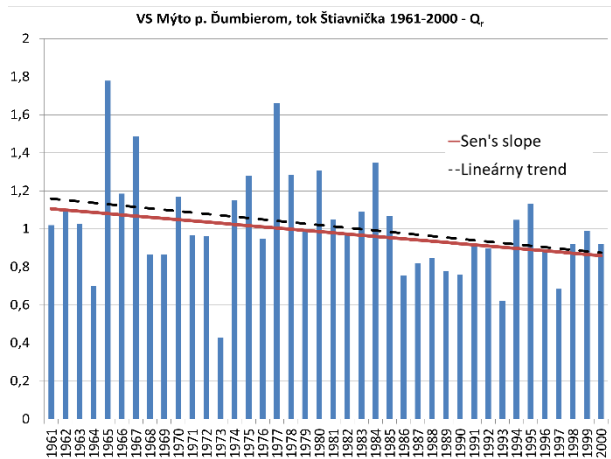
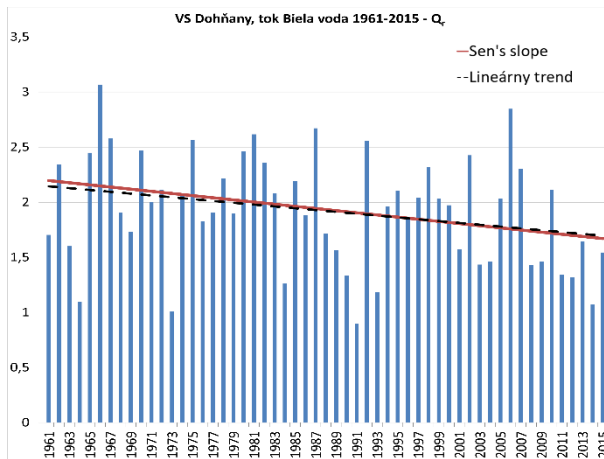
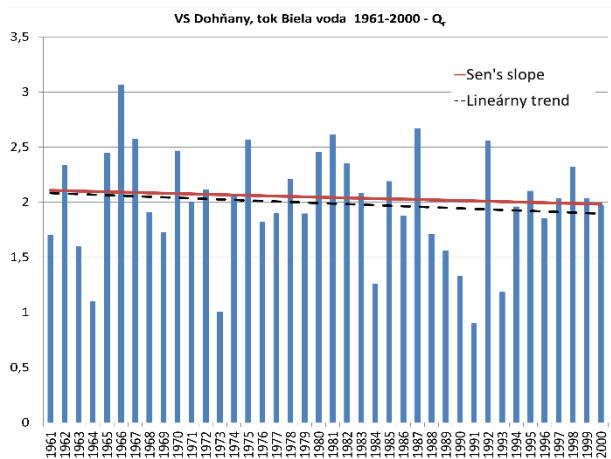
VS Stratená, tok Hnilec zaznamenala výraznejšie rozdiely v sklonoch v období 1961–2015. Tieto sú spôsobené výskytom vysokých prietokov v rokoch 2013 a 2014.

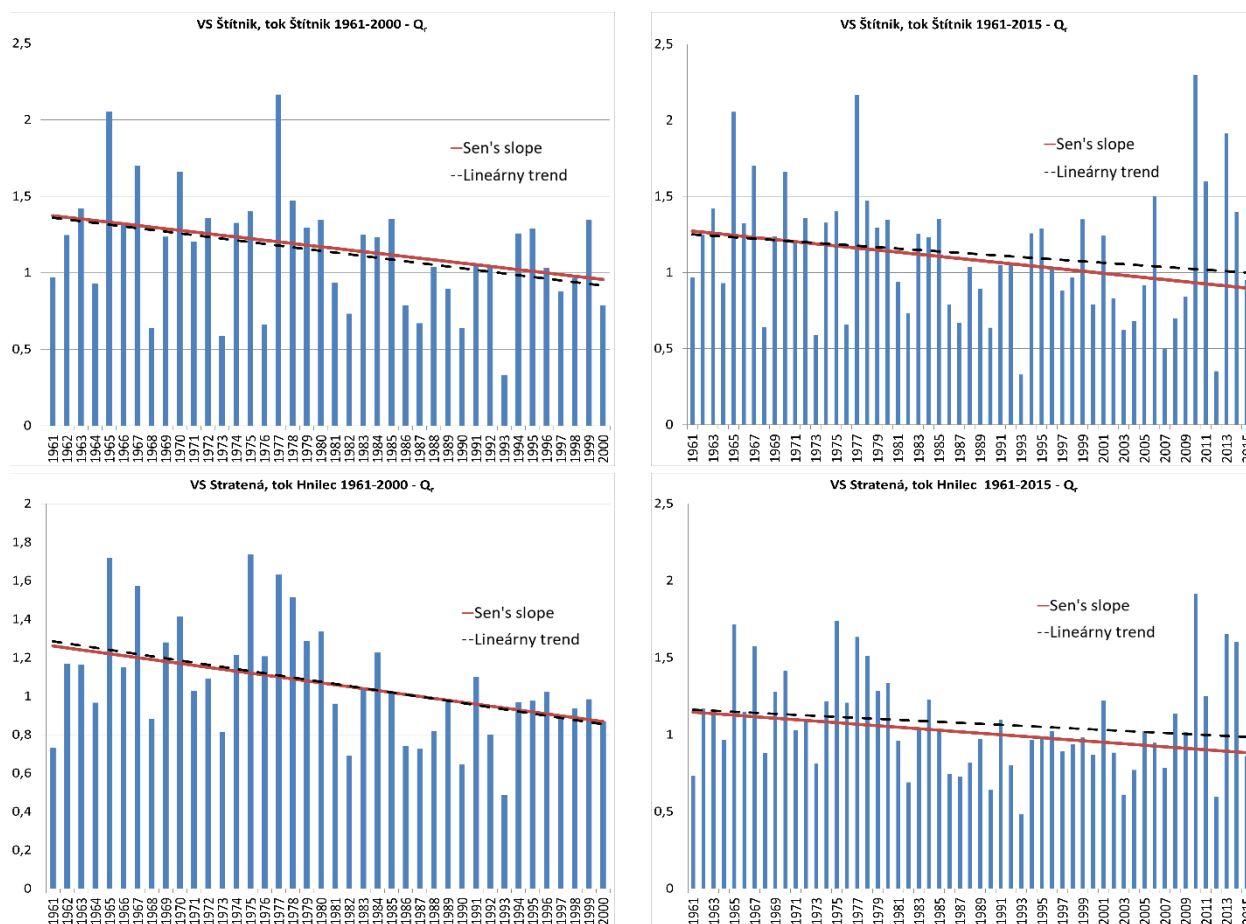
Tab.2 Zmena významnosti priemerných ročných prietokov (Q_c) v jednotlivých vodomerných staniách.

Stanica	Tok	Povodie	Významnosť na hladine 95 %		zmena významnosti
			obdobie 1961-2000	obdobie 1961-2015	
Moravský Ján	Morava	Morava	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Láb	Močiarka	Morava	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Spariská	Vydrica	Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Bratislava	Dunaj	Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Pezinok	Blatina	Malý Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Bernolákovo	Čierna voda	Malý Dunaj	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Horné Orešany	Parná	Malý Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Píla	Gidra	Malý Dunaj	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Nedožery	Nitra	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Handlová	Handlovka	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Chalmová	Nitra	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Liešťany	Nitrica	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Nadlice	Bebrava	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Nitrianska Streda	Nitra	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Vieska n. Žitavou	Žitava	Nitra	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Čierny Váh	Ipoltica	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Východná	Biely Váh	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Kráľová Lehota	Boca	Váh	klesajúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Podbanské	Belá	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Liptovský Mikuláš	Váh	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Partizánska Lupča	Lupčianka	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Podsúchá	Revúca	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lubochňa	Lubochňanka	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lokca	Bielá Orava	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Oravská Jasenica	Veselianka	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Zubrohlava	Polhoranka	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Trstená	Oravica	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Martin	Turiec	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Čadca	Kysuca	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Poluvsie	Rajčianka	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Bytča	Petrovička	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	rastúci trend	áno
Výdmá	Petrinovec	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Dohňany	Bielá voda	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	klesajúci trend	áno
Horné Srnie	Vlára	Váh	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Zlatno	Hron	Hron	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Brezno	Hron	Hron	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Hronec	Čierny Hron	Hron	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Bystrá	Bystrianka	Hron	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Mýto p. Ďumbierom	Štiavnička	Hron	klesajúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Dolná Lehota	Vajskovský potok	Hron	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Brehy	Hron	Hron	klesajúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Holiša	Ipeľ	Ipeľ	klesajúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Plášťovce	Krupinica	Ipeľ	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Plášťovce	Litava	Ipeľ	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lučenec	Krivánsky p.	Ipeľ	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Dobšiná	Dobšinský potok	Slaná	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Štítnik	Štítnik	Slaná	klesajúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Lenartovce	Slaná	Slaná	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lehota nad Rimavicou	Rimavica	Slaná	klesajúci trend	klesajúci trend	nie
Nížny Medzev	Bodva	Bodva	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Stratená	Hnilec	Hornád	klesajúci trend	nevýznamný alebo žiadny trend	áno
Jaklovce	Hnilec	Hornád	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Košické Oľšany	Torysa	Hornád	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Ždaňa	Hornád	Hornád	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Koškovce	Laborec	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Lekárovce	Uh	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Remetské Hámre	Okna	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Veľké Kapušany	Latorica	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Hanušovce nad Topľou	Topľa	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Svidník	Ondava	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Jasenovce	Oľka	Bodrog	rastúci trend	rastúci trend	nie
Streda nad Bodrogom	Bodrog	Bodrog	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Ždiar, Podspády	Javorinka	Poprad	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Poprad, Matejovce	Slavkovský potok	Poprad	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie
Chmelnica	Poprad	Poprad	nevýznamný alebo žiadny trend	nevýznamný alebo žiadny trend	nie









Obr. 2 Veľkosť trendov priemerných ročných prietokov (Q_r) vo vybraných vodomerných staniciach za obdobie 1961–2000 a 1961–2015.

Záver

Cieľom predloženej práce bolo hodnotenie vývoja trendov pre obdobie 1961–2000 z pohľadu významnosti a veľkosti vo vybraných vodomerných staniciach a ich možná zmena po pridaní 15-tich rokov. V obidvoch obdobiach prevažujú, ako v minimálnych, tak aj v priemerných ročných prietokoch nevýznamné trendy nad významnými a to napriek výskytu dvoch extrémnych rokov. Roku 2010, ktorý sa považuje za mimoriadne vodný a rok 2012, ktorý sa v pridanom období 2001–2015 považuje za mimoriadne suchý.

V minimálnych ročných prietokoch sa v čiastkových povodiach zmena významnosti prejavila hlavne v povodí Váhu. V jeho hornej časti sa trendy významne klesajúce menia na nevýznamné, čo je spôsobené početnejším výskytom vyšších minimálnych prietokov v pridanom období 2001–2015 a naopak v strednej časti povodia sa trendy menia prevažne z nevýznamných na významne klesajúce, čo spôsobuje vyšší výskyt nízkych minimálnych prietokov. V ostatných povodiach sa významnosť trendov po pridaní 15-tich rokov nezmenila vo väčšine staníc.

V priemerných ročných prietokoch sa v čiastkových povodiach zmena významnosti najvýraznejšie prejavila v povodí hornej Nitry. Trendy sa z nevýznamných menia na významne klesajúce, čo znamená väčší výskyt nižších prietokov v období 2001–2015. V ostatných povodiach sa významnosť trendov po pridaní 15-tich rokov nezmenila vo väčšine staníc.

Významnosť trendov sa v rámci celého Slovenska pridaním 15 rokov výrazne nezmenila ani v minimálnych ani v priemerných ročných prietokoch, čo naznačuje, že sa vo väčšine vybraných VS nevyskytol veľký počet nízkych alebo vysokých ročných prietokov. Veľkosť sklonu trendu, lineárneho aj Sen's slope sú si tiež veľmi podobné vo väčšine staníc (v ktorých nastala zmena významnosti), čo znamená, že sa v pridanom časovom rade 2001–2015 nevyskytujú tak extrémne nízke alebo vysoké prietoky, ktoré by spôsobili ich možnú rozdielnosť. Vo všeobecnosti trendy minimálnych aj

priemerných ročných prietokov za hodnotené obdobia možno v rámci celého územia SR považovať za vyrovnané až mierne klesajúce. Pre posúdenie a lepšie pochopenie vývoja vodnosti je okrem hydrologických charakteristík potrebné hodnotiť aj charakteristiky klimatologické, predovšetkým teplotu vzduchu a výpar.

Zdroje

Drápela K., Drápelová I., 2011: Application of Mann-Kendall test and the Sen's slope estimates for trend detection in deposition data from Bílý Kříž (Beskydy Mts., the Czech Republic) 1997–2010. *Beskydy*, 2011, 4 (2): 133–146. Mendelova univerzita v Brně. ISSN: 1803-2451.

Sen, P. K. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379–1389.

HYDROLÓGIA. Terminologický výkladový slovník. Bratislava: MŽP SR, 2002. 157 s. ISSN 1335-1564.

ADÁMYOVÁ, S. (1989). Dlhodobé ročné prietoky, ich územná a časové premenlivosť.

SANTOS, J. and PORTELA, M. (2007): Monitoring of monthly and annual series of precipitation (in Portugal), Portugal: *Department of Engineering*, p. 1–11.

World Meteorological Organization (WMO) (2008). *Guide to Hydrological Practices No 1211/168 on hydrology – from measurement to hydrological information*. Volume I., Switzerland. p. 9–10.

Návrh metodiky posúdenia povodňového rizika

Mária ŠUGAREKOVÁ, Martina ZELENÁKOVÁ

Ústav Environmentálneho inžinierstva, Stavebná fakulta Technickej univerzity v Košiciach, Slovensko, email: maria.sugarekova@tuke.sk, martina.zelenakova@tuke.sk

Úvod

Dlhoročným a stále aktuálnym problémom nie len v strednej Európe, ale na celom svete sú povodne. Táto prírodná udalosť so sebou prináša isté riziko, ktorému sa je možné vhodnou pripravenosťou do určitej miery vyhnúť, alebo aspoň čiastočne zmierniť jeho dôsledky. Celosvetovo najrozšírenejší spôsob určenia povodňového rizika je vyhotovenie máp povodňového rizika na základe určenia rizika pomocou všeobecne platnej rovnice definície rizika – riziko = príčina * dôsledok. Mnoho zahraničných, ale aj domácich autorov k výpočtu povodňového rizika využíva indexy ohrozenia, zraniteľnosti (Solín, 1998; David, 2008) ale aj expozície (Mishra, Sinha, 2020). Na základe týchto troch indexov je navrhnutá aj metodika posúdenia povodňového rizika, ktorá je opísaná v tomto príspevku. Ide však len o počiatočný návrh, ktorý bude postupne rozšírený a spracovaný v dizertačnej práci.

Metodika

Teoretické východiská

Predkladaný návrh metodiky hodnotenia povodňového rizika vychádza zo štúdie multi-indexového modelu posúdenia povodňového rizika na rieke Yangtze v Číne (Zhang a kol., 2020). Autori v tejto štúdii sa zamerali na vývoj multi-indexového koncepčného modelu na posúdenie rieky Yangtze v dvoch častiach – prvá časť sa venuje príprave indexového systému, druhá je zameraná na analýzu navrhnutej procedúry v softvéri ArcGIS. Predkladaný príspevok však opisuje návrh metodiky hodnotenia povodňového rizika založenej na prvej časti spomínanej štúdie, teda na príprave a náplni indexového systému.

Autori štúdie posúdenia povodňového rizika na rieke Yangtze navrhli multi-indexový systém zložený z troch vrstiev – objektovej, indexovej a indikátorovej vrstvy. Do objektovej vrstvy patrí hodnotená rieka Yangtze, indexová vrstva zahŕňa index hazardu (ohrozenia), index zraniteľnosti a index expozície. Posledná indikátorová vrstva obsahuje 13 indikátorov, ktoré prispievajú k povodňovému riziku. Údaje obsiahnuté v indikátorovej vrstve boli zozbierané a premietnuté v prostredí GIS, a následne pomocou hierarchickej metódy AHP boli týmto údajom pridelené hodnoty podľa relatívnej dôležitosti každého indikátora. Konečné povodňové riziko bolo vypočítané nasledujúcou rovnicou:

$$YRBFR = H * w_H + V * w_V + E * w_E \quad (1)$$

kde $YRBFR$ [–] predstavuje povodňové riziko, H predstavuje index hazardu (ohrozenia), V predstavuje index zraniteľnosti (z ang. vulnerability), E predstavuje index expozície a hodnoty w_H , w_V a w_E sú váhové hodnoty spomínaných indexov.

Indexová vrstva tejto metodiky zahŕňa spomínané indexy hazardu (ohrozenia), zraniteľnosti a expozície. Náplňou týchto indexov sú indikátory, ktoré sú rozdelené nasledovne: k indexu hazardu (ohrozenia) je priradený ukazovateľ kumulatívneho priemeru maximálnych zrážok za 3 dni. K indexu zraniteľnosti patria indikátory: údaj o absolútnom prevýšení medzi určeným bodom a hladinou mora, údaj o relatívnom prevýšení, údaj o hustote odtoku v závislosti od hustoty riečnej siete v oblasti, faktor povrchového odtoku a povrchového pokrytia územia, finančných výnosoch, finančných úsporách, úrovne zdravotnej služby a údaje o monitoringu a varovnom systéme. Indikátor expozície obsahuje 4 prvky – hustotu populácie, HDP vzťahnuté na obyvateľa, stupeň pôdnej erózie a riziko kontaminácie pôdy.

Z hľadiska dostupnosti a variácie údajov je možné multi-indexový koncepčný model aplikovať na akékoľvek pole pôsobnosti, a tiež je možné do jednotlivých vrstiev dosadiť rôzne vstupné rentabilné hodnoty. V nasledujúcich kapitolách je uvedený návrh a kolekcia údajov, ktoré budú použité na hodnotenie povodňového rizika v súlade s aktuálne platnou legislatívou Slovenskej republiky.

Zber údajov

Zo spomínanej štúdie multi-indexového koncepčného modelu je pre navrhovanú metodiku posúdenia povodňového rizika na Slovensku prevzatý práve multi-indexový systém, do ktorého budú priradené prvky s dostatočnou výpovednou hodnotou. Keďže návrh a aplikácia tejto metodiky je výskumným cieľom dizertačnej práce, predkladaný príspevok opisuje len jednu časť, a to časť zameranú na hodnotenie povodňového rizika v sledovanom období.

Údaje, ktoré budú v spomínanej metodike použité sú verejne dostupné online na webovej stránke Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky. Jedným z cieľov navrhovanej metodiky je vytvorenie jednoduchej a ľahko prístupnej možnosti na určenie miery povodňového rizika, a práve preto je založená na ľahko prístupných vstupných údajoch.

Výsledky

Vhodnou transformáciou spomínanej metodiky je navrhnutý nový spôsob posúdenia povodňového rizika prostredníctvom dostupných údajov prevzatých zo Správ o priebehu a následkoch povodní na území SR (Min ŽP SR), ktoré budú v ďalšej časti spracovania zároveň slúžiť aj ako vstupné údaje na vyhodnocovanie povodňových škôd.

Pôvodná metodika obsahuje tri vrstvy – objektovú, indexovú a indikátorovú. Objektová vrstva obsahovala údaje o hodnotiacej rieke, teda o rieke Yangtze. V súlade s dostupnými dátami, objektová vrstva sa v navrhovanej metodike bude vzťahovať buď na riešené povodie, alebo na celú Slovenskú republiku. Keďže Správy o priebehu a následkoch povodní na území SR obsahujú informácie o povodniach v rámci povodí, aj navrhovaná metodika uvažuje s týmto spôsobom hodnotenia. Náplňou objektivej vrstvy bude teda riešené povodie, jedno alebo viacero, prípadne všetky.

Indexová vrstva zostáva v oboch prípadoch rovnaká. Indexy ohrozenia, zraniteľnosti a expozície sa nemenia, rozdiel bude viditeľný v indikátorovej vrstve, a teda v náplni indexovej vrstvy. V nasledujúcich podkapitolách sú bližšie popísané indexy spolu s indikátormi, ktoré tvoria obsah spomínaných parametrov.

Ohrozenie

Obsahom indexu ohrozenia sú nasledovné indikátory: mesačný úhrn zrážok, počet vyhlásení III. stupňa povodňovej aktivity a rozsah zaplaveného územia. Indexu ohrozenia je priradená váhová hodnota 30, ktorá je rovnomerne rozdelená medzi spomínané tri indikátory. Váha, ktorá sú pri každom indikátore k dispozícii je násobená získanou hodnotou zo Správ o priebehu a následkoch povodní na území SR. Tabuľka 1 zobrazuje pridelenie váhy k indikátorom indexu ohrozenia.

Tabuľka 1 Pridelené váhy k indikátorom indexu ohrozenia

OHROZENIE			
1	Mesačný úhrn zrážok	10	
2	Počet vyhlásení III. SPA	10	
3	Rozsah zaplaveného územia	intravilán	5
		poľnohospodárska pôda	3
		lesná pôda	2

Z dostupných údajov budú následne k jednotlivým indexom pridelené hodnoty. Tieto hodnoty budú násobené váhou v_{io} , ktorá je zobrazená v štvrtom stĺpci Tabuľky 1. Suma váh predstavuje hodnotu 30, ktorá je váhou indexu ohrozenia.

Zraniteľnosť

Indexu zraniteľnosti je priradená váhová hodnota 40. Tabuľka 2 popisuje priradenie indikátorov k indexu zraniteľnosti, a tiež priradenie váhového ohodnotenia.

Tabuľka 1 Váhové hodnoty indikátorov indexu zraniteľnosti

ZRANITEĽNOSŤ				
1	Postihnutí obyvatelia	osoby bez prístrešia	5	
		evakuované a zachránené osoby	5	
		zranené osoby	5	
		usmrtené a nezvestné osoby	5	
2	Chránené krajinné oblasti		10	
3	Stav objektov protipovodňovej ochrany		10	

Rovnako ako v predchádzajúcom prípade, aj do indexu zraniteľnosti budú pri hodnotení priradené údaje zo Správ o priebehu a následkoch povodní na území SR. Tieto hodnoty budú násobené váhou v_{iz} , suma váh predstavuje hodnotu indexu zraniteľnosti 40.

Expozícia

Posledným indexom je index expozície, ktorého váha predstavuje hodnotu 30. Táto váha je rovnomerne rozdelená medzi 5 indikátorov uvedených v Tabuľke 3.

Tabuľka 2 Priradené indikátorové váhy indexu expozície

EXPOZÍCIA				
1	Zaplavené budovy	bytové domy	2	
		rodinné domy	2	
		ostatné budovy na bývanie	2	
2	Zaplavené nebytové budovy	priemyselné budovy a sklady, nádrže a silá	1,2	
		poľnohospodárske budovy a sklady, stajne a maštale	1,2	
		kultúrne pamiatky (nebytové)	1,2	
		nemocnice, zdravotnícke a sociálne zariadenia	1,2	
		ostatné nebytové budovy	1,2	
3	Poškodené inžinierske siete	železničné, lanové a iné dráhy	0,5	
		diaľnice, rýchlostné cesty, cesty I. triedy, mosty	0,5	
		cesty II. a III. triedy, chodníky	0,5	
		miestne, účelové a lesné dopravné komunikácie	0,5	
		odvodňovací kanál, kanalizácia, priepusty	0,5	

		vodné zdroje, úpravy vody, ČOV	0,5	
		diaľkové ropovody a plynovody	0,5	
		miestne rozvody plynu	0,5	
		diaľkové a miestne rozvody vody a pary	0,5	
		diaľkové a miestne rozvody elektriny	0,5	
		lesné sklady	0,5	
		ostatné inžinierske siete	0,5	
4	Počet poškodených zvierat	evakuované hospodárske zvieratá, hydina a drobné zvieratá	3	
		uhynuté hospodárske zvieratá, hydina a drobné zvieratá	3	
5	Ďalšie povodňové škody	hmotnosť evakuovaného materiálu	1,5	
		zaplavené dopravné prostriedky	1,5	
		odplavené drevo	1,5	
		podmyté oporné múry	1,5	

Suma váh predstavuje hodnotu 30, ktorá je priradená indexu expozície. Index expozície obsahuje 5 indikátorov, ktoré sú rozdelené medzi ďalšie sub-indikátory. Váha indikátorov v_{iE} bude v ďalšom postupe násobená priradenou hodnotou z dostupných dát.

Náplň hodnôt indikátorov

Hodnoty indexov budú získané násobením váhy v_{ij} a hodnotou získanou priamo zo Správy o priebehu a následkoch povodní na území SR. Keďže niektoré zo vstupných hodnôt sa vzťahujú na mernú jednotku, napr. mesačný úhrn zrážok [mm], rozsah zaplaveného územia [ha], chránené krajinné oblasti [ha], poškodené inžinierske siete [m], tieto hodnoty je potrebné vhodnými matematickými funkciami previesť na referenčné hodnoty.

Z tohto dôvodu je navrhovaný nasledovný postup. Pre každý indikátor bude vypočítaný aritmetický priemer z relevantných údajov za obdobie od roku 2001 do roku 2010. Vypočítaná hodnota bude slúžiť ako referenčná hodnota, pomocou ktorej sa budú prepočítavať hodnoty indikátorov na hodnotu príslušného indikátora. Navrhovaným spôsobom sa dosiahnu referenčné hodnoty pre všetky indikátory, ktoré sa vzťahujú na mernú jednotku. Pomocou získaných aritmetických priemerov za obdobie 10 rokov bude možné posúdiť povodňové riziko s prihliadnutím na východziu metodiku.

Miera konečného povodňového rizika bude vyjadrená pomocou rozdelenie získaných hodnôt za celé riešené obdobie. Referenčné hodnoty budú získané z aritmetického priemeru hodnôt indikátorov za obdobie 10 rokov od roku 2001 do roku 2010, a miera povodňového rizika bude získaná z údajov za obdobie nasledujúcich 10 rokov, tzn. Od roku 2011 do roku 2021. Prvým krokom bude teda vyčíslenie indexov za celé riešené obdobie, a druhý krok bude určenie hodnotiacej škály rizika na základe získaných výsledkov.

Záver

Výpočet a určenie povodňového rizika pomocou navrhovanej metodiky môže byť uskutočnený na rozličných úrovniach – či už sa bude posudzovať celé územie alebo len povodie istej rieky. Súčasná doba poskytuje veľmi rýchle a jednoduché riešenia na všetky bežné problémy. Jedným z cieľov metodiky hodnotenia povodňového rizika je práve návrh rýchleho a jednoduchého posúdenia a určenia rizika z verejne dostupných údajov. Zámerom predkladaného návrhu je pomocou dostupných údajov navrhnúť aj metodiku hodnotenia povodňových škôd, ktoré veľmi úzko súvisia s povodňovým rizikom. Keďže téma povodňového rizika a povodňových škôd je celosvetovo aktuálna, navrhovaná metodika môže priniesť výsledky na riešenie tohto závažného problému, či už vo forme protipovodňových opatrení alebo protipovodňového manažmentu. Z výsledkov rizika je možné pomocou vhodného

softvéru vyhotovit' mapy povodňového rizika, ktoré môžu byť spracované na úrovni indexov či dokonca indikátorov, ktoré sú súčasťou predkladanej metodiky. Téma povodní má veľmi široký záber, každá krajina má svoje hodnotiace špecifiká. Navrhovaná metodika posúdenia povodňových škôd preberá výhodu flexibility indikátorovej vrstvy.

Pod'akovanie

Tento článok vznikol vďaka Slovenskej agentúre na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu SK-PT18-0008 a SL-PL-18-0033, a tiež vďaka podpore Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky v rámci projektu VEGA 1/0308/20 Zmierňovanie hydrologických rizík – povodne a suchá – skúmaním extrémnych hydroklimatických javov v povodiach.

Zdroje

David V. (2008) Metodika stanovení povodňového rizika v malých povodiach. Sympozium GIS Ostrava 2008. Sborník z mezinárodního symposia konaného 27.–30. 1. 2008 v Ostravě. VŠB Technická univerzita Ostrava.

Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky (dostupné 29.3.2021) Správa o priebehu a následkoch povodní na území Slovenskej Republiky (online zdroj).

Mishra K, Sinha R. (2020) Flood risk assessment in the Kosi megafan using multi-criteria decision analysis: A hydro-geomorphic approach, In: *Geomorphology*, číslo 350, 106861 (článok odborného časopisu.)

Solín E (1998) Hodnotenie povodňového rizika – súčasný stav výskumu, In: *Geologický časopis*, vol. 50, no.1, pp 35–57 (article in a professional journal).

Šimák L. (2006) Manažment rizík, Žilinská univerzita v Žiline.

Zhang D. et al. (2020) A GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China, In: *Environmental Impact Assessment Review*, číslo 83. 106397 (article in a professional journal).

Režim průtoků na vybraných povodích ČR ve vztahu na průběh hladin podzemních vod v mělkých vrtech

Radovan TYL, Pavel KUKLA

Český hydrometeorologický ústav, Oddělení povrchových vod, Praha, Česká republika, email: radovan.tyl@chmi.cz, pavel.kukla@chmi.cz

Úvod

Přírodě blízká opatření, zadržování vody v krajině, obnovování vodních tůní a rybníků pro podporu přirozené retence vody, to jsou témata rezonující současnou odbornou i politickou scénou. Rybníky, malé vodní nádrže a stojaté vodní plochy obecně mají vliv na celkový krajinný ráz a odtokové poměry příslušného vodního toku.

Šestileté období sucha v letech 2014–2019 ukázalo, že se zásobami vody je třeba dobře hospodařit. Přítomnost malých vodních nádrží v povodí může zásoby podzemní vody výrazně ovlivňovat. V pozitivním směru objem vody v rybníku dotuje horninové prostředí v okolí nádrže a přispívá tak k vyšší hladině podzemní vody v okolí. V negativním ohledu, zejména v letních měsících, dochází vlivem vysokých teplot ke zvýšení výparu z vodní hladiny a zmenšení povrchového odtoku z povodí v porovnání s chladnou polovinou roku.

Na povodích Žehrovky, Lomnice a Skalice byla zpracována klimatická a hydrologická data s cílem analyzovat a vyhodnotit interakce mezi povrchovou a podzemní vodou a pokusit se získat povědomí o tom, jak k režimu odtoku přispívají malé vodní nádrže v povodí. Výsledky vyhodnocení přináší následující článek.

Monitoring prvků hydrologické bilance na vybraných lokalitách

Analýza interakce povrchové a podzemní vody ve vybraných povodích Žehrovky, Lomnice a Skalice byla zpracována jako součást grantového projektu technologické agentury ČR TITSMZP809 „Vliv malých vodních nádrží na hladinu podzemních vod a celkovou hydrologickou bilanci s důrazem na suchá období“, který je řešený ve spolupráci Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze, Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka a Českého hydrometeorologického ústavu. Projekt se zabývá komplexním monitoringem, vyhodnocením a modelováním prvků hydrologické bilance na vybraných lokalitách s přítomností malé vodní nádrže, a vyhodnocením vlivu této nádrže na hladinu podzemní vody (podrobně sledované lokality jsou rybník Mrštín na Víkavě poblíž Mladé Boleslavi, rybník Vavřinec na Výrovce nedaleko Uhlířských Janovic na Kutnohorsku a nově vybudovaný rybník v lokalitě Mostišť na Chomelském potoce).

V povodí Žehrovky zastupuje malou vodní nádrž rybník Žabakor, v povodí Lomnice a Skalice najdeme celou řadu rybníků, případně rybníčních soustav. V povodí Lomnice je plošné zastoupení vodních ploch trojnásobné v porovnání se sousedním povodím Skalice. Ve výše zmíněných povodích lze předpokládat ovlivnění odtokového režimu povrchové vody právě přítomností vodních ploch v povodí. Pro účely vyhodnocení byla využita data o průtocích a hladinách podzemních vod z pozorovacích objektů ČHMÚ.

Použitá data

Pro výpočet denních hodnot srážek, teploty vzduchu a potenciální evapotranspirace (PET) na povodí byla použita rastrová data odvozená interpolací z bodových hodnot těchto veličin uložených v klimatické databázi ČHMÚ. Z denních hodnot byly dopočítány měsíční úhrny (v případě srážek a PET), resp. měsíční průměry (v případě teplot vzduchu).

Výpočet potenciální a skutečné evapotranspirace probíhá v ČHMÚ na pobočce Brno prostřednictvím agrometeorologického modelu AVISO (Agrometeorologická výpočetní a informační soustava). Vstupem do modelu jsou meteorologická data pro soubor 198 automatických klimatologických stanic staniční sítě ČHMÚ, výstupem jsou modelovaná data agrometeorologických charakteristik v bodové síti (Trnka a kol., 2017).

Dále byla použita data průměrných denních průtoků z vodoměrných stanic Březina (ID 092800) na Žehrovce, Dolní Ostrovec (152000) na Lomnici a Varvažov (153000) na Skalici. Stanice Březina pozoruje vodní stavy od roku 1974 do současnosti, stanice Dolní Ostrovec a Varvažov pozorují vodní stavy shodně od roku 1931 do současnosti. Plocha povodí k profilu stanice Březina je $A = 90,28 \text{ km}^2$, plocha povodí stanice Dolní Ostrovec činí $A = 391,35 \text{ km}^2$ a plocha stanice Varvažov je $A = 367,86 \text{ km}^2$. Stanice jsou zobrazeny na obrázku 1.

Data z mělkého vrtu VP0644 (Žďár) nebyla pro rok 2013 k dispozici, v povodí Žehrovky byla proto pro vzájemné srovnání použita data z vrtů VP0642 (Žďár) a VP0643 (Příhrazy). V povodí Lomnice zaznamenává hladiny podzemní vody mělký vrt VP1127 (Buzice), v povodí Skalice se nachází mělký vrt VP1131 (Čimelice).

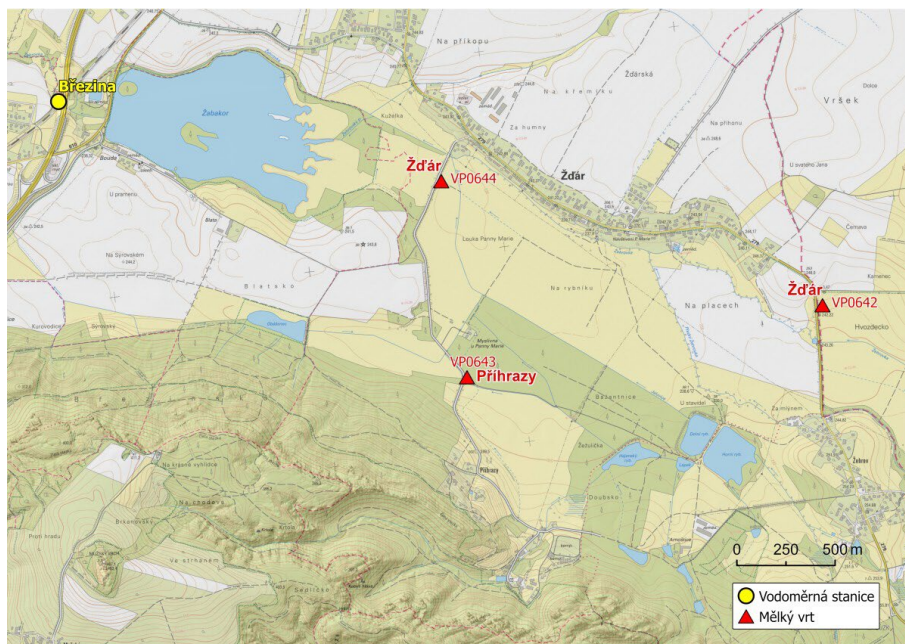
Jak je patrné ze situace na obrázku 2, vodoměrná stanice Březina leží u křížení silničního mostu a železnice pod rybníkem Žabakor, vrty Žďár a Příhrazy najdeme nad rybníkem, ale v údolní nivě Žehrovky. Rybník Žabakor má boční napájení, rozdělovací objekt je v úrovni vrtu VP0644. V případě povodí Lomnice a Skalice se mělké vrty nenacházejí v úplné blízkosti vodoměrné stanice, ale jsou opět situovány v údolní nivě v bezprostřední blízkosti daného toku.

Analýza M -denních průtoků byla provedena za referenční období 1981–2010. Počet dnů, kdy byl dosažen nebo podkročen limitní průtok Q_{355d} , byl stanoven za celé období pozorování dané stanice. Komplexní porovnání klimatických veličin, průtoků a hladin podzemní vody bylo provedeno za ucelené období 2013–2020, pro ilustraci jsou dále v příspěvku zobrazeny vybrané grafy s hodnotami pro velmi vlhký rok 2013 a naopak suchý rok 2019.

Situace s lokalizací stanic a vrtů přibližují mapy na obrázku 2 a 3.



Obr. 1 Zleva vodoměrná stanice Březina (Žehrovka), Dolní Ostrovec (Lomnice) a Varvažov (Skalice)



Obr. 2 Situace umístění posuzovaných mělkých vrtů a vodoměrné stanice Březina na Žehrovice (podkladová mapa ČUZK)



Obr. 3 Situace umístění posuzovaných mělkých vrtů a vodoměrných stanic Dolní Ostrovec (Lomnice) a Varvažov (Skalice) (podkladová mapa ČUZK)

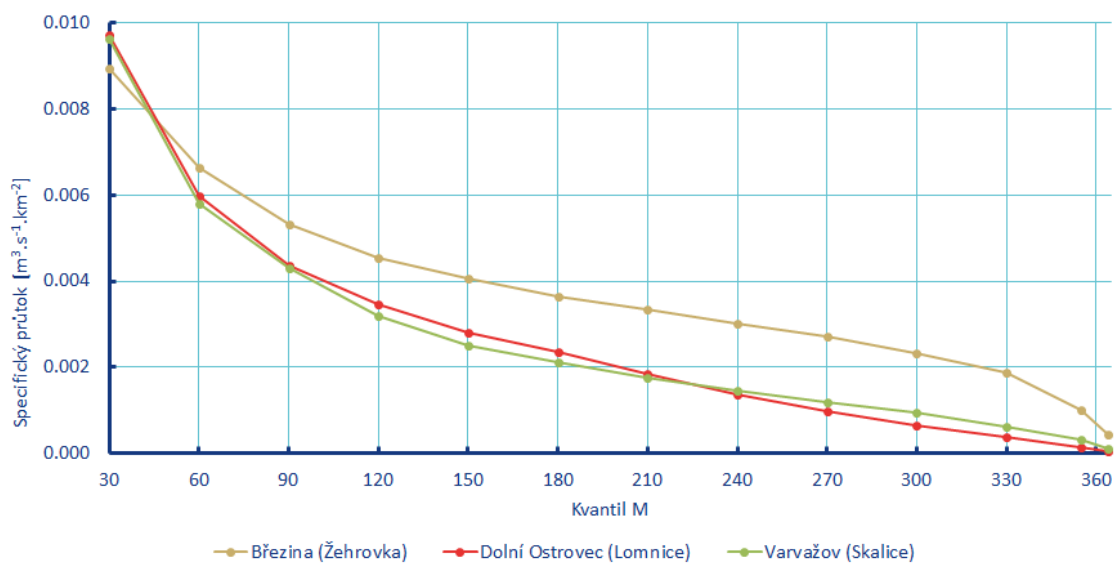
Analýza odtokových poměrů

Odtokové poměry lze hodnotit z mnoha pohledů. V tomto příspěvku byly použity hodnoty specifických *M*-denních průtoků pro vzájemné porovnání odtokového režimu při běžných a malých průtocích. Jako

druhý ukazatel hydrologického sucha byl vypočten počet dnů, kdy došlo k dosažení či podkročení hodnoty Q_{355d} .

Porovnání M-denních průtoků

Odtokové poměry charakterizují M -denní průtoky. Jsou to hodnoty průtoků, které jsou v daném profilu dosaženy nebo překročeny M dní v roce. Specifický M -denní průtok je následně průtok vztažený na jednotku plochy povodí. Z obrázku 4 je patrné, že M -denní specifické průtoky se v závislosti na fyzikogeografických poměrech a přítomnosti vodních ploch v povodí výrazně liší mezi jednotlivými vodoměrnými stanicemi. Výrazně větší hodnoty specifických M -denních průtoků v povodí Žehrovky jsou primárně dány hydrogeologickými poměry povodí, které náleží do hydrogeologického rajonu Jizerská křída levobřežní, kde převažujícími horninami jsou sedimenty svrchní křída (pískovce a slepence). Povodí Lomnice a Skalice náleží do hydrogeologického rajonu Krystalinikum v povodí Střední Vltavy, kde převažují horniny krystalinika, proterozoika a paleozoika (granitoidy). Specifické M -denní průtoky jsou od 30denního do 210denního kvantilu větší v povodí Lomnice než v povodí Skalice. Od hodnoty 240denního kvantilu až k hodnotě 364denního kvantilu čáry překročení průměrných denních průtoků jsou větší specifické M -denní průtoky v povodí Skalice. To lze interpretovat tak, že přestože mají obě zmiňovaná povodí shodné hydrogeologické poměry a téměř stejně vysoké dlouhodobé průměrné roční výšky srážek, je v suchých obdobích povrchový odtok větší v povodí Skalice, ve vodnějších obdobích odtéká více vody z povodí Lomnice. V suchých obdobích je v povodí Lomnice, kde je větší podíl vodních ploch na ploše povodí, větší výpar z vodní hladiny a celková evapotranspirace. Do povrchového odtoku v povodí Lomnice se dostane menší objem vody, než v povodí Skalice, kde je menší podíl vodních ploch a povrchový odtok je větší.



Obr. 4 M -denní specifické průtoky ve stanicích Březina (Žehrovka), Dolní Ostrovec (Lomnice) a Varvažov (Skalice)

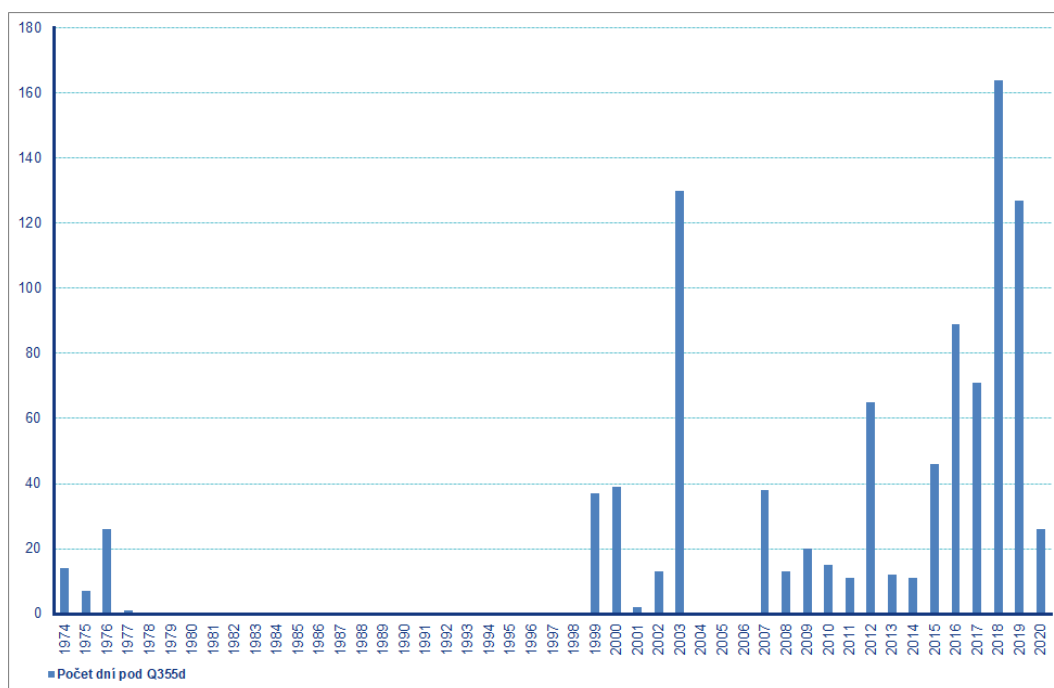
Specifické M -denní průtoky ve stanici Březina na Žehrovce vycházejí téměř ve všech kvantilech čáry překročení M -denních průtoků větší než pro povodí Lomnice a Skalice. Povrchový odtok vztažený k ploše povodí Žehrovky je výrazně větší a zároveň vyrovnanější (méně rozkolísaný v nižších kvantilech), přestože dlouhodobá průměrná výška srážek v povodí Žehrovky je jen cca o 10 % vyšší.

Počet dnů s dosažením nebo podkročením Q_{355d}

Jako vhodná hydrologická charakteristika pro posouzení délky trvání minimálních průtoků může sloužit počet dnů, kdy byl dosažen nebo podkročen 355denní průtok (Q_{355d}).

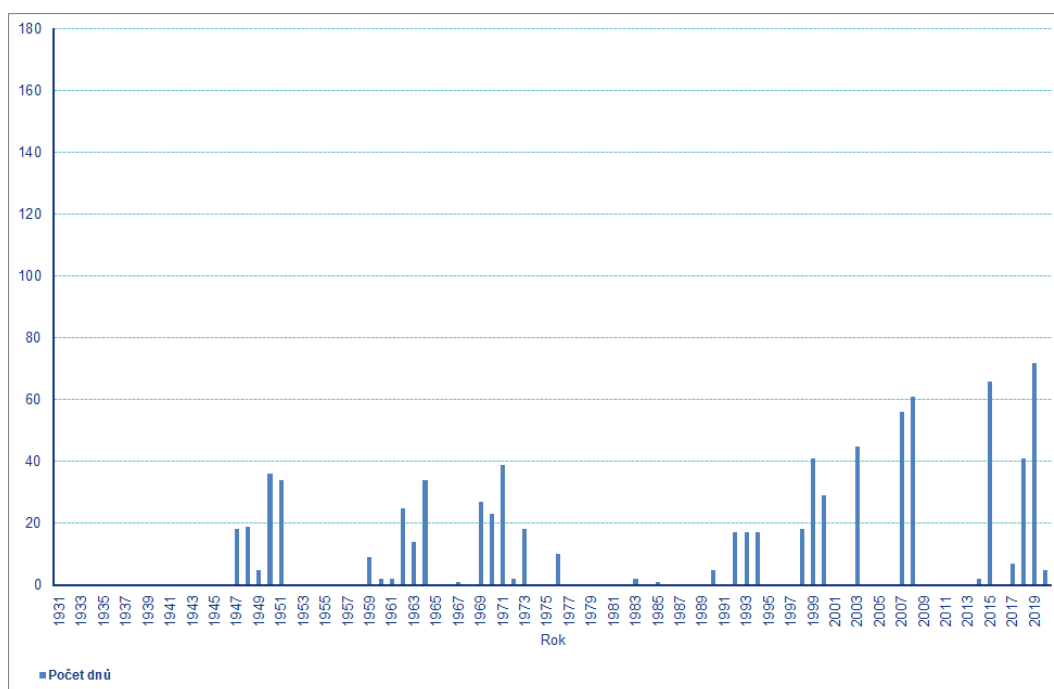
V grafu na obrázku 5 je zobrazen počet dnů v jednotlivých letech pozorování, kdy byl dosažen nebo podkročen 355denní průtok odvozený z referenčního období 1981–2010 ve vodoměrné stanici Březina

na Žehrovce. O významnosti a velikosti sucha vypovídá počet dnů s malými průtoky. Více jak 100 dnů během jednoho roku, kdy průtok nepřekročil hodnotu 355denního průtoků, bylo vyhodnoceno v letech 2003, 2018 a 2019.



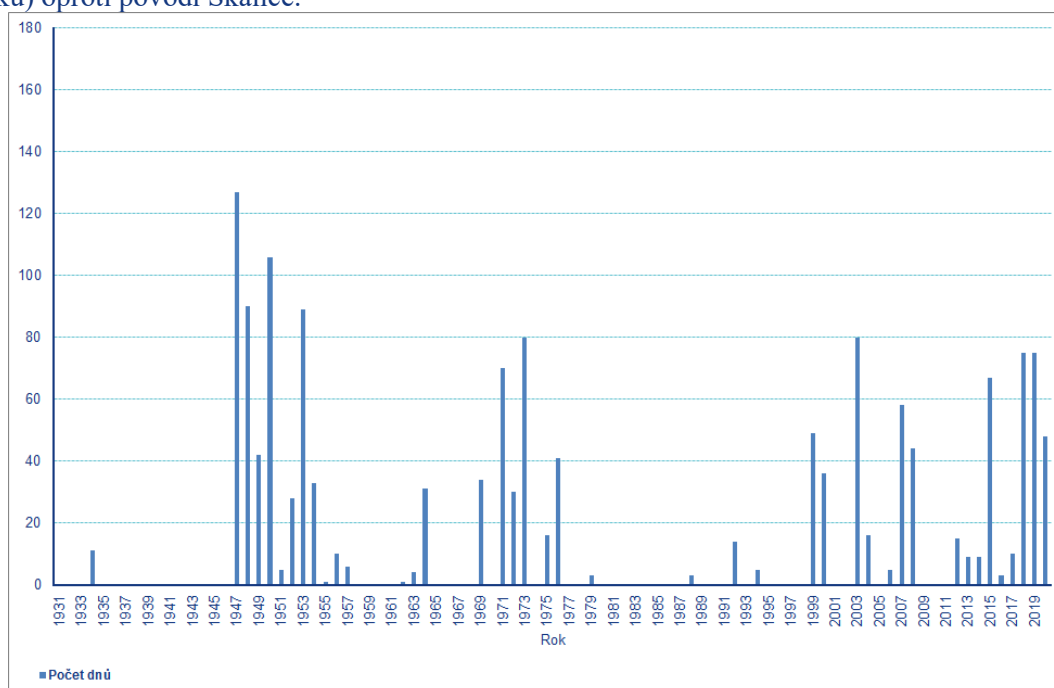
Obr. 5 Počet dnů dosažení nebo podkročení průtoků Q_{355d} v jednotlivých letech ve vodoměrné stanici Březina (Žehrovka)

Na obrázku 6 je zobrazen počet dnů v jednotlivých letech pozorování, kdy byl dosažen nebo podkročen 355denní průtok odvozený z referenčního období 1981–2010 ve vodoměrné stanici Dolní Ostrovec na Lomnici. Na první pohled je zřejmé, že po roce 2000 byly zaznamenány nejvyšší počty dní během roku, kdy byly dosaženy tyto minimální průtoky. Více jak 50 dní trvání minimálních průtoků bylo dosaženo v letech 2007, 2008, 2015 a 2019, kdy byl počet těchto dnů rekordní a činil 72. Dále je z grafu patrné, že vyšší počty dnů těchto minimálních průtoků jsou dosahovány ve víceletých obdobích suchých let následujících po sobě. Vysvětlení těchto jevů souvisí s výrazným poklesem zásob podzemních vod a zmenšeným základním odtokem v období víceletých suchých period a také se zvýšenou evaporací a celkovou evapotranspirací během nadnormálně teplých letních měsíců. Zvýšený výpar z vodních ploch i z krajiny způsobuje nárůst počtu dnů s minimálními průtoky během roku.



Obr. 6 Počet dnů dosažení nebo podkročení průtoku Q_{355d} v jednotlivých letech ve vodoměrné stanici Dolní Ostrovec (Lomnice)

Obrázek 7 obsahuje graf se stejnou charakteristikou pro vodoměrnou stanici Varvažov na Skalici. V tomto profilu bylo během celé doby pozorování zaznamenáno více let, kdy byl dosažen nebo podkročen 355denní průtok (opět odvozený z referenčního období 1981–2010) než v sousedním povodí Lomnice. A také roční počty dnů s těmito minimálními průtoky dosahují vyšších hodnot. Počet roků, kdy roční suma dní této charakteristiky překročila více jak 60 hodnot, činí 10. Ve stanici Dolní Ostrovec na Lomnici toto bylo zaznamenáno pouze ve 3 letech pozorování. Četnost podkročení 355denního průtoku svědčí o větší rozkolísanosti minimálních průtoků v povodí Lomnice (s větším podílem rybníků) oproti povodí Skalice.



Obr. 7 Počet dnů dosažení nebo podkročení průtoku Q_{355d} v jednotlivých letech ve vodoměrné stanici Varvažov (Skalice)

Průběh hladin v mělkých vrtech

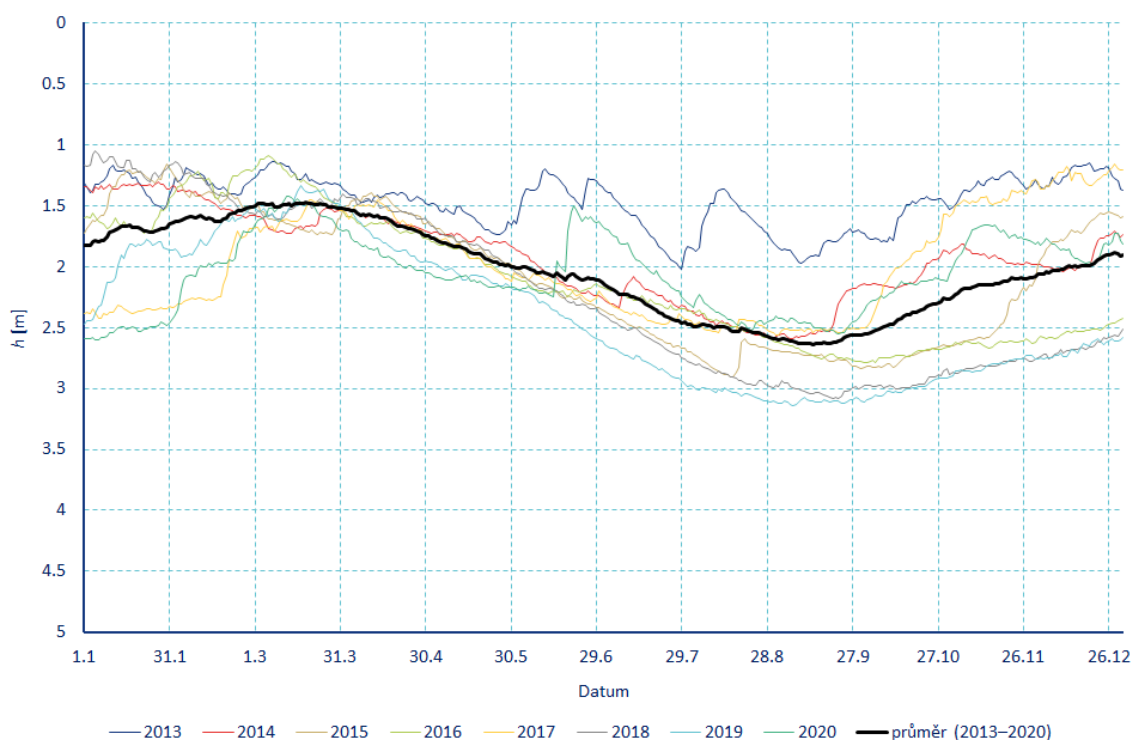
Jak se v jednotlivých letech období 2013–2020 vyvíjel průběh hladin ve sledovaných mělkých vrtech ilustrují grafy na obrázku 8 až 11. Zatímco vrty v povodí Žehrovky, jak už bylo uvedeno, se nacházejí v hydrogeologickém rajonu Bazálního křídového kolektoru, povodí Lomnice a Skalice náleží do Krystalinika jižních a jihozápadních Čech. Hydrogeologickým podmínkám odpovídají i rozdílné průběhy hladin ve vrtech. Tlustší černou čarou je v grafu vyznačen průměr za sledované časové období.

Na první pohled je patrný pravidelný roční chod hladiny ve všech sledovaných vrtech. K největšímu doplnění zásob podzemních vod a tedy k nejvyššímu nárůstu stavu hladin podzemních vod dochází během zimní oblevy v lednu a během jarního tání sněhových zásob v dubnu. Nejnižší průběh hladiny podzemní vody se projevuje pozdě v létě a na podzim.

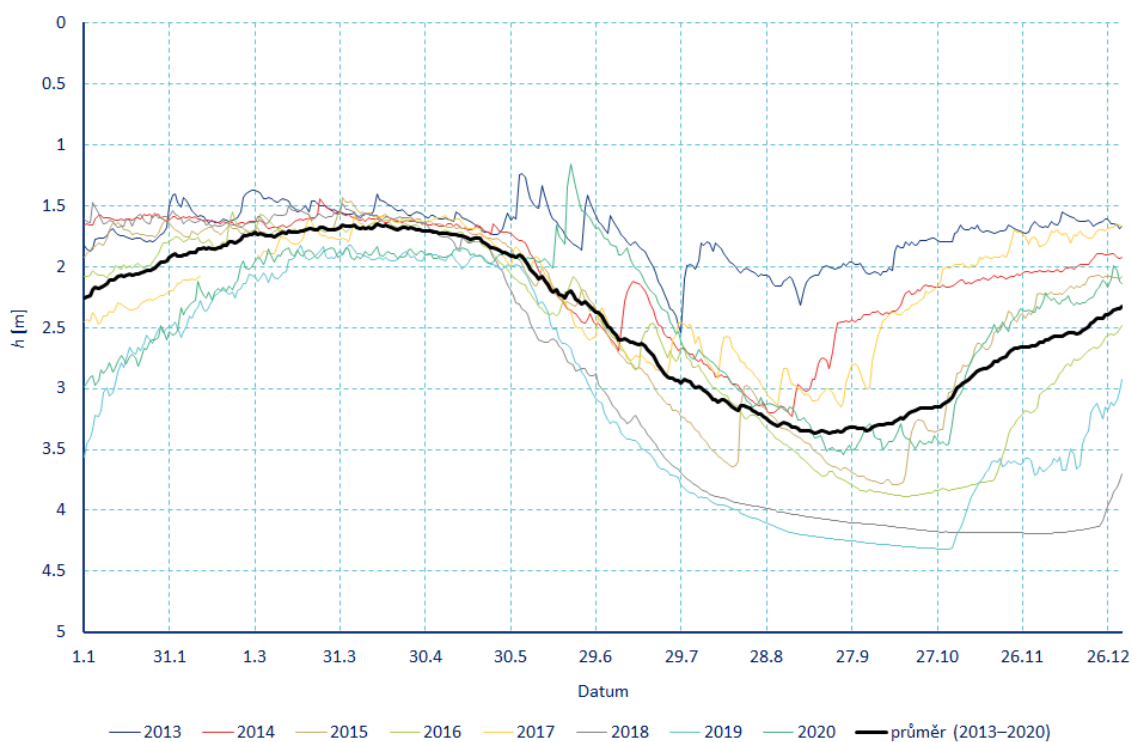
Rozdílné jsou průběhy hladin jak mezi dvěma vzájemně porovnávanými vrty v povodí Žehrovky, tak i při srovnání s hladinami ve vrtech v povodí Lomnice a Skalice. Hladiny z vrtu VP0642 (Žďár), nacházejícího se přímo u toku Žehrovky, vykazují mnohem menší rozkolísanost (v rozmezí od 1 m na jaře po cca 3 m na podzim, tj. amplituda 2 metry) než hladiny ve vrtu VP0643 (Příhrazy), který je od povrchového toku mnohem dále, a kde hladina na podzim klesá v suchých letech až na úroveň 4,25 m a amplituda činí o metr více, tj. 3 m. Vrt blíže k toku vykazuje mnohem větší citlivost a propojenost s povrchovou vodou v toku Žehrovky než vrt vzdálenější.

Hladiny ve vrtech Buzice a Čimelice mají výrazně plošší, méně rozkolísaný průběh během roku než u vrtů v povodí Žehrovky, amplituda se pohybuje okolo 1,5 m (rozdíl mezi maximální jarní hladinou a minimální podzimní).

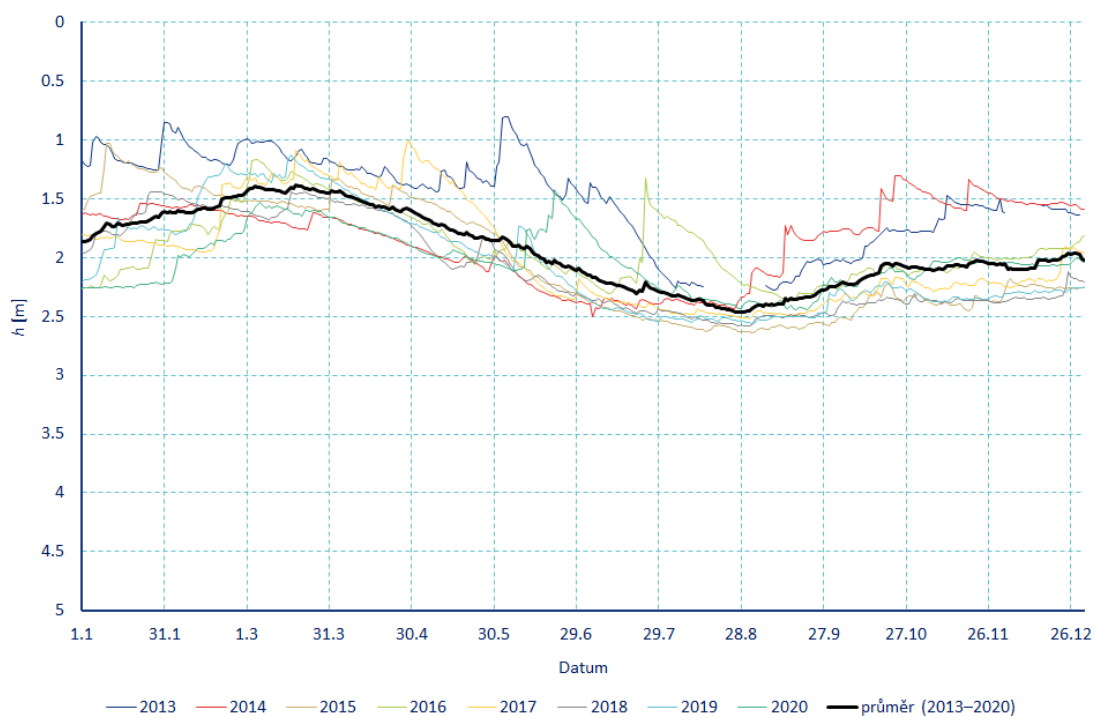
Zajímavá je skutečnost, že ačkoliv má Žehrovka méně rozkolísaný odtok z povodí během roku a v sušší části roku odtéká z povodí více vody (jak je patrné z analýzy *M*-denních průtoků) než u Lomnice a Skalice, mělké vrty v povodí Žehrovky vykazují mnohem intenzivnější interakci a rozkolísanost hladiny, hlavně v sušší polovině roku. A naopak, hladiny ve vrtech v povodí Lomnice a Skalice jsou vyrovnanější, přestože povrchový odtok z těchto dvou povodí je mnohem menší. Jednoznačně se zde projevují odlišné hydrogeologické podmínky s odlišnou propustností horninového prostředí a objemem podzemních vod.



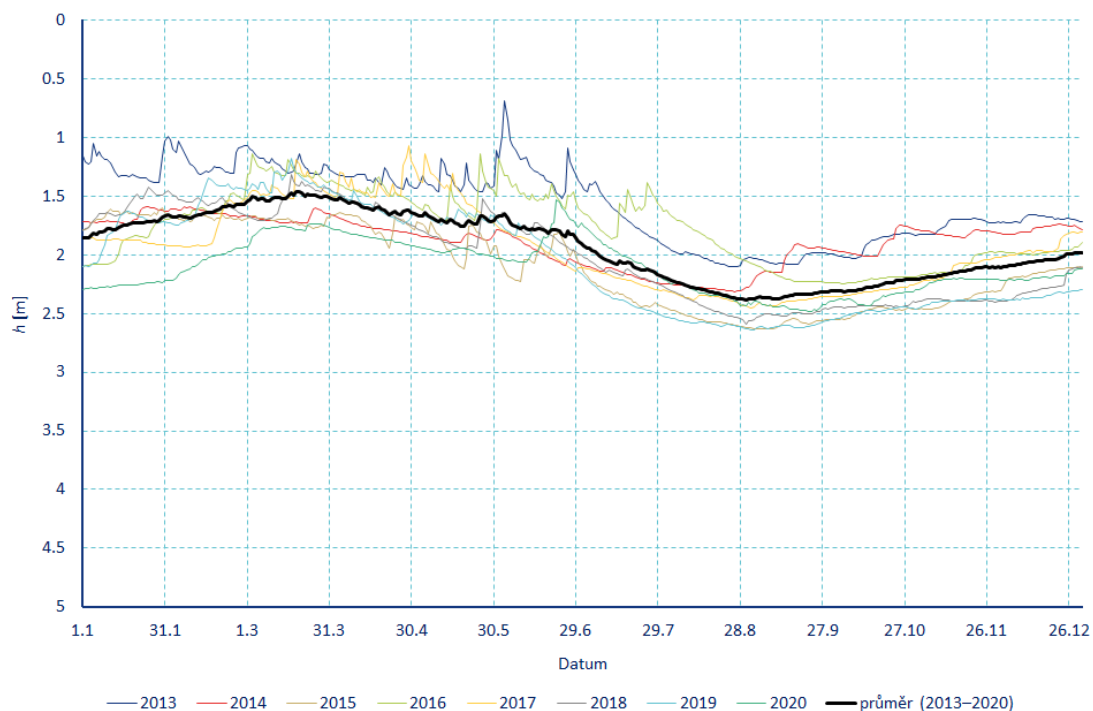
Obr. 8 Průběh průměrných denních stavů hladiny podzemní vody v mělkém vrtu Žďár (VP0642) v období 2013–2020



Obr. 9 Průběh průměrných denních stavů hladiny podzemní vody v mělkém vrtu Příhrazy (VP0643) v období 2013–2020



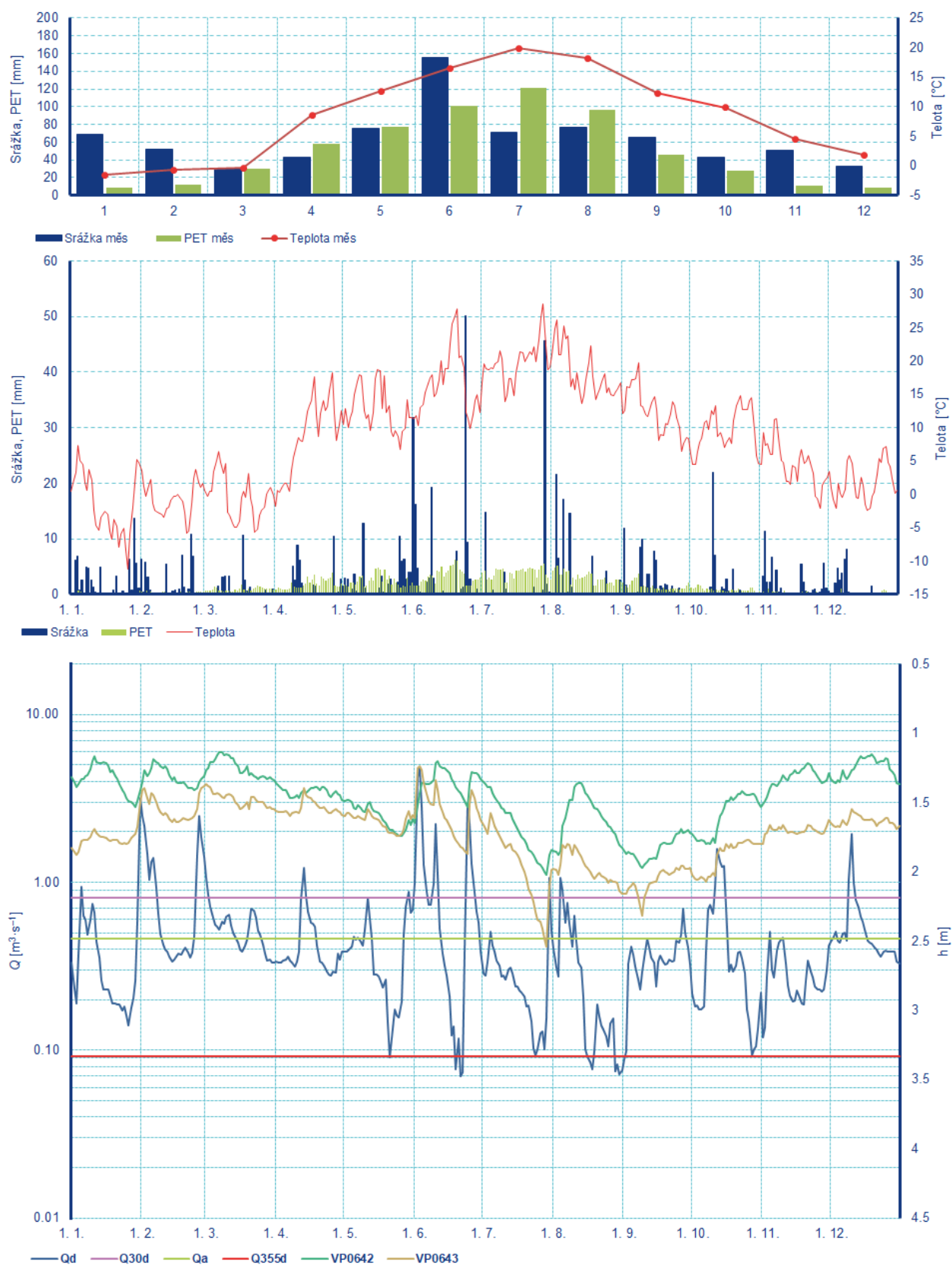
Obr. 10 Průběh průměrných denních stavů hladiny podzemní vody v mělkém vrtu Buzice (VP1127) v období 2013–2020



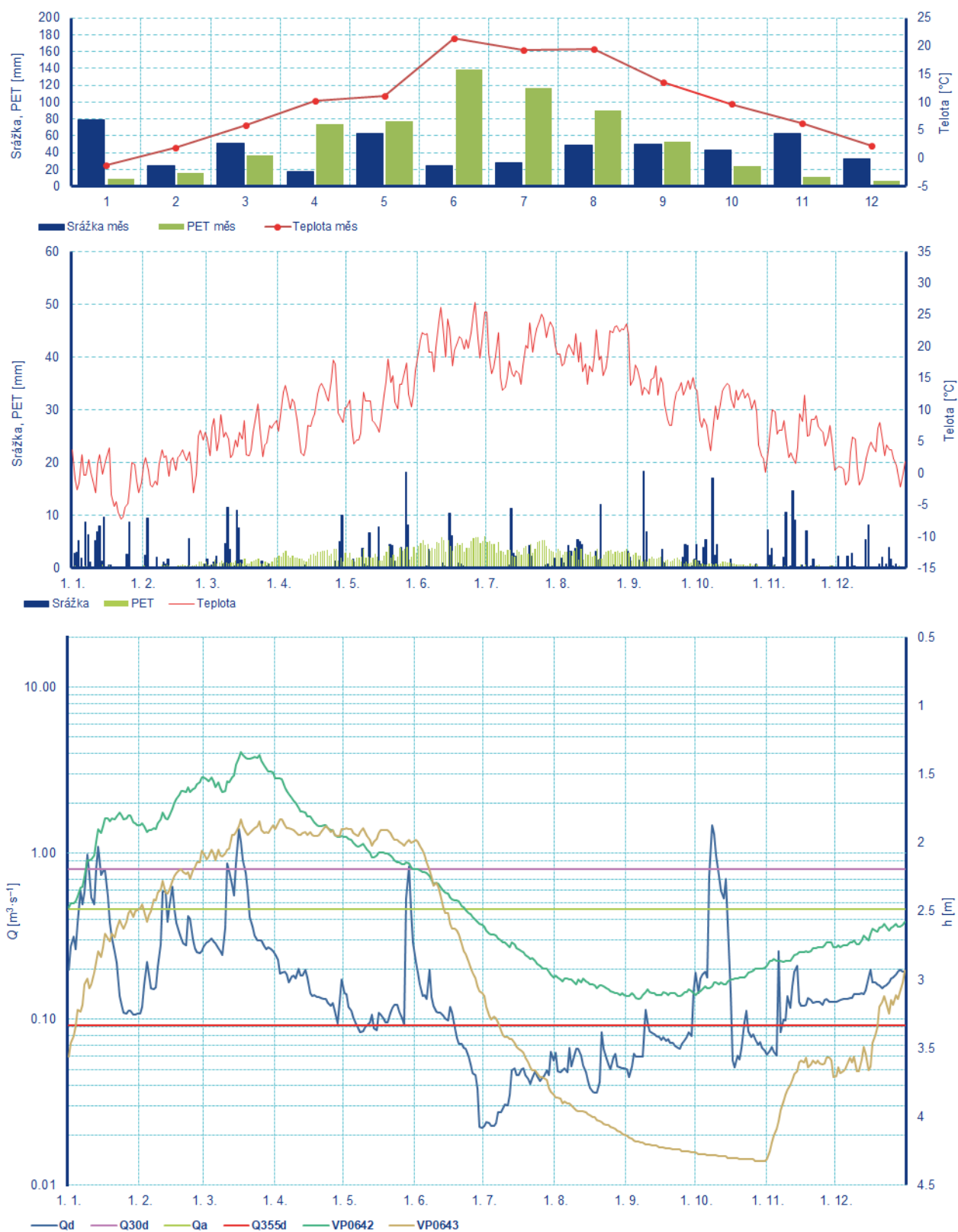
Obr. 11 Průběh průměrných denních stavů hladiny podzemní vody v mělkém vrtu Čimelice (Rakovice) (VP1131) v období 2013–2020

Režim průtoků a hladin v mělkých vrtech v povodí Žehrovky, Lomnice a Skalice

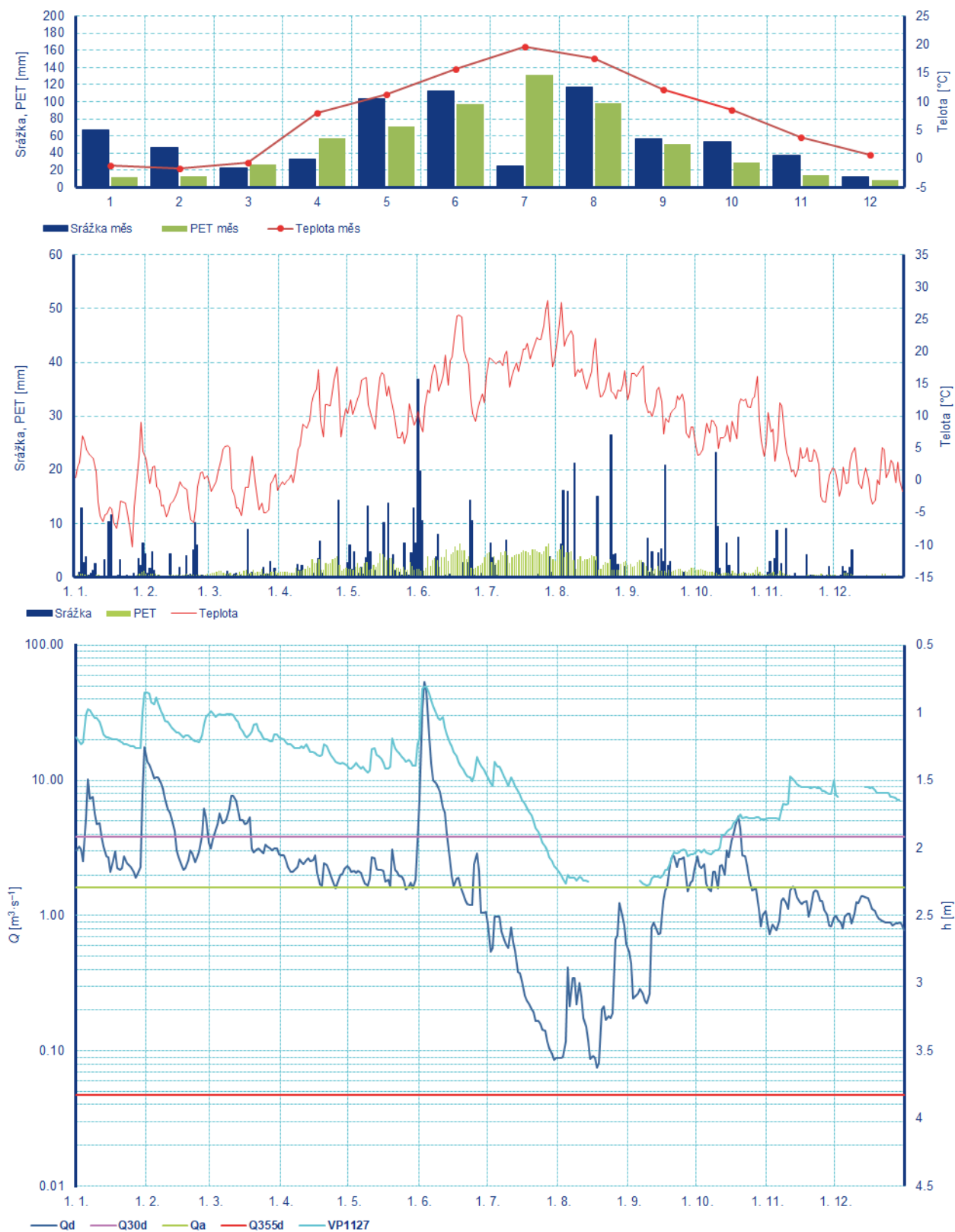
Interakci povrchové a podzemní vody ve vybraných povodích Žehrovky, Lomnice a Skalice ilustrují grafy na následujících šesti obrázcích (obr. 12 až 17). Na nich jsou v horní třetině zobrazeny průběhy měsíčních úhrnů srážek, potenciální evapotranspirace a průměrných měsíčních teplot vzduchu. Graf uprostřed znázorňuje výše uvedené veličiny v denním kroku. Graf ve spodní části zobrazuje průběh průměrných denních průtoků v závěrové vodoměrné stanici povodí a odpovídající průběh průměrných denních stavů hladin podzemní vody v přilehlém mělkém vrtu (v povodí Žehrovky jsou to dva nejbližší vrty).



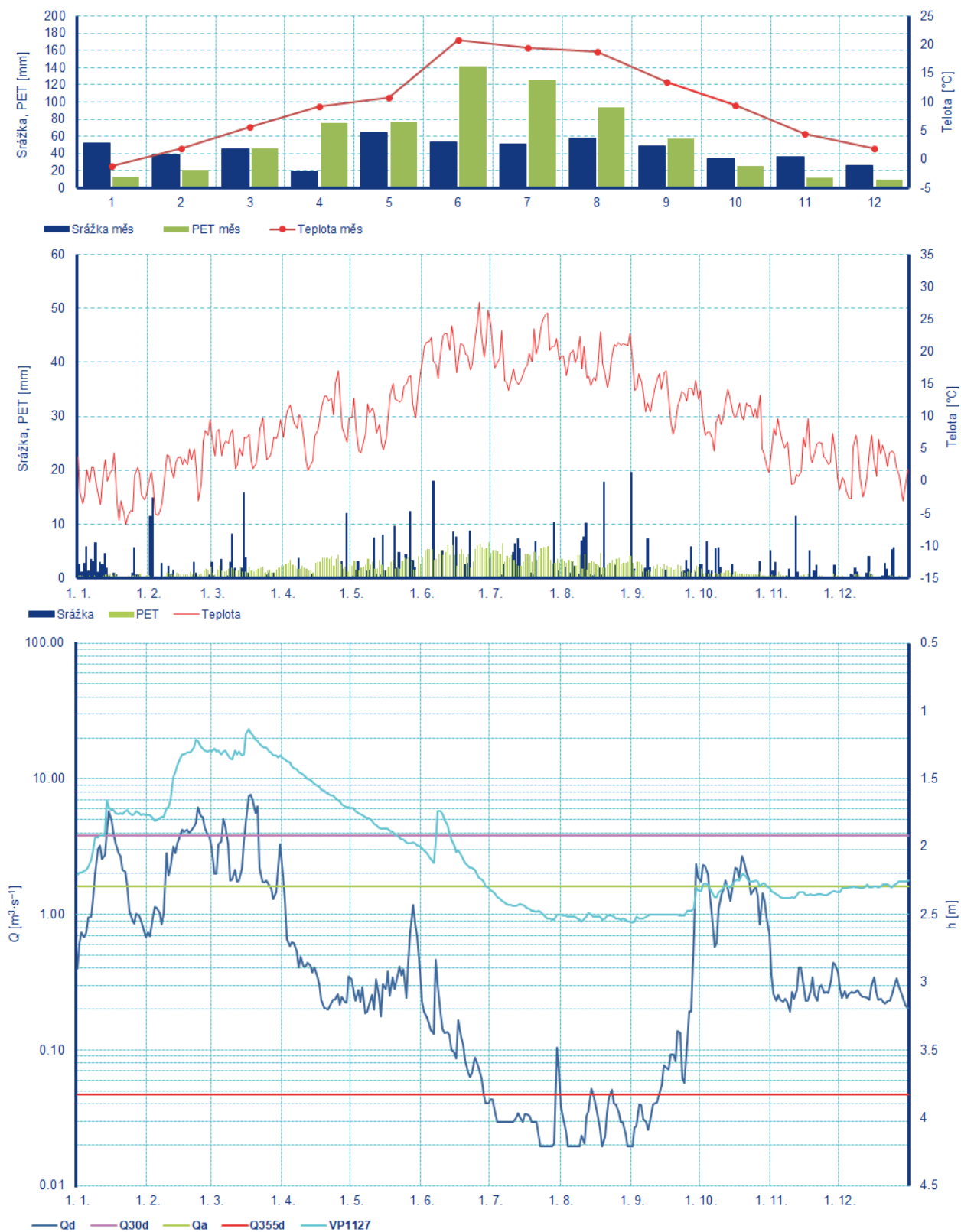
Obr. 12 Průběh srážek, teploty vzduchu, potenciální evapotranspirace, průměrných denních průtoků a průměrných denních stavů hladin v mělkých vrtech v povodí Žehrovky v roce 2013



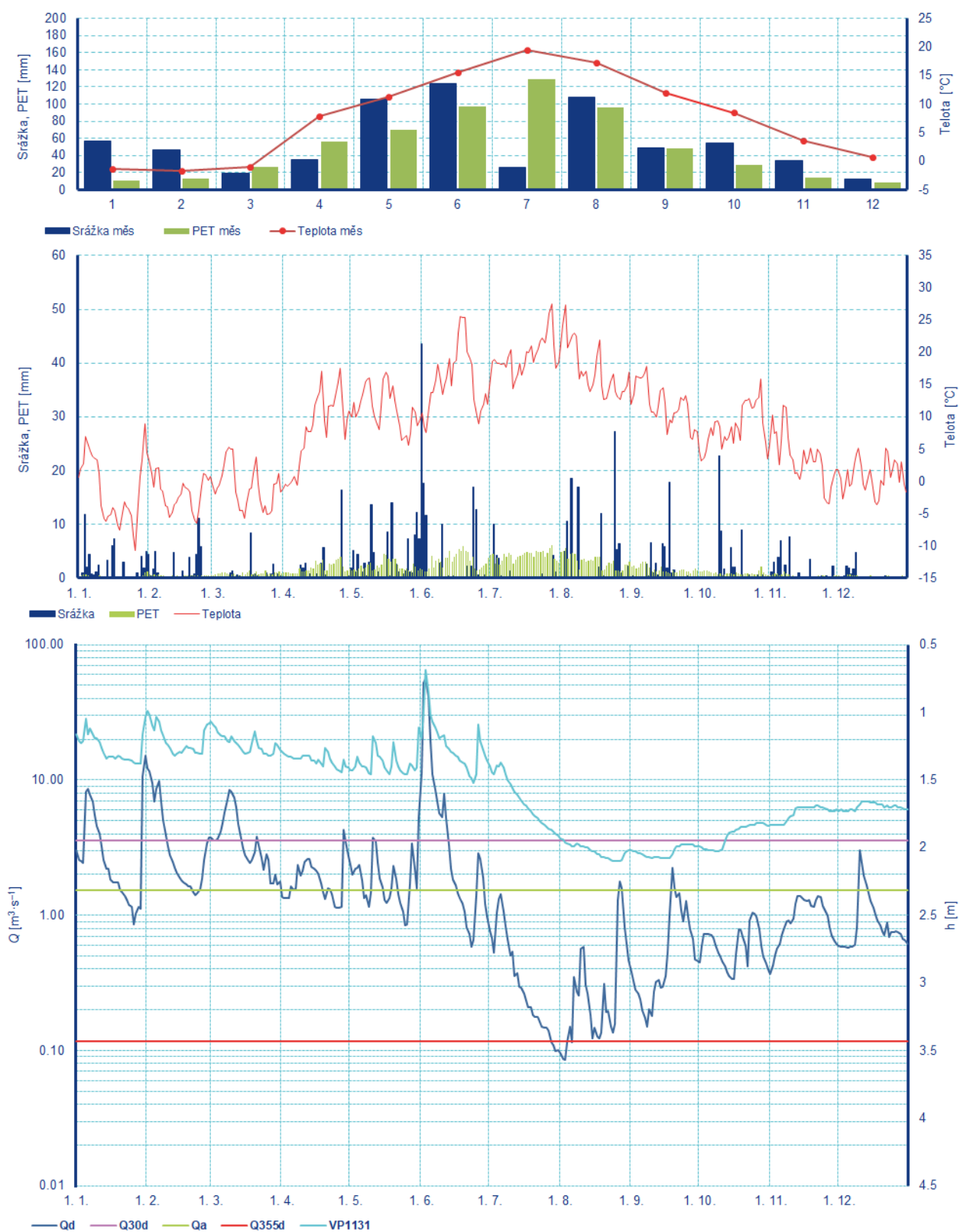
Obr. 13 Průběh srážek, teploty vzduchu, potenciální evapotranspirace, průměrných denních průtoků a průměrných denních stavů hladin v mělkých vrtech v povodí Žehrovky v roce 2019



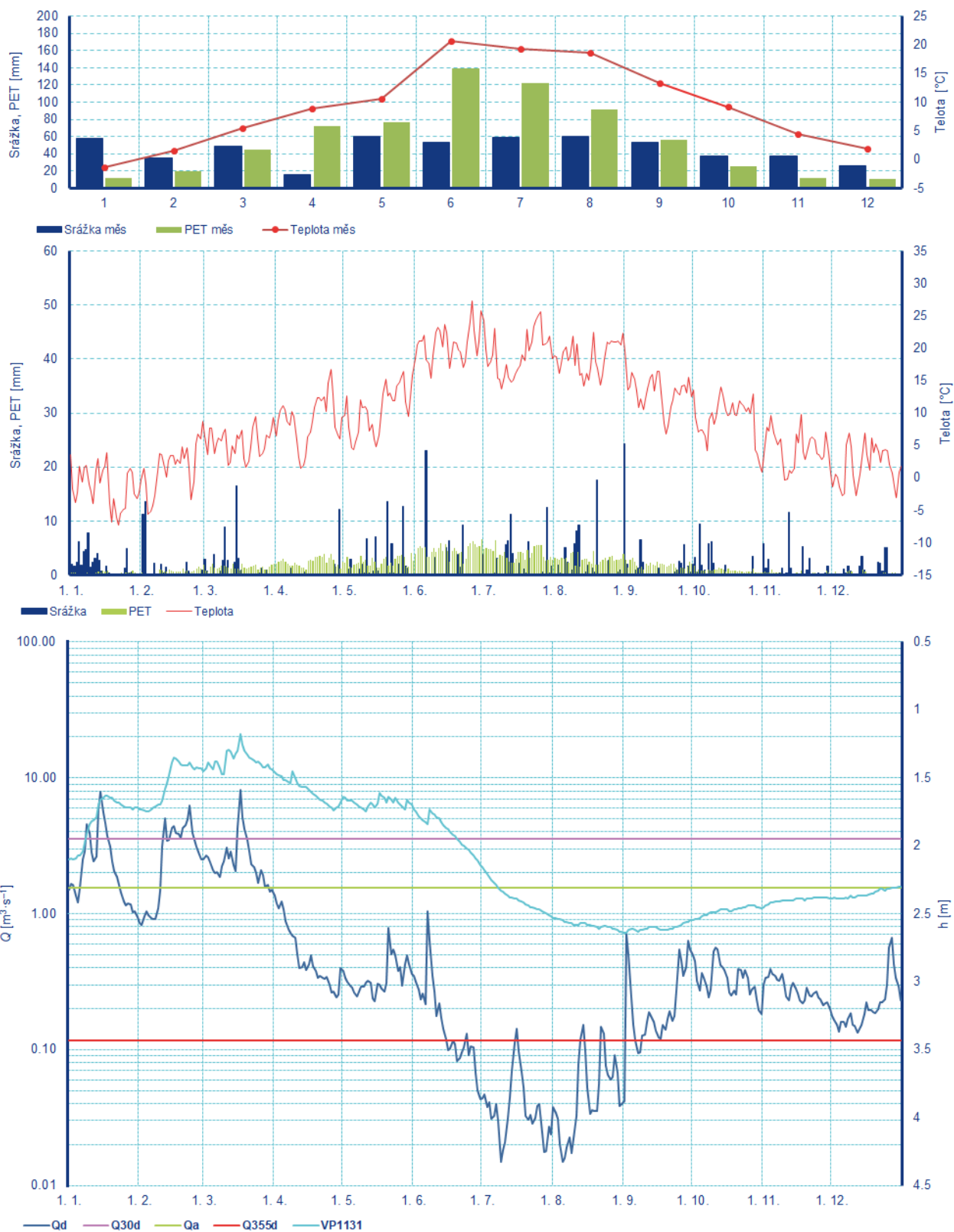
Obr. 14 Průběh srážek, teploty vzduchu, potenciální evapotranspirace, průměrných denních průtoků a průměrných denních stavů hladin v mělkých vrtech v povodí Lomnice v roce 2013



Obr. 15 Průběh srážek, teploty vzduchu, potenciální evapotranspirace, průměrných denních průtoků a průměrných denních stavů hladin v mělkých vrtech v povodí Lomnice v roce 2019



Obr. 16 Průběh srážek, teploty vzduchu, potenciální evapotranspirace, průměrných denních průtoků a průměrných denních stavů hladin v mělkých vrtech v povodí Skalice v roce 2013



Obr. 17 Průběh srážek, teploty vzduchu, potenciální evapotranspirace, průměrných denních průtoků a průměrných denních stavů hladin v mělkých vrtech v povodí Skalice v roce 2019

V grafech jsou uvedené průběhy veličin pro roky 2013 a 2019. Rok 2013 představuje srážkově i průtokově bohatý rok, kdy byla povodí nasycená srážkami v jarním období, což vyústilo při výrazných srážkách v povodně začátkem června. V roce 2019 vyvrcholila perioda suchého období, kdy byly

průtoky i stavy v mělkých vrtech na svých dlouholetých minimech. V rámci projektu byla zpracována celá perioda 2013–2020.

Bez viditelné odezvy na hladině podzemní vody (očekávaný pokles hladiny ve vrtech) je vypouštění rybníka Žabakor na podzim roku 2019, kdy se pokles hladiny v rybníku vůbec neprojevil na poklesu hladiny ve vrtu Příhrazy.

Z výše uvedených porovnání je zřejmé, že horninové složení hraje významnou roli při interakci povrchové a podzemní vody. V povodí Žehrovky je toto propojení mnohem intenzivnější než v povodí Lomnice a Skalice.

V průběhu vodního roku 2013 je jasně patrná interakce povrchové a podzemní vody, zejména v povodí Žehrovky. Hladiny v obou mělkých vrtech reagují téměř okamžitě na kolísání hladiny v toku. Během suchého období, jak ilustruje rok 2019, se interakce mezi povrchovou a podzemní vodou vytrácí, až při určité hodnotě průtoku úplně mizí a hladiny podzemní vody jsou bez odezvy, přestože v povrchovém toku následně dochází k zvětšení průtoku. V povodí Lomnice je propojení patrné i v suchém roce 2019.

Rok 2019 byl srážkově velmi chudý, což se projevilo výrazným zaklesnutím hladin podzemní vody. Současně už od dubna do konce září převyšoval výpar významně úhrny srážek, a to ve všech třech sledovaných povodích.

V roce 2013 byla zima bohatá na srážky a teploty se často pohybovaly v záporných hodnotách, mohly se tak vytvořit příznivé zásoby sněhu pro jarní dotaci podzemních vod.

Závěr

Studium interakce povrchové a podzemní vody je aktuálním tématem, zejména s ohledem na nedávné víceleté období sucha v České republice a s tím spojeným nedostatkem podzemních i povrchových vod. Na mnoha tocích byly pozorovány nejmenší průtoky za celé období pozorování, na mnoha vrtech byly sledovány poklesy hladin na minimální úroveň. Posouzení vlivu malých vodních nádrží na hladiny podzemní vody v rámci zmíněného projektu by mělo mj. přispět k přesnějšímu posuzování vydávání vodoprávních rozhodnutí ohledně malých vodních nádrží. Výsledky analýzy pozorovaných dat ČHMÚ na vybraných lokalitách povodí Žehrovky, Lomnice a Skalice můžeme shrnout do následujících bodů:

Kolísání hladin mělkých vrtů v oblasti České křídové tabule (povodí Žehrovky) je mnohem intenzivnější než kolísání hladin vrtů v krystaliniku jižních Čech (povodí Lomnice a Skalice).

Zásadní vliv na průběh hladin podzemní vody mají klimatické veličiny – srážky, teploty a evapotranspirace, druhotně pak hladina v povrchovém toku.

Dotace podzemní vody z malé vodní nádrže je intenzivnější v kvarterních sedimentech České křídě než v krystaliniku, v suchém období však může dojít k přerušení interakce mezi povrchovou a podzemní vodou a zaklesávání hladiny podzemní vody nezávisle na té povrchové. V krystaliniku jižních Čech na povodí Lomnice a Skalice je propojení povrchové a podzemní vody zřetelnější i v období sucha. Od určité velikosti průtoku již odezva hladiny v přilehlém vrtu není patrná.

Je zřejmé, že čím blíže je mělký vrt k vodnímu toku, tím je interakce vody mezi vrtem a vodním tokem těsnější a intenzivnější, zejména v povodí Žehrovky s ohledem na propustnější horninové prostředí.

Literatura

Trnka M. a kol., 2017: *Využití předpovědi půdní vlhkosti a intenzity sucha pro lepší rozhodování v rostlinné výrobě*. Ústav výzkumu globální změny AV ČR v. v. i., Brno. ISBN 978-80-87902-23-3.

Poděkování

Tento příspěvek vychází z řešení grantového projektu TITSMZP809 „Vliv malých vodních nádrží na hladinu podzemních vod a celkovou hydrologickou bilanci s důrazem na suchá období“.

Téma 2

Hydrologické extrémny, modelování a predikce



Neistoty klimatických impaktových štúdií v hydrologických aplikáciách

Hana HLAVÁČIKOVÁ, Eva KOPÁČIKOVÁ, Danica LEŠKOVÁ

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava, Slovenská republika, email: hana.hlavacikova@shmu.sk, eva.kopacikova@shmu.sk, danica.leskova@shmu.sk

Úvod

Klimatická zmena je dôležitý fenomén, ktorého prejavy pociťujeme v rôznych oblastiach. Prináša veľké množstvo odborných otázok a potrebu hľadania adaptačných opatrení. Vo vodnom sektore sú viditeľné zmeny napr. v náraste kulminačných prietokov a posune ich výskytu (Hirabayashi et al., 2013, Blöschl et al., 2019, Bertola et al., 2020), v priemerných ročných prietokoch (Nijssen et al., 2001), v dlhodobých čiarach prekročenia prietokov (Arora a Boer, 2001), v dĺžke obdobia s nízkymi prietokmi (Stahl et al., 2010, Fendeková et al., 2017), v zmene prvkov hydrologickej bilancie (Pekárová et al., 2018), v zásobách snehu a čase topenia snehu (Blahusiakova et al. 2020).

Pre zhodnotenie vplyvu klimatickej zmeny prostredníctvom tzv. impaktových štúdií sa v posledných desaťročiach bežne používajú výstupy z klimatických modelov (klimatických projekcií). Prednosťou tohto prístupu je, že na rozdiel od analýzy dlhodobých historických údajov a predpokladu, že podmienky останú nemenné, je vďaka klimatickým projekciám zmeny klímy možné získať najnovšie prognózované časové rady klimatických charakteristík do budúcnosti pre dostatočne dlhé obdobie približne 90–100 rokov. Navyše je možné analyzovať dopady predpokladaného socio-ekonomického vývoja prostredníctvom rozdielnych koncentrácií skleníkových plynov, vyjadrených pomocou emisných scenárov.

Napriek nesporným prednostiam klimatických projekcií a následne impaktových štúdií, prinášajú tieto viaceré neistoty. Medzi základné neistoty patria neistoty klimatických modelov, emisných scenárov a v prípade použitia hydrologických modelov aj neistoty spojené s výberom a aplikáciou modelu. Cieľom impaktových štúdií je využiť prednosti, ktoré modely poskytujú, a zároveň eliminovať neistoty na čo možno najnižšiu úroveň.

Zdrojov neistôt u klimatických modelov je niekoľko. Globálne klimatické modely (GCM) poskytujú informácie o klimatickej zmene vo veľkej mierke a simulujú klimatické procesy na globálnej úrovni. Pracujú v horizontálnom rozlíšení približne 100 až 300 km. Klimatický signál je nutné spracovať v regionálnej a lokálnej úrovni. Preto musia byť informácie z GCM preškálované (metódou „downscaling“) do jemnejšej mierky regionálnych klimatických modelov (RCM) (Hakala et al., 2019). Zdrojom systematických chýb môže byť diskretizácia a priestorové spriemerovanie údajov v rámci gridových buniek, alebo nedostatočná konceptualizácia modelov. Jedným z možných riešení eliminovania systematickej chyby je použitie viacerých RCM modelov, čím vznikne ansámblová simulácia. Medián takýchto simulácií môže lepšie zodpovedať pozorovaným údajom (odporúča sa napr. pre teploty vzduchu). Naopak, ansámblové simulované zrážky môžu vykazovať deviaciu oproti pozorovaniam, preto sú nutné aj iné korekcie (Teutschbein, 2013). Metódou korekcií, ktorá sa na výstupy z RCM bežne používa, je metóda odstránenia štrukturálnych odchýlok prostredníctvom tzv. bias correction (BC). Podľa glosáru CLIPC (2018), je termín „bias correction“ (alebo „bias-adjustment“) definovaný ako metóda kalibrácie modelových simulácií tak, aby štatistické charakteristiky modelových výstupov boli podobné štatistickým charakteristikám pozorovaných údajov.

Kľúčovou a zrejme najdôležitejšou časťou práce v hydrologických impaktových štúdiách je spôsob aplikácie výstupov z klimatických projekcií v hydrologických modeloch. Prehľad o tejto problematike dobre poskytuje napr. Hakala et al. (2019). Bolo zistené, že meteorologické charakteristiky z RCM modelov aj napriek ich úprave metódou BC, stále nemusia byť vhodné pre ich použitie v hydrologických modeloch a musia byť ešte ďalej korigované (Teutschbein a Seibert, 2012, Dakhlaoui et al., 2019, Gao

et al., 2020). Preto je veľmi dôležité v hydrologických impaktových štúdiách testovať na referenčnom období kvalitu výstupov z hydrologických modelov, v ktorých boli použité meteorologické charakteristiky z klimatických projekcií. Dôvodov môže byť niekoľko: napr. stále príliš hrubé priestorové rozlíšenie výstupov z RCM modelov vzhľadom k skúmanému územiu, zložitá orografia prostredia (zvlášť v horských oblastiach), alebo zložitnosť tvorby odtoku v skúmanom území. Najčastejším riešením problému je multi-ansámblový prístup, ktorý využíva ansámblové klimatické výstupy z RCM modelov (zrážky a teploty), ktoré sú špeciálne upravené škálovaním pre použitie v hydrologickom modeli tak, aby výstupy z hydrologického modelu zodpovedali čo najviac meraným hydrologickým dátam (obyčajne sa porovnávajú priemerné mesačné prietoky, alebo čiary prekročenia kulminačných prietokov podľa druhu analýzy) (Teutschbein a Seibert, 2010, Hakala et al., 2019, Gao et al., 2020). Iným riešením je využitie ansámblu klimatických a hydrologických modelov (Donnelly et al., 2017, Hakala et al., 2019) bez ďalšej korekcie už korigovaných klimatických dát (IMPACT2C, 2015). Niektorí autori tiež robili korekciu odchýlky (BC) priamo na hydrologických údajoch, výstupoch z impaktového modelovania (González-Zeas et al., 2012, Gaál et al., 2017 a Gaál, 2018).

Jedným z poskytovateľov veľkého objemu klimatických údajov je európsky projekt COPERNICUS. Klimatický program Copernicus Climate Change Service (C3S) patrí medzi 6 produktov služby Copernicus Earth Observation Programme. Ide o operačný program EÚ založený na existujúcej európskej vedeckej infraštruktúre a dostupných európskych vedeckých poznatkoch. Základom tohto projektu je aj klimatický výskum riešený v rámci World Climate Research Programme (WCRP). C3S poskytuje informácie o historickej, súčasnej a predpokladanej budúcej klíme Európy a sveta, ako sú údaje z pozorovania klímy, reanalýza klímy, sezónne predpovede a projekcie klímy do budúcnosti (dostupné na: <https://climate.copernicus.eu>). Klimatická služba bola vytvorená s cieľom poskytovania podpory pre adaptačné plány a politiku zmiernenia dopadov klimatickej zmeny pre EÚ tým, že ponúka konzistentné informácie o klimatickej zmene. Klimatické údaje pre oblasť vodného hospodárstva (dostupné na: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-quantity-swicca?tab=doc>) boli v minulosti poskytované prostredníctvom SWICCA portálu (Service for Water Indicators in Climate Change Adaptation). Význam databázy C3S zdôrazňujú aj niektoré renomované spoločnosti, medzi ktorými je napr. aj medzinárodná asociácia hydrologických vied (IAHS) (<https://climate.copernicus.eu/climate-data-advance-research>, dostupné 25.04.2021).

V tejto práci sme sa zaoberali impaktom klimatickej zmeny na 100-ročné (Q_{100}) povodňové prietoky analyzované v niekoľkých vodomerných staniách Slovenska. Podkladom boli predovšetkým výstupy z hydrologických modelov z databázy SWICCA. Výsledky boli čiastočne publikované v práci Kopáčiková et al. (2020) a prezentované na Dunajskej konferencii v príspevku Kopáčiková et al. (2021). V tomto príspevku sme chceli poukázať na spôsob úpravy hydrologických dát (výstupov z databázy SWICCA) pre potrebu impaktovej štúdie. Cieľom bola tiež analýza metodiky a údajov z databázy SWICCA pre niekoľko povodí Slovenska.

Metodika

Databáza SWICCA

Databáza SWICCA je výsledkom práce Švédskeho meteorologického a hydrologického ústavu (SMHI). Cieľom databázy je poskytnúť užívateľom potrebné dáta k zhodnoteniu klimatickej zmeny a jej dopadu v oblasti vodných zdrojov. K dispozícii sú rôzne impaktové indikátory, ktoré sa nachádzajú v kopernikovskej databáze údajov Climate data Store (CDS) (väčšinou vo forme NetCDF alebo GRIB). Medzi impaktové indikátory patria údaje o kvantite a kvalite vody, teplote vzduchu, zrážkach a mnohé ďalšie, na ktorých je možné analyzovať vplyv klimatickej zmeny v zmysle trendov a variability konkrétneho indikátora. Dáta o kvantite a kvalite vody sú výsledkom simulácií z modelov HYPE, LISFLOOD a VIC. Tieto indikátory boli vytvorené s cieľom urýchliť zhodnotenie dopadu klimatickej zmeny a zjednodušiť adaptáciu na klimatickú zmenu vo vodnom hospodárstve pre oblasť Európy.

Údaje z RCM modelov poskytované databázou SWICCA boli vytvorené v rámci iniciatívy EURO-CORDEX, ktoré patria ku generácii európskych RCM projekcií s priestorovým rozlíšením 12 x 12 km a boli korigované BC metódou „quantile-mapping“ (Wilcke et al., 2013).

Z portálu SWICCA boli pre potrebu tejto impaktovej štúdie stiahnuté (k dátumu 01.02.2019) dva druhy časových radov priemerných denných prietokov ako výstupy jedenástich vzájomných kombinácií štyroch globálnych cirkulačných modelov (GCM), štyroch regionálnych klimatických modelov (RCM), troch klimatických scenárov (RCP) a dvoch hydrologických modelov: 1/ hydrologického modelu HYPE a 2/ hydrologického modelu LISFLOOD (tabuľka 1). V tabuľke 1 sú uvedené názvy GCM a RCM spolu s názvom organizácie, ktorá tieto modely vyvíja.

Tab. 1 Súhrn behov klimatických modelov použitých v databáze SWICCA. RCP predstavuje reprezentatívny smer vývoja koncentrácie skleníkových plynov, GCM – globálny cirkulačný model, RCM – regionálny cirkulačný model. Referenčné obdobia boli definované ako obdobie 1.1.1971–31.12.2000, budúce obdobia ako 1.1.2011–31.12.2100.

P.č.	RCP	GCM	RCM	Obdobie	Inštitút
1	2.6	EC-EARTH	RCA4	1970–2100	SMHI
2		MPI-ESM-LR	REMO2009	1970–2100	CSC
3	4.5	EC-EARTH	RCA4	1970–2100	SMHI
4		EC-EARTH	RACMO22E	1970–2100	KNMI
5		HadGEM2-ES	RCA4	1970–2098	SMHI
6		MPI-ESM-LR	REMO2009	1970–2100	CSC
7*		CM5A	WRF33	1970–2100*	IPSL
8	8.5	EC-EARTH	RCA4	1970–2100	SMHI
9		EC-EARTH	RACMO22E	1970–2100	KNMI
10		HadGEM2-ES	RCA4	1970–2098	SMHI
11		MPI-ESM-LR	REMO2009	1970–2100	CSC

Emisné scenáre

Medzivládny panel pre klimatickú zmenu IPCC uvádza novšie emisné scenáre vo forme reprezentatívnych trás koncentrácie skleníkových plynov (RCP – representative concentration pathway) (van Vuuren et al., 2012). SWICCA pracuje s tromi základnými scenármi (RCP2.6, RCP4.5 a RCP8.5), pričom sú definované nasledovne: 1/ RCP2.6 predpokladá, že emisie CO₂ budú na začiatku storočia konštantné, potom začnú klesať a na konci storočia dosiahnu negatívne hodnoty. Využitie fosílnych palív prudko klesne a zvýši sa využitie ornice na produkciu biopalív. Produkcia metánu bude zredukovaná o 40%, 2/ RCP4.5 predpokladá, že emisie CO₂ budú narastať do polovice storočia a potom začnú klesať. Prudko sa zníži využívanie energií a na veľkých plochách bude aplikovaná reforestácia. Poľnohospodárska pôda bude zmenšená v dôsledku dosahovania lepšej úrodnosti a zníženej konzumácie mäsa. Budú nastolené prísne pravidlá politiky ochrany klímy a stabilizuje sa produkcia metánu, 3/ RCP8.5 predpokladá, že sa emisie CO₂ do konca storočia strojnásobia a narastú aj emisie metánu. Vzrastie využívanie energií a fosílnych palív. Porozumenie konceptu obnoviteľných zdrojov bude veľmi limitované a v spoločnosti bude absentovať implementácia stratégie ku klíme, čo predstavuje najpesimistickejší scenár.

Korekcia odchýlky na hydrologických údajoch

Ako bolo spomenuté v úvode, odporúča sa, aby údaje z klimatických projekcií boli testované na referenčnom období v lokálnych podmienkach ich použitia. V tejto práci sme použili metódu korekcie na hydrologických údajoch, konkrétne na priemerných denných prietokoch získaných z modelov HYPE a LISFLOOD z databázy SWICCA.

Bolo rozhodnuté aplikovať jednotnú metódu korekcie odchýlky pre všetky stanice a všetky výstupy pochádzajúce z rôznych klimatických modelov. Pri výbere jednotnej metódy sa porovnávali s meranými prietokmi tri druhy údajov v kontrolnom období (1971–2001): 1/ časové rady surových údajov z databázy, 2/ lineárne preškálované výstupy z modelov a 3/ výstupy z modelov upravené škálovaním s rozptylom.

Metóda lineárneho škálovania a škálovania s rozptylom

V prvom kroku boli údaje upravené tak, aby boli odstránené rozdiely medzi modelovými výstupmi a pozorovaním na úrovni mesačných priemerov (rov. 1,2). Prvý krok zároveň zodpovedá samostatnej metóde korekcie odchýlky – lineárnemu škálovaniu.

$$Q_{kont}^{*1}(d) = Q_{kont}(d) \cdot \left[\frac{\mu_m(Q_{poz}(d))}{\mu_m(Q_{kont}(d))} \right] \quad (1)$$

$$Q_{bud}^{*1}(d) = Q_{bud}(d) \cdot \left[\frac{\mu_m(Q_{poz}(d))}{\mu_m(Q_{kont}(d))} \right] \quad (2)$$

Pre úpravu štandardnej odchýlky modelovaných radov v ďalšom kroku odpočítame od denných lineárne preškálovaných údajov ich mesačné priemery. Časový rad tak v mesačnom kroku posunieme na nulový priemer (rov. 3, 4).

$$Q_{kont}^{*2}(d) = Q_{kont}^{*1}(d) - \mu_m(Q_{kont}^{*1}(d)) \quad (3)$$

$$Q_{bud}^{*2}(d) = Q_{bud}^{*1}(d) - \mu_m(Q_{bud}^{*1}(d)) \quad (4)$$

Takto vypočítané štandardné odchýlky kontrolného a nadchádzajúceho obdobia ($Q_{kont}^{*2}(d)$) a ($Q_{bud}^{*2}(d)$) sú ďalej prenasobené pomerom štandardných odchýlok pozorovania a modelov v mesačnom kroku kontrolného obdobia (rov. 5, 6).

$$Q_{kont}^{*3}(d) = Q_{kont}^{*2}(d) \cdot \left[\frac{\sigma_m(Q_{poz}(d))}{\sigma_m(Q_{kont}(d))} \right] \quad (5)$$

$$Q_{bud}^{*3}(d) = Q_{bud}^{*2}(d) \cdot \left[\frac{\sigma_m(Q_{poz}(d))}{\sigma_m(Q_{kont}(d))} \right] \quad (6)$$

Na záver sa ku korigovaným odchýlkam opäť pripočítajú mesačné priemery $\mu_m(Q_{kont}^{*1}(d))$ resp. $\mu_m(Q_{bud}^{*1}(d))$ z druhého kroku výpočtu (rov. 7, 8).

$$Q_{kont}^{*}(d) = Q_{kont}^{*3}(d) + \mu_m(Q_{kont}^{*1}(d)) \quad (7)$$

$$Q_{bud}^{*}(d) = Q_{bud}^{*3}(d) + \mu_m(Q_{bud}^{*1}(d)) \quad (8)$$

kde $Q(d)$ – priemerný denný prietok [m^3/s], * – korekciou odchýlky upravené údaje, *,2,3 – medzistupne korekcie odchýlky, *kont* – kontrolné obdobie simulované z regionálnych klimatických modelov 1971–2001, *bud* – nadchádzajúce obdobie simulované z regionálnych klimatických modelov 2011–2100, *poz* – pozorovania z archívu SHMÚ pre kontrolné obdobie 1971–2001, μ_m – mesačný priemer, σ_m – štandardná odchýlka v mesiaci.

Metóda škálovania s rozptylom už podľa svojej definície zabezpečí, že upravené časové rady údajov majú v kontrolnom období rovnaký priemer a štandardnú odchýlku, resp. varianciu ako pozorovania (Teutscheiben, 2013).

Pre porovnanie charakteristík hydrologických modelových výstupov s meranými údajmi v referenčnom (prekrývajúcom sa) období boli aplikované štyri základné kritériá: 1/ porovnávali sa hodnoty koeficientov Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash-Sutcliffe, 1970) a Kling-Gupta (KGE) (Gupta et al., 2009), boli vizuálne posúdené krabicové grafy s dôrazom na zachytenie maximálnych extrémov, 3/ bol robený Mann-Whitney-ho test na posúdenie, či údaje z modelov pochádzajú z rovnakej populácie ako z pozorovania a 4/ bolo robené vizuálne porovnanie časových radov v dennom kroku, ako aj mesačných priemerov, a tiež ročných maxim.

Vyjadrenie impaktu klimatickej zmeny pre odhad Q_{100}

Pre odhad vplyvu klimatickej zmeny na Q_{100} bol zvolený nasledovný postup: 1/ boli stiahnuté časové rady priemerných denných prietokov zo všetkých dostupných klimatických projekcií a z dvoch hydrologických modelov HYPE a LISFLOOD z portálu SWICCA pre vybrané slovenské vodomerné stanice, 2/ dáta boli kontrolované a korigované v predošlom uvedenej BC korekciou na prekrývajúcom sa období 1971–2000, 3/ boli vybrané ročné maximá, 4/ bol robený prepočet ročných maxim priemerných denných prietokov na ročné kulminačné prietoky podľa vzťahov publikovaných v Hlaváčiková et al. (2019), 5/ bola robená analýza trendu neparametrickým testom Mann-Kendall, 6/ bola robená stacionárna frekvenčná analýza (v prípade zistenia signifikantného trendu aj nestacionárna). Pre frekvenčnú analýzu bola použitá distribúcia generalizovaných extrémnych hodnôt (Generalized Extreme Value – GEV).

Z dôvodu neuspokojivých simulovaných prietokov pre stanice Banská Bystrica (Hron), Liptovský Mikuláš (Váh), Janík (Bodva) a Spišské Vlachy (Hornád) zistených na prekrývajúcom sa referenčnom období z hydrologických modelov HYPE a LISFLOOD (aj po korekcii odchýlky) boli pre tieto stanice použité výstupy z hydrologického modelu HBV, používaného v operatívnej hydrologickej predpovednej službe SHMÚ. Model HBV bol pre tieto stanice nakalibrovaný v dennom kroku na základe meraných prietokov pri vstupných zrážkach a teplotách z klimatických projekcií z databázy SWICCA. Ďalší postup bol ako v predošlom podľa bodov 2.–6.

Impakt klimatickej zmeny pre Q_{100} (CCQ_{100}) bol v tejto práci vyjadrený ako percentuálna zmena Q_{100} v budúcnosti oproti súčasnosti vo forme:

$$CCQ_{100} = 100 * (Q_{100, bud} - Q_{100}) / Q_{100} (\%) \quad (9)$$

kde $Q_{100, bud}$ – odhadovaný storočný prietok pre obdobie 2011–2100, Q_{100} – súčasný storočný prietok v príslušnej vodomernej stanici.

Priemerné hodnoty budúcich Q_{100} boli získané z celého ansámblu klimatických a dostupných hydrologických modelov pre danú vodomernú stanicu (v ideálnom prípade z 22 hodnôt).

Neistoty odhadu zmeny Q_{100} v dôsledku klimatickej zmeny boli kvantifikované z interkvartilového rozsahu priemerných klimatických impaktov pre jednotlivé stanice. Tento spôsob kvantifikuje neistotu z priemerných hodnôt CCQ_{100} , získaných z jednotlivých ansámblov klimatických aj hydrologických modelov (kvantifikuje rozsah, v akom sa pohybuje 50% priemerných hodnôt CCQ_{100} pre danú stanicu).

Výsledky

Výsledkom tejto analýzy boli odhadované zmeny v Q_{100} pre 11 vodomerných staníc Slovenska použitím klimatických a hydrologických údajov z kopernikovskej databázy SWICCA (tabuľka 2, Obr. 1).

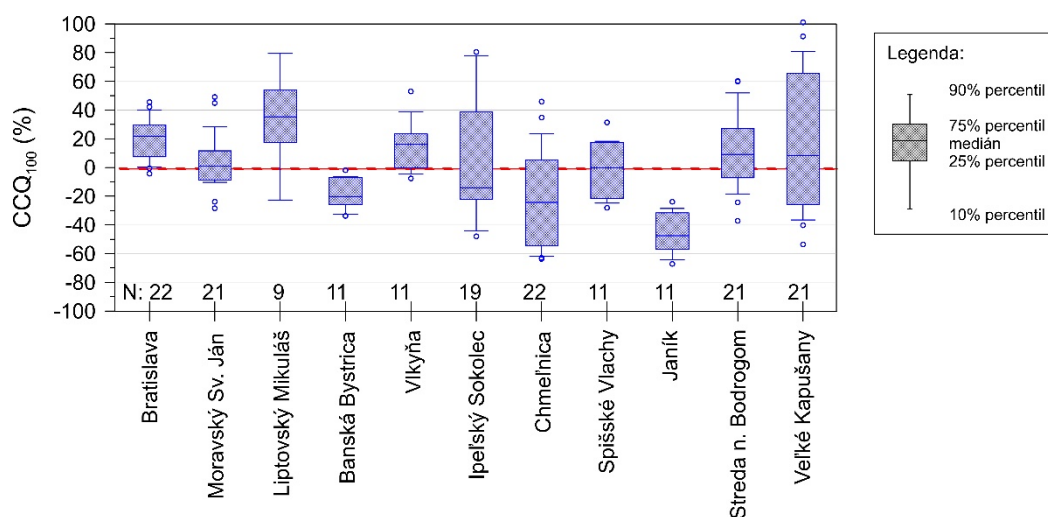
Výsledky indikujú vzostup Q_{100} pre sedem staníc: Bratislava (Dunaj), Moravský Sv. Ján (Morava), Liptovský Mikuláš (Váh), Vlkyňa (Slaná), Ipeľský Sokolec (Ipeľ), Streda n. Bodrogom (Bodrog), Veľké Kapušany (Latorica), v rozsahu hodnôt 5,48–34,12%. Pokles Q_{100} je indikovaný pre stanice Chmeľnica (Poprad), Banská Bystrica (Hron) a Janík (Ida, povodie Bodvy) v rozsahu –17,99 až –47,03%. Pre stanicu Spišské Vlachy (Hornád) nebola indikovaná výrazná zmena Q_{100} (zmena viac ako $\pm 5\%$).

Najvýraznejší nárast je indikovaný pre stanicu Liptovský Mikuláš, kde priemerný impakt klimatickej zmeny CCQ_{100} je +34%, polovica hodnôt sa pohybuje v intervale 17–53%. Naopak najvýraznejší pokles sa očakáva v povodí Bodvy (stanica Janík – Ida), kde sa impakt klimatickej zmeny CCQ_{100} pohyboval v rozsahu –67 až –23% s priemernou hodnotou –47%.

Tab. 2 Údaje o vodomerných staniách, súčasné a odhadované Q_{100} spolu so zmenou Q_{100} vyjadrenou impaktom klimatickej zmeny pre Q_{100} (CCQ_{100}). V zátvorke je pre príslušnú vodomernú stanicu uvedený aplikovaný hydrologický model, v ostatných staniách bol použitý model HYPE a LISFLOOD.

Názov stanice	Tok	Povodie	Plocha povodia (km ²)	Q_{100} prítomnosť (m ³ /s)	Q_{100} budúcnosť (m ³ /s)	CCQ_{100} (%)
Bratislava	Dunaj	Dunaj	131331	11000	13290	↑ 20.32
Moravský Sv. Ján	Morava	Morava	24129	1600	1690	↑ 5.48
Streda n. Bodrogom	Bodrog	Bodrog	11474	1400	1570	↑ 12.07
Ipeľský Sokolec	Ipeľ	Ipeľ	4838	670	710	↑ 6.02
Veľké Kapušany	Latorica	Bodrog	2915	736	880	↑ 19.32
Banská Bystrica (HBV)	Hron	Hron	1766	540	440	↓ -18
Vlkyňa (Lisflood)	Rimava	Slaná	1377	190	220	↑ 15.58
Chmeľnica	Poprad	Poprad	1262	820	640	↓ -22.36
Liptovský Mikuláš (HBV)	Váh	Váh	1107	500	670	↑ 34.12
Spišské Vlachy (HBV)	Hornád	Hornád	775	400	390	→ -2.34
Janík (HBV)	Ida	Bodva	378	95	50	↓ -47.03

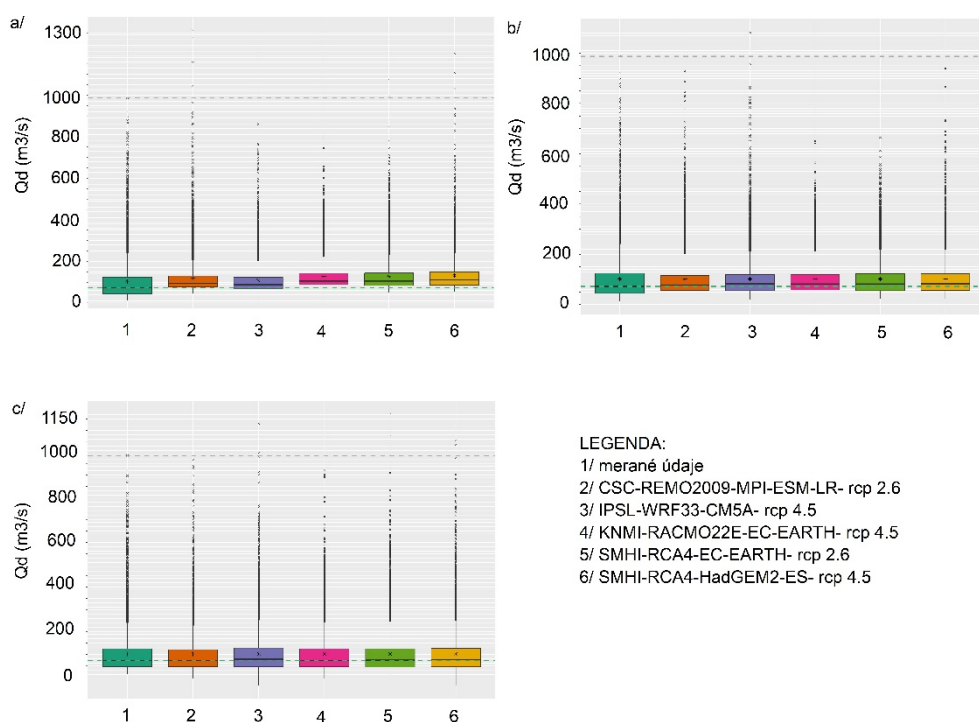
Priemerné hodnoty CCQ_{100} boli získané z hodnôt CCQ_{100} z jednotlivých výstupov klimatických a hydrologických modelov. Ich variabilita je znázornená na obr. 1 hodnotami interkvartilového rozpätia (25. až 75. percentil), ako aj hodnotami mediánu a extrémnych hodnôt 10. a 90. percentilu. Z obr. 1 je vidieť, že CCQ_{100} pre stanice Veľké Kapušany, Ipeľský Sokolec a Chmeľnica majú pomerne široký interkvartilový rozsah a s tým súvisiacu väčšiu neistotu odhadu budúceho Q_{100} .



Obr. 1 Krabicové grafy vyjadrujúce variabilitu a rozsah impaktu klimatickej zmeny pre Q_{100} (CCQ_{100}) získaného z jednotlivých ansámblov klimatických a hydrologických modelov. N je počet ansámblov použitých pre analýzu. Krúžkom sú zobrazené hodnoty mimo intervalu 10.–90. percentilu.

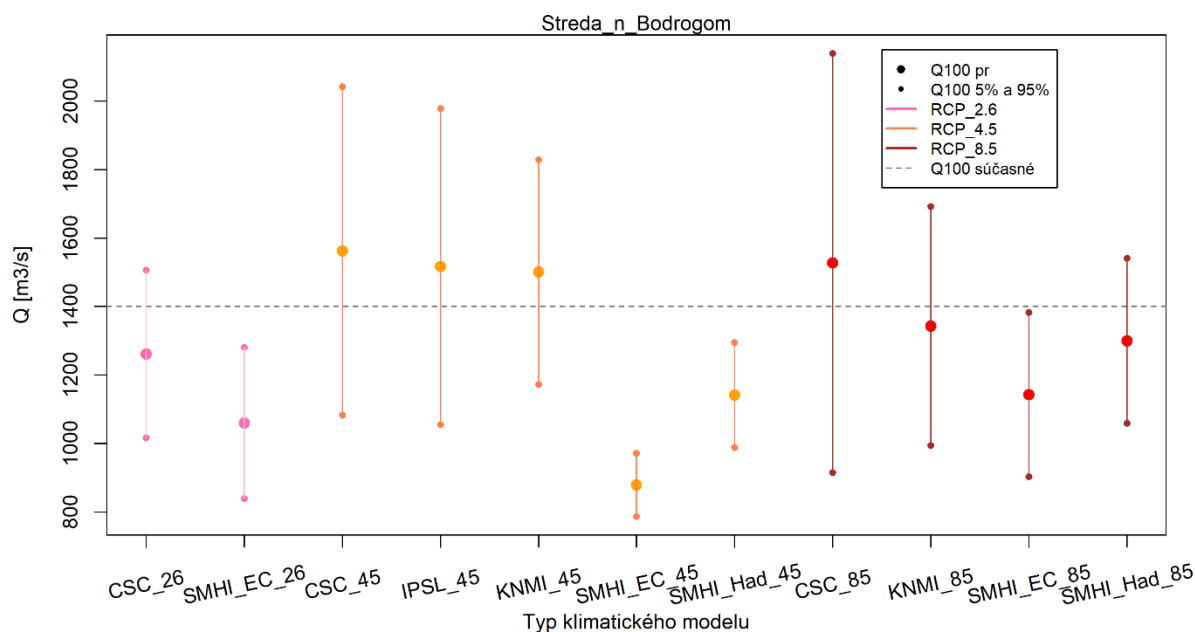
Konečný výber staníc na analýzu impaktu klimatickej zmeny pre Q_{100} bol limitovaný uspokojivým splnením kritérií na testovacom referenčnom období. Na základe stanovených kritérií najlepšie výsledky (mieru zhody) poskytli údaje, ktoré boli korigované metódou škálovania s rozptylom. Ukážka surových

(neupravených) údajov a korigovaných priemerných denných prietokov metódou lineárneho škálovania a škálovania s rozptylom pre stanicu Moravský Sv. Ján je na Obr. 2.



Obr. 2 Krabicové grafy údajov priemerných denných prietokov pre stanicu Moravský Sv. Ján a/ neupravené (surové data), b/ upravené metódou lineárneho škálovania, c/ upravené metódou škálovania s rozptylom. Prvý graf zľava sú pozorované prietoky, ostatné grafy sú výstupy z príslušných klimatických modelov a hydrologického modelu LISFLOOD. Hornou čiarkovanou čiarou je zobrazený momentálne platný Q_{100} , dolnou čiarkovanou čiarou je označený medián pozorovaní.

Pre ilustráciu odhadovaných Q_{100} z jednotlivých klimatických scenárov sú na Obr. 3 zobrazené výsledky pre stanicu Streda nad Bodrogom získané z modelu LISFLOOD. Čiarkovanou čiarou je vyznačený aktuálne platný Q_{100} . V grafe sú farebne odlišené tri rôzne emisné scenáre (RCP2.6, 4.5, 8.5). Okrem priemernej hodnoty odhadu Q_{100} sú zobrazené aj konfidénčné intervaly (5% a 95%), čím je vyjadrená neistota odhadu Q_{100} získaného z frekvenčnej analýzy. Podobne boli získané výsledky pre stanice Bratislava, Moravský Sv. Ján, Ipel'ský Sokolec a Veľké Kapušany z modelov HYPE a LISFLOOD. Pre stanicu Vlkyňa iba z modelu LISFLOOD. Pre stanice Liptovský Mikuláš, Banská Bystrica, Spišské Vlachy a Janík boli získané výsledky z modelu HBV. Pre tieto stanice nezodpovedali hydrologické údaje z modelov HYPE a LISFLOOD stanoveným kritériám zhody, preto bol použitý hydrologický model HBV s klimatickými vstupmi (teploty a zrážky) z databázy SWICCA.



Obr. 3 Zobrazenie odhadov Q_{100} pre stanicu Streda nad Bodrogom na základe simulácie modelom LISFLOOD použitím kombinácie vstupov z klimatických modelov. Na x-ovej osi sú vyznačené jednotlivé behy klimatických modelov pomocou inštitútu a emisného scenára.

Diskusia

Posledné európske štúdie naznačujú, že výskyt povodní a zmeny v ich periodicite záležia predovšetkým od geografickej polohy, veľkosti povodia a podmienok, pri ktorých povodne vznikajú (Blöschl et al., 2019). V malých povodiach sú pre generovanie povodní dôležité predovšetkým krátkodobé konvektívne zrážky s vysokými intenzitami. Naopak v stredne veľkých a veľkých povodiach sa uplatňujú viac dlhšie trvajúce synoptické frontálne zrážky zasahujúce väčšie územie. Z tohto pohľadu je veľkosť povodia dôležitou informáciou.

Výsledky tejto práce ukázali vzostupy Q_{100} vo väčšine staníc. Poklesy sú odhadované len v staniach Chmeľnica, Banská Bystrica a Janík. Povodie Dunaja (k vodomernému profilu Bratislava) a Moravy (k profilu Moravský Sv. Ján) patria medzi najväčšie povodia analyzované v tejto práci. V oboch staniach je indikovaný vzostup Q_{100} , hoci v Moravskom Sv. Jáne len mierny. Výsledky Q_{100} z jednotlivých ansámblov sú pre obidve stanice pomerne konzistentné, t.j. variabilita priemerných Q_{100} je uspokojivá a hydrologické modely dávajú pre jednotlivé klimatické ansamble porovnateľné výstupy z hľadiska počtu vzostupov alebo poklesov. Tretím najväčším povodím je povodie Bodrogu (k vodomernému profilu Streda n. Bodrogom), kde je tiež indikovaný vzostup Q_{100} , avšak údaje z jednotlivých hydrologických modelov neboli úplne konzistentné (model HYPE odhaduje vzostupy zo všetkých 11 ansámblov, model LISFLOOD naopak 6 poklesov z 11).

Pokles Q_{100} bol indikovaný v staniach Banská Bystrica (Hron), Janík (Bodva) a Chmeľnica (Poprad). Medzi stanice s vysokou neistotou odhadu Q_{100} podľa interkvartilového rozsahu CCQ_{100} 59 až 91% patria stanice Veľké Kapušany (Latorica), Ipeľský Sokolec (Ipeľ) a Chmeľnica (Poprad). Táto neistota vyplýva z nekonzistentnosti výstupov z dvoch hydrologických modelov. U staníc Veľké Kapušany a Ipeľský Sokolec model HYPE indikuje viac vzostupov, LISFLOOD naopak poklesov. U stanici Chmeľnica je situácia opačná, prevládajú poklesy z modelu HYPE a vzostupy z modelu LISFLOOD. Výber hydrologického modelu a neistota s ním spojená je v tomto prípade pravdepodobne vyššia ako neistota vyplývajúca z klimatických modelov.

Ďalšou neistotou odhadu Q_{100} môže byť naopak zúžený ansámbl hydrologických modelov u niektorých staníc (Banská Bystrica, Janík, Liptovský Mikuláš, Spišské Vlasy a Vlkyňa). Pretože výstupy zo SWICCA databázy hydrologických modelov pre uvedené stanice nespĺňali požadované kritériá zhody v referenčnom období, bolo potrebné hľadať náhradné riešenie a výstupy k uvedeným staniam boli len z jedného hydrologického modelu. Tu sa ukazuje potreba preveriť odhadnuté Q_{100} ešte ďalšími

hydrologickým modelmi v zmysle filozofie ansámblových predpovedí tak, ako sú tieto bežne používané pri klimatických modeloch alebo inou vhodnou metódou napr. korekciou klimatických ansámblových dát na hydrologické údaje (Hakala et al., 2019).

V našej práci sú povodia s najmenšou plochou Spišské Vlachy (Hornád) a Janík (Ida, povodie Bodva). Podľa veľkosti povodia by sa zdalo, že tieto povodia by mali poskytovať údaje s najvyššou mierou neistoty. Je pravda, že hydrologické údaje z databázy SWICCA (výstupy z modelov LISFLOOD a HYPE) boli pre tieto povodia nepoužiteľné, pravdepodobne aj kvôli hrubému rozlíšeniu hydrologických modelov ku malej ploche týchto povodí (775 a 378 km²). Avšak nakalibrovaný model HBV poskytol hydrologické výstupy pre jednotlivé klimatické ansámble pomerne konzistentné výsledky a podľa interkvartilového rozsahu CCQ₁₀₀ patria tieto dve stanice medzi stanice s najmenšou a strednou neistotou odhadu Q₁₀₀.

Predmetom diskusie ostáva aj využitie momentálne dostupných hydrologických modelov pre impaktové štúdie klimatickej zmeny (Duethmann et al., 2020). Niektorí autori testujú hydrologické modely, nakoľko sú tieto schopné modelovať dáta v iných klimatických podmienkach, než v akých boli nakalibrované (Seibert, 2003, Vaze et al., 2010, Merz et al., 2011, Sleziač et al., 2018). Tieto experimenty je samozrejme možné robiť len na momentálne dostupných meraných údajoch, ktoré môžu byť výsledkom veľmi odlišných podmienok ako v budúcnosti. Avšak aj malé zmeny klímy v kratších časových obdobiach a schopnosť modelu simulovať uspokojivé výstupy pre rôzne takéto obdobia môže byť dobrým indikátorom jeho použiteľnosti v budúcnosti.

Záver

Táto práca poskytuje pohľad na aplikáciu výstupov z klimatických regionálnych modelov a hydrologických modelov získaných z databázy SWICCA (v súčasnosti databáza v Copernicus Climate Change, C3S) pre potreby klimatickej impaktovej štúdie pre odhad Q₁₀₀ v niektorých vodomerných staniách Slovenska. V prvom kroku boli dáta analyzované pre 26 slovenských vodomerných staníc. Takáto rozsiahla analýza údajov z databázy C3S na Slovensku pravdepodobne ešte nebola robená. Výsledky môžu viesť k diskusii o využiteľnosti klimatických a hydrologických údajov z databázy C3S pre slovenské povodia, ich limitoch, ale aj ďalších nových perspektívach. Existuje veľký predpoklad, že budúcnosť si bude vyžadovať častejšiu a podrobnejšiu analýzu posúdenia vplyvu zmeny klímy v rôznych odvetviach, čo bude potrebné zohľadniť v jednotlivých krajinách EÚ. C3S poskytuje konzistentné informácie o zmene klímy. Tieto údaje odporúčame ďalej testovať v regionálnych podmienkach Slovenska. Na základe výsledkov našej práce, odporúčame aplikovať hydrologické údaje z databázy SWICCA prednostne pre veľké a stredne veľké povodia.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0340.

Zdroje

Arora VK., Boer GJ (2001) Effects of simulated climate change on the hydrology of major river basins, In: *Journal of Geophysical research*, číslo 106, s. 3335–3348.

Bertola M, Viglione A, Lun D, Hall J, Blöschl G (2020) Flood trends in Europe: are changes in small and big floods different? In: *Hydrology and Earth System Sciences*, číslo 24 (4), s. 1806–1822.

Blahusiaková A, Matoušková M, Jeníček M, Ledvinka O, Kliment Z, Podolinská J, Snopková Z (2020) Snow and climate trends and their impact on seasonal runoff and hydrological drought types in selected mountain catchments in Central Europe, In: *Hydrological Sciences Journal*, číslo 65 (12), s. 2083–2096.

Blöschl G et al (2019) Changing climate both increases and decreases European river floods, In: *Nature*, číslo 573, s. 108–111.

CLIPC (2018) Climate information portal, glossary. Dostupné na: <http://www.clipc.eu/glossary> (dostupné dňa 24.1.2019).

- Dakhlaoui H, Seibert J, Hakala K (2019) Hydrological Impacts of Climate Change in Northern Tunisia, In: *Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources*, Springer, s. 301–303.
- Duethmann D, Blöschl G, Parajka J (2020) Why does a conceptual hydrological model fail to predict discharge changes in response to climate change? In: *Hydrology and Earth System Sciences*, číslo **24** (7), s. 3493–3511.
- Fendeková M, Poárová J, Slivová V (Eds) (2017) Hydrologické sucho na Slovensku a prognóza jeho vývoja, Vydavateľstvo Univerzity Komenského v Bratislave, 300 s.
- Gaál L (2018) Flood Warnings in a Changing Climate. Full Technical Report, *Copernicus Climate Change Service*, 19 s.
- Gaál L, Lešková D, Kopáčiková E (2017) Predpokladaná zmena 100-ročného prietoku v 21. storočí na rieke Dunaj v Bratislave. In: *Acta Hydrologica Slovaca*, číslo **18** (2), s. 154–164.
- Gao C, Booij MJ, Xu YP (2020) Assessment of extreme flows and uncertainty under climate change: disentangling the contribution of RCPs, GCMs and internal climate variability, In: *Hydrology and Earth System Sciences*, číslo **24** (6), s. 3251–3269.
- González-Zeas D, Garrote L, Iglesias A, Sordo-Ward A (2012) Improving runoff estimates from regional climate models: a performance analysis in Spain, In: *Hydrology and Earth System Sciences*, číslo **16** (6), s. 1709–1723.
- Gupta HV, Kling H, Yilmaz KK, Martinez GF (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. In: *Journal of Hydrology*, číslo **377** (1–2), s. 80–91.
- Hakala K, Addor N, Teutschbein C, Vis M, Dakhlaoui H, Seibert J (2019) Hydrological modeling of Climate Change Impacts. In: *Encyclopedia of Water Science, Technology, and Society*, Wiley & Sons.
- Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, Konoshima L, Yamazaki D, Watanabe S, Kim H, Kanae S (2013) Global flood risk under climate change, In: *Nature Climate Change*, číslo **3**, s. 816–821.
- Hlaváčiková H, Bírová M, Kopáčiková E (2019) Odhad kulminačných prietokov z priemerných denných prietokov. In: *Acta Hydrologica Slovaca*, číslo **20** (1), s. 3–9.
- IMPACT2C (2014) Quantifying projected impacts under 2°C warming, Deliverable D4.1, Report on requested meteorological data and climate change indicators, KNMI, 59 s.
- IMPACT2C (2015) Quantifying projected impacts under 2°C warming, D6.1 Maps showing the climate change impacts, at 1.5 and 2°C For the Water, Energy, and Tourism each sector and for coastal impacts, Wageningen University, 60 s.
- Kopáčiková E, Hlaváčiková H, Lešková D (2020) Climate change impact study on 100-year floods of selected Slovak catchments. In: *Acta Hydrologica Slovaca*, číslo **21** (2), s. 160–171.
- Kopáčiková E, Hlaváčiková H, Lešková D (2021) SWICCA data in climate change impact study on 100-year floods. XXIX. Conference of the Danubian Countries, Sept. 6–7, 2021, Brno, Czech Republic.
- Merz R, Parajka J, Blöschl G (2011) Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses, In: *Water Resources Research*, číslo 47, doi.org/10.1029/2010WR009505.
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models, Part I – A discussion of principles, In: *Journal of Hydrology*, číslo **10** (3), s. 282–290.
- Nijssen B, O'Donnell GM, Hamlet AF, Lettenmaier DP (2001) Hydrologic Sensitivity of Global Rivers to Climate Change, In: *Climate Change*, číslo **50**, s. 143–175.
- Pekárová P, Bačová VM, Pekár J, Miklánek P, Halmová D, Liová S (2018): Historické povodne na území Slovenska a ich význam v hydrológii, Veda, Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 135 s.
- Seibert J (2003) Reliability of model predictions outside calibration conditions, In: *Nordic Hydrology*, číslo **34** (5), s. 477–492.

Sleziak P, Szolgay J, Hlavčová K, Duethmann D, Parajka J, Danko M (2018) Factors controlling alterations in the performance of a runoff model in changing climate conditions, In: *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, číslo **66** (4), s.381–392.

Stahl K, Hisdal H, Hannaford J, Tallaksen LM, van Lanen HAJ, Sauquet E, Demuth S, Fendekova M, Jódar J (2010): Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments, In: *Hydrological Earth System Sciences*, číslo **14** (12), s. 2367–2382.

Teutschbein C (2013) Hydrological Modeling for Climate Change Impact Assessment: Transferring Large-Scale Information from Global Climate Models to the Catchment Scale. Stockholm University, Faculty of Science, Department of Physical Geography and Quaternary Geology, 44 s.

Teutschbein C, Seibert J (2012) Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. In: *Journal of Hydrology*, číslo **456–457**, s. 12–29.

Teutschbein C, Seibert J (2010) Regional Climate Models for Hydrological Impact Studies at the Catchment Scale: A Review of Recent Modeling Strategies. In: *Geography Compass*, číslo **4**, s. 834–860.

van Vuuren DP, Riahi K, Moss R, Edmonds J, Thomson A, Nakicenovic N, Kram T, Berkhout F, Swart R, Janetos A, Rose SK, Arnell N (2012) A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. In: *Global Environmental Change*, číslo **22** (1), s. 21–35.

Vaze J, Post DA, Chiew FHS, Perraud JM, Viney NR, Teng J (2010) Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies, In: *Journal of Hydrology*, číslo **394**, s. 447–457.

Wilcke RAI, Mendlik T, Gobiet A (2013): Multi-Variable Error Correction of Regional Climate Models. In: *Climatic Change*, číslo **120**, s. 871–887.

Povodňové situace roku 2020 pohledem Regionálního předpovědního pracoviště ČHMÚ Ostrava

Alena KAMÍNKOVÁ, Ondřej KOSÍK, Jarmila ŠUSTKOVÁ

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava, K Myslivně 3/2182, 708 00, Ostrava, ČR, email: alena.kaminkova@chmi.cz, ondrej.kosik@chmi.cz, jarmila.sustkova@chmi.cz

Úvod

Včasné a kvalitní informování odborné i laické veřejnosti o aktuálních stavech na tocích, o nebezpečí vzniku povodně a jejím dalším vývoji, patří mezi hlavní cíle Hlásné a předpovědní povodňové služby. Tuto službu na základě vodního zákona zabezpečuje ČHMÚ ve spolupráci s podniky Povodí. Hydrologická předpovědní služba je v rámci územní působnosti pobočky ČHMÚ Ostrava zajišťována prostřednictvím Regionálního předpovědního pracoviště Ostrava (RPP Ostrava), a to pro dílčí povodí horní Odry, horní Moravy po vodoměrnou stanicí Olomouc a povodí Bečvy po profil Dluhonice.

Hlavní náplní hydrologické předpovědní služby ČHMÚ RPP Ostrava je výpočet, interpretace a distribuce modelových hydrologických předpovědí pro celkem 20 vybraných předpovědních profilů na tocích. Na základě těchto výpočtů pak ve spolupráci s meteorologickou předpovědní službou RPP Ostrava navrhuje vydávání výstražných informací na povodňové jevy, které jsou následně distribuovány prostřednictvím Centrálního předpovědního pracoviště ČHMÚ v Praze.

Metodika

Předkládaný příspěvek se zabývá zhodnocením vybraných povodňových epizod roku 2020, úspěšností vydávání výstražných informací a modelových hydrologických předpovědí. Také se zamýšlí nad rolí hydroprognostika v procesu srážkoodtokového modelování a na závěr předkládá možnosti dalšího budoucího vývoje hydrologické předpovědní služby ČHMÚ. Kromě výše uvedeného rovněž poukazuje na povodňové situace, při kterých dochází k největším rozdílům mezi pozorovaným a predikovaným průtokem, a jak je možné tyto situace řešit z hlediska včasného varování před rizikem povodní.

Během roku 2020 byly v reakci na povodňové situace vydávány povodňové zprávy ČHMÚ (Čekal, 2020, Kamínková, 2020c). Na vybrané povodňové situace bylo odkazováno ve vydáních měsíčníku Zpravodaj, který zpracovává ČHMÚ, pobočka Ostrava (Kamínková 2020a, Kamínková 2020b). Shrnutím povodní v červnu 2020 se pak zabývalo první číslo Meteorologických zpráv roku 2021 (Šrámek, 2021, Čekal, 2021). Tento článek na uvedené zprávy navazuje, doplňuje je o informace, které v článcích nezazněly, rozšiřuje je o nové grafické a tabelární výstupy a celkově shrnuje povodně roku 2020 z pohledu RPP Ostrava.

Hodnoty a časy kulminací byly při tvorbě příspěvku vyhodnocovány z operativních hydrologických dat. Uváděné hodnoty průtoků pro jednotlivé SPA jsou hodnoty platné v době proběhlé povodňové epizody. Jednotlivé grafy s hydrologickými předpověďmi jsou zobrazeny pomocí interní prohlížečky vyvinuté na ČHMÚ, pobočka Ostrava, v které lze přepínat a zobrazovat vybrané modelové hydrologické předpovědi (Mrakomor, 2021).

Vývoj nástrojů pro hydrologické modelování na ČHMÚ, pobočka Ostrava

V posledních letech, kdy v územní působnosti pobočky Ostrava nedocházelo tak často k povodňovým událostem, byl prostor k vývoji nástrojů pro hydrologické modelování. V současnosti se stále více obrací pozornost k ansámblovým a variantním meteorologickým vstupům do hydrologických modelů, kdy lze na základě rozptylu předpovědí vycházejících z jednotlivých členů ansámblu či variant výpočtů určit

míru nejistoty hydrologické předpovědi. Také se hledal další vhodný hydrologický model, který by doplnil a rozšířil dosud vydávané předpovědi průtoků prostřednictvím srážkoodtokového modelu HYDROG. V průběhu posledních let byl proto na ČHMÚ RPP Ostrava připraven a nasazen srážkoodtokový model HEC_HMS. Zároveň došlo k rozšíření meteorologických vstupů do obou uvedených hydrologických modelů prostřednictvím exportu dat z databázového systému CLIDATA, modulu SOMDATA (Kosík, 2018).

Výpočet hydrologické předpovědi tedy nově vychází z několika lokálních i globálních meteorologických modelů a jejich ansámbků. Výstupem tak jsou kromě jedné deterministické předpovědi také předpovědi variantní a pravděpodobnostní. Od roku 2019 dochází v rámci řešení projektu MV VI20192021166 „Hydrometeorologická rizika v České republice – změny rizik a zlepšení jejich predikcí“ k implementaci pravděpodobnostních předpovědí vycházejících z ansámblových meteorologických vstupů ALADIN-LAEF a ECMWF-EPS do srážkoodtokového modelu HEC-HMS. V rámci ČHMÚ také pokračuje zavádění platformy FEWS (otevřená platforma pro zpracování hydrometeorologických dat a pro provoz hydrologických modelů), která nabízí další možnosti přístupu k hydrologickému modelování a zobrazování dat a výsledků. Více informací lze nalézt např. na Deltares, 2021.

Srážkoodtokové modely

Historickým vývojem je dáno rozdělení používání srážkoodtokových modelů na ČHMÚ. České pobočky ČHMÚ využívají pro hydrologické výpočty model AQUALOG (Krejčí, 2009), moravské pobočky pak od roku 2001 model HYDROG (Starý, 1997). Pro potřeby testování byl v povodí Bečvy zkušebně nasazen i model AQUALOG, ale není rutinně provozován. Od roku 2013 pak ostravská pobočka postupně zaváděla do provozu další hydrologický model, a to HEC-HMS (USACE, 2020).

Srážkoodtokový model HYDROG je software vyvíjený firmou HYSOFT Brno (Starý, 1997). Tento hydrologický model je od roku 2001 postupně využíván pro tvorbu deterministických, pravděpodobnostních a variantních předpovědí průtoků ve vybraných vodoměrných stanicích na pobočkách ČHMÚ v Brně a v Ostravě. Srážkoodtokový model HYDROG umožňuje manuální, poloautomatický i plně automatický výpočet.

Druhým srážkoodtokovým modelem, který je od roku 2013 na pobočce Ostrava postupně využíván, je model HEC-HMS (USACE, 2020). Tento freewareový model, který je vyvíjen americkou armádou, je verifikován a validován řadou případových studií po celém světě a k dispozici je obsáhlá dokumentace jak ke schematizaci modelu pro dané území, tak pro následný provoz modelu. Samotná schematizace modelu byla realizována pracovníky RPP pobočky ČHMÚ Ostrava. V současné době je model rutinně používán pro výpočet deterministických a variantních předpovědí průtoků pro vybrané předpovědní profily v působnosti pobočky Ostrava a postupně se zavádí také pravděpodobnostní výpočet. Aktuálně je dostupný pouze manuální běh výpočtu modelu.

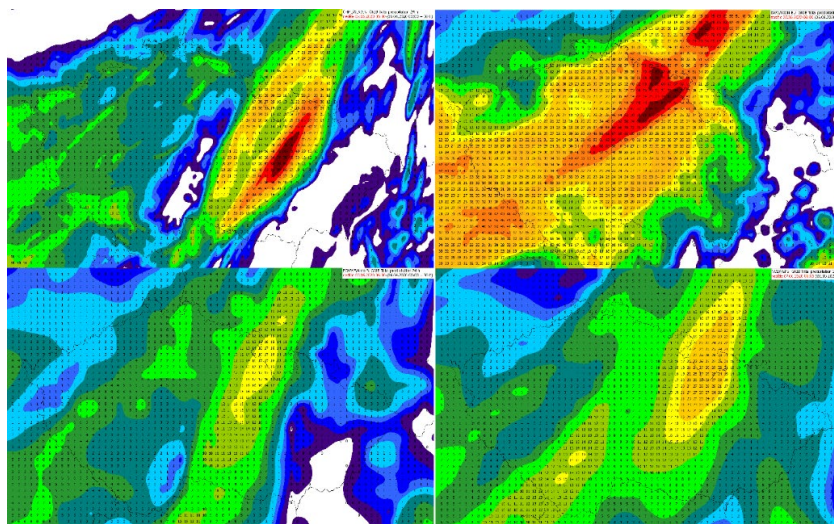
Příprava dat

Meteorologická i hydrologická data potřebná pro výpočet předpovědi průtoků ve vybraných vodoměrných stanicích lze pro všechny používané srážkoodtokové modely na ČHMÚ (AQUALOG, HYDROG, HEC-HMS) vyexportovat z databázového systému CLIDATA, modulu SOMDATA (modul určený pro Srážko Odtokové Modelování), který v jednoduchém uživatelském rozhraní umožňuje nadefinovat propojení měřených a predikovaných dat, tedy jednotlivých prvků spolu s přiřazením konkrétních stanic (Kosík, 2017). V případě meteorologických dat se jedná o srážky, teplotu vzduchu, v zimním období pak o celkovou výšku sněhu a jeho vodní hodnotu. V případě hydrologických dat pak o průtok přepočtený z vodního stavu dle platné měrné křivky průtoků. K měřeným meteorologickým datům SOMDATA automaticky připojují modelové předpovědi z dostupných numerických předpovědních modelů počasí, aktuálně z modelů ALADIN, ICON, ECMWF a GFS včetně 16 ansámbků ALADIN-LAEF a 50 ansámbků ECMWF-EPS, přičemž první 3 hodiny předpovědi srážek je možno nahradit předpovědí jejich pohybu dle odrazů z meteorologických radarů. Pro potřeby zahrnutí plánovaných manipulací na nádržích ve správě podniků Povodí do hydrologických výpočtů jsou pak k měřeným průtokům automaticky připojovány předpovědi odtoků.

Možnosti meteorologických vstupů

Stejně jako srážkoodtokové modely, tak i meteorologické vstupy do těchto modelů prošly během posledních několika let svým vývojem. Konkrétně došlo k posunu od využívání jednoho modelového vstupu srážek a teploty vzduchu pro výpočet deterministické předpovědi průtoků až po rozšíření na čtyři variantní modelové vstupy včetně ansámblů.

Deterministická předpověď průtoků poskytuje pouze jeden předpoklad vývoje průtoků na tocích na předem určené období. Mezi výhody této předpovědi patří jednoduchost a srozumitelnost podávaných informací a jejich snadná interpretace. Nevýhodou je pak chybějící vyjádření nejistoty této hydrologické předpovědi. Primárním zdrojem dat pro srážkoodtokové modelování je meteorologický model ALADIN (CNRM, 2021). Od roku 2016 pak byly přidány na pobočce Ostrava další 3 varianty numerických meteorologických modelů, tzn. 3 varianty predikovaných srážek a teplot. Jednalo se o predikované srážky a teplotu vzduchu z lokálního meteorologického modelu ICON–EU (DWD, 2021) a z globálních meteorologických modelů GFS (NOAA, 2021) a ECMWF (ECMWF, 2021). Ukázka srážkových úhrnů je uvedena na 0. Data z modelu ALADIN, ICON–EU a GFS se využívají pro predikci průtoků s předstihem 66 hodin, z modelu ECMWF pak s předstihem až na 240 hodin. Výsledkem jsou pak celkem čtyři varianty deterministických předpovědi průtoků pro konkrétní profil na toku.



Obr. 1 Předpovídané 24hod srážkové úhrny z termínu 6. června 2020 2 hodin SELČ (model ALADIN, ICON–EU, ECMWF, GFS)

Jak už bylo uvedeno výše, výsledky deterministické předpovědi průtoků nepostihují míru nejistoty hydrologické předpovědi. V posledních letech se proto stále více přistupuje k pravděpodobnostním hydrologickým předpovědím, které tuto nejistotu vyjadřují. Na rozdíl od deterministické předpovědi však může být interpretace výsledků poměrně složitější.

Pravděpodobnostní předpovědi průtoků se počítají na základě ansámblových vstupů srážek a teplot, kdy se jednotlivé členy ansámblů navzájem odlišují nepatrně rozdílnými počátečními podmínkami. Při výpočtu srážkoodtokového modelu se vychází z nastavení poslední vypočtené hydrologické deterministické předpovědi. RPP Ostrava využívá pro pravděpodobnostní modelování ansámblové vstupy ze dvou meteorologických modelů. Od roku 2012 využívá pro krátkodobou předpověď (na 48 nebo 66 hodin) ansámblы předpovědního systému ALADIN–LAEF, který je tvořen 16 běhy, spolu s jedním kontrolním během. Více informací např. Belluš, 2019.

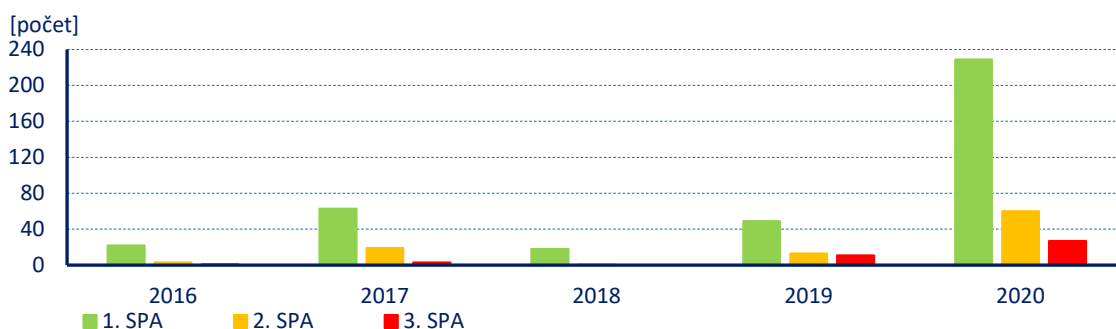
Od roku 2019 se na RPP pobočky Ostrava začaly využívat vstupy z ansámblového předpovědního systému ECMWF–EPS (ECMWF, 2012). Tyto vstupy slouží pro výpočet střednědobé předpovědi průtoků (10 dnů). Vstupními daty do srážkoodtokových modelů je zde 50 variant srážek a v zimním období také 50 variant teploty vzduchu. Tyto výpočty se testují pomocí srážkoodtokového modelu HYDROG v zaváděné platformě FEWS a zároveň v rámci již zmiňovaného projektu Ministerstva vnitra VI20192021166 „Hydrometeorologická rizika v České republice – změny rizik a zlepšení jejich predikcí“, jehož jedna část se zabývá vyhodnocením a interpretací výsledků předpovědi průtoků

založených na ansámblových meteorologických vstupech ze srážkoodtokového modelu HEC-HMS. Výsledky výpočtů průtoků pomocí ansámblových vstupů ECMWF–EPS zatím nejsou poskytovány veřejnosti, slouží však jako jeden z podkladů při rozhodování a tvorbě výstražných informací na RPP Ostrava.

Povodňové situace roku 2020

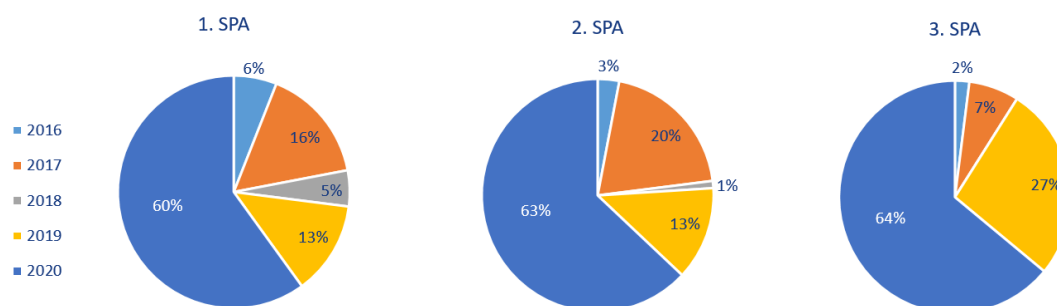
Rok 2020 byl srážkově velmi bohatý a byl velmi odlišný od let, které mu předcházely. S ročním srážkovým úhrnem 764 mm jej řadíme mezi roky srážkově nadnormální (normál za období 1981 až 2010 je v České republice 686 mm). Měsíc červen se řadí mezi měsíce mimořádně nadnormální (spadlo v průměru 151 mm srážek, což je 191 % normálu), měsíce únor a říjen byly silně nadnormální a měsíce srpen a září nadnormální. Červenec a prosinec byly podnormální a leden, duben a listopad pak silně podnormální. Pouze měsíce březen a květen byly srážkově normální (Tolasz, 2021).

Během roku 2020 se v územní působnosti ČHMÚ, pobočky Ostrava vyskytly různé typy povodňových situací. V únoru se jednalo o povodně způsobené táním sněhu v kombinaci s dešťovými srážkami, v červnu o povodně způsobené přívalovými srážkami a také o povodně způsobené regionálními déletrvajícími dešti. Tento poslední typ povodní se vyskytl také v měsíci říjnu. Dále se v rámci dílčích povodí velmi často vyskytovaly i menší povodňové epizody. Žádný SPA nebyl zaznamenán pouze v průběhu měsíců ledna, března a dubna. Odlišnost roku 2020 od předchozích let je znázorněna na 0, kde jsou uvedeny počty překročení 1., 2. a 3. SPA ve vodoměrných stanicích na území pobočky ČHMÚ Ostrava v letech 2016 až 2020.



Obr. 2 Počet překročení 1., 2. a 3. SPA ve vodoměrných stanicích ČHMÚ, pobočky Ostrava v letech 2016–2020

Také z koláčových grafů na 0 vyplývá, že se na území působnosti pobočky Ostrava v roce 2020 vyskytlo kolem dvou třetin všech případů překročení 1., 2., i 3. SPA za posledních pět let. V roce 2018 bylo dosaženo nejmenší množství SPA a 3. SPA dokonce nebyl překročen ani v jednom případě.



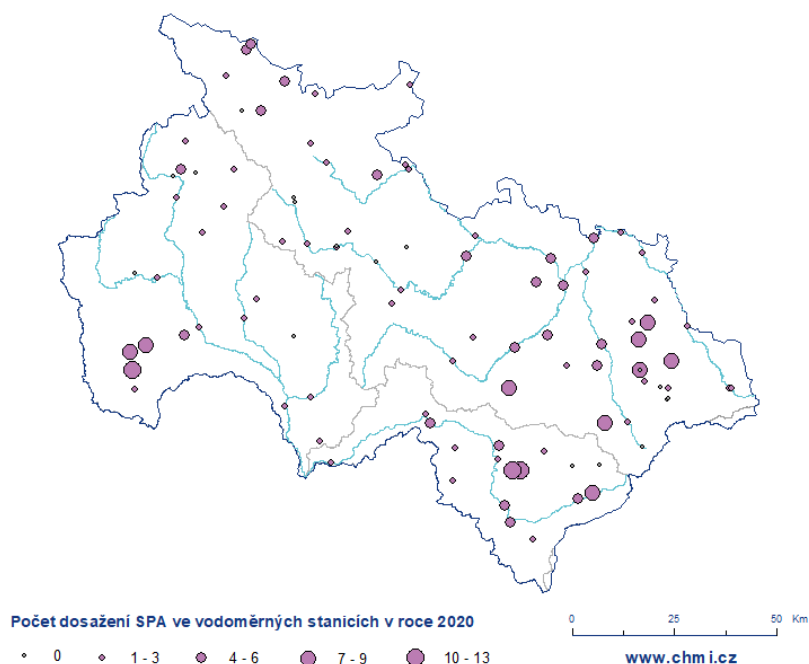
Obr. 3 Procentuální zastoupení výskytu SPA v rámci ČHMÚ, pobočky Ostrava v letech 2016–2020

Ještě detailněji se dosažením nejvyššího SPA, a to v průběhu jednotlivých měsíců posledních pěti let, zabývá 0. Především její pravá část, kde jsou uvedeny měsíce s dosažením SPA alespoň ve třech vodoměrných profilech, poukazuje na zvýšení povodňové aktivity v roce 2020.

Tab. 1 Nejvyšší dosažený SPA ve vodoměrných profilech ČHMÚ, pobočky Ostrava v období 2019–2020 (vlevo), vpravo stejné hodnocení, ale pouze pro měsíce, kde byl SPA dosažen alespoň ve třech vodoměrných profilech

	2016	2017	2018	2019	2020		2016	2017	2018	2019	2020
leden						leden					
únor						únor					
březen						březen					
duben						duben					
květen						květen					
červen						červen					
červenec						červenec					
srpen						srpen					
září						září					
říjen						říjen					
listopad						listopad					
prosinec						prosinec					

Žádný SPA nebyl dosažen ani v jednom vodoměrném profilu pouze v měsících lednu, březnu a dubnu. Během června a října se SPA vyskytovaly na většině profilů v celém sledovaném regionu. Velmi často byly SPA překročeny u pravostranných přítoků Odry a v povodí Bečvy a Třebůvky (0). V některých vodoměrných stanicích zde byl během roku 2020 SPA dosažen dokonce 10 až 13krát. Ve východní části regionu se projevil značný vliv návětrí Beskyd, v povodí Třebůvky často hrálo roli vysoké nasycení půdy v kombinaci s vydatnými srážkami.



Obr. 4 Četnost dosažení SPA ve vodoměrných profilech ČHMÚ, pobočky Ostrava v roce 2020

Pro další zpracování byly vybrány nejvýznamnější povodňové epizody roku 2020. Tyto epizody jsou charakterizovány extremitou (7. až 8. června 2020), plošným rozsahem (19. až 23. června 2020, 29. až 30. června, 12. až 20. října 2020) nebo kombinací více faktorů (např. tání sněhu v kombinaci se srážkami) vedoucím k povodňové situaci (4. až 5. února 2020).

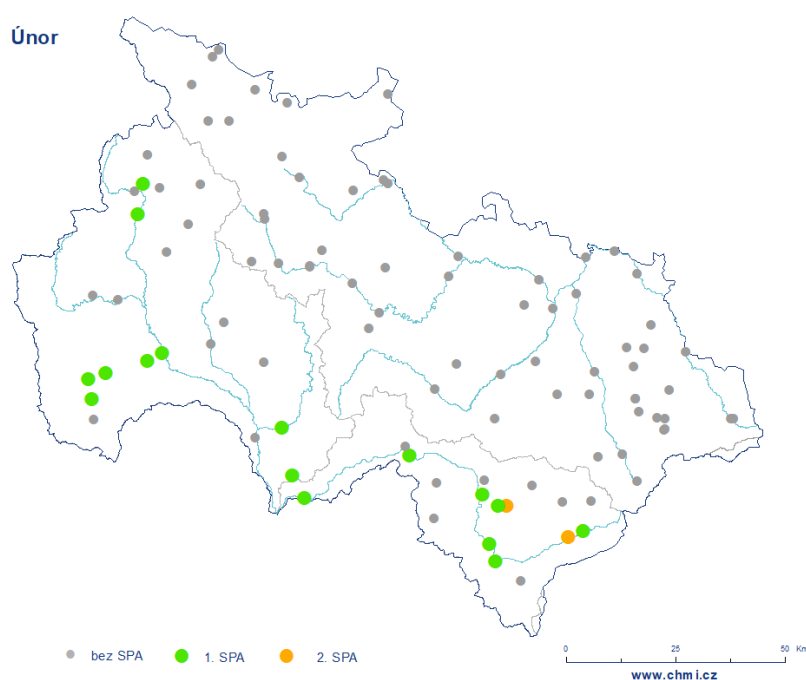
Povodně z tání (4. až 5. února 2020)

V měsíci únoru se vyskytla povodňová situace, která vznikla v důsledku tání sněhové pokrývky a dešťových srážek. Hladiny vodních toků zvolna stoupaly vlivem postupného tání sněhové pokrývky již na přelomu ledna a února. Do poloviny první dekády pak přes naše území postupně přecházely jednotlivé frontální systémy, na kterých se vyskytovaly četné dešťové nebo sněhové srážky. Kombinace

nasycenosti území po předchozím tání sněhu, dešťových srážek, silného větru a pokračujícího tání sněhové pokrývky zapříčinily výrazné vzestupy hladin vodních toků dne 4. února 2020 v celém sledovaném území. Hladiny toků v povodí Odry stoupaly bez dosažení SPA. V povodí horní Moravy a Bečvy pak dosáhly 1. SPA, ojediněle 2. SPA (0).

V povodí horní Moravy se v tomto období nejvíce zvedaly hladiny toků v povodí Třebůvky, kde byl 4. února překročen 1. SPA na Jevíče v profilu Chornice a na Třebůvce v profilech Hraničky, Mezihorí a Loštice. 1. SPA byl překročen také na tocích Bystřice v profilu Velká Bystřice a Olešnice v profilu Kokory. Dne 4. února v nočních hodinách pak byl dosažen 1. SPA na toku Moravy v profilu Moravičany.

V povodí Bečvy byly nejvýraznější vzestupy zaznamenány v povodí Vsetínské Bečvy, kde byl 4. února postupně překročen 1. SPA na většině profilů a 2. SPA v profilech Bystřička nad nádrží (Bystřička) a VD Karolinka (Velká Stanovnice). Na samotném toku Bečvy byl překročen 1. SPA v profilech Teplice nad Bečvou a Dluhonice. Vzestupy hladin v povodí Rožnovské Bečvy byly také výrazné, ale vlivem dřívějšího ochlazení a přechodu dešťových srážek ve sněžení nedosáhly úrovně SPA. Na konci měsíce února pak došlo k podobné situaci v období 23. až 26. února (tání sněhu v kombinaci s dešťovými srážkami), ale 1. SPA byl dosažen pouze ojediněle.



Obr. 5 Nejvyšší dosažené SPA ve vodoměrných profilech ČHMÚ, pobočky Ostrava v měsíci únoru roku 2020

Přivalové povodně (7. a 8. června 2020)

Nejvýznamnější povodňovou situací vyvolanou přivalovými srážkami byla situace z období 7. a 8. června 2020 v povodí horní Moravy, Bělé a Moravice. Mezi nejpostiženější oblasti patřilo Uničovsko a Šumpersko. Povodňová vlna zde byla charakterizována velmi rychlým nástupem, spolu s překročením 3. SPA. Z hlediska vodnosti a nasycenosti území byla nejpostiženější oblast (povodí Oslavy a Oskavy) charakterizována před povodňovou událostí průměrnými denní průtoky v rozmezí 25–30 % Q_{VI} a slabou až velmi slabou nasyceností.

Dne 7. června bylo naše území ovlivněno zvlněným frontálním rozhraním s labilní a vlhkou vzduchovou hmotou nad střední Evropou. První bouřky se začaly vytvářet již brzy odpoledne v pásu od jižních Čech přes Českomoravskou vrchovinu až po severovýchodní Moravu a Slezsko. Jednotlivé bouřky postupovaly od jihu k severu a intenzita zaznamenaných srážkových úhrnů se pohybovala převážně mezi 5 až 20 mm za hodinu (Šrámek, 2021). Již při této srážkové epizodě byly zaznamenány vzestupy hladin vodních toků v povodí Moravské Třebové, zejména vlivem intenzivní srážkové činnosti v oblasti Hoštejna. K dosažení 1. SPA v profilu Hoštejn (Březná) chyběly 2 cm. Po kulminaci následoval rychlý pokles hladiny.

Po 17:00 SELČ začalo docházet k výraznější organizovanosti bouřek v pásu od Třebíčska po Jeseníky. Mezi 19:00 a 22:00 SELČ pak začalo (zejména na Uničovsku) docházet k tzv. „řetězení“ bouřkové aktivity, kdy jednotlivé bouřky začaly postupovat opakovaně přes stejnou lokalitu. V tomto krátkém časovém úseku byly na Uničovsku zaznamenány srážkové úhrny kolem 80 mm, na stanici Oskava 77,5 mm (Šrámek, 2021).

Vlivem takto intenzivních srážkových úhrnů začalo ve večerních hodinách docházet k rychlým výrazným vzestupům hladin. Nejprve byl překročen 1. SPA v profilu Chornice (Jevíčka) v 19:30 hodin. Následovalo dosažení 1. SPA v profilu Sobotín (Merta) ve 20:50 hodin. Během 30 minut hladina vodního toku v tomto profilu stoupla z 1. SPA na 3. SPA (21:20 hodin). Mezitím dosáhla 1. SPA také Oslava v Dlouhé Loučce (21:10 hodin). I zde byl nástup povodňové vlny velmi rychlý. Během 20 minut vystoupala hladina na 2. SPA (21:30 hodin) a za dalších 30 minut pak na 3. SPA (22:00 hodin). O rychlosti vzestupu vodních toků svědčí také dosažení 2. SPA v profilu Kouty nad Desnou (Desná) ve 21:50 hodin bez dosažení 1. SPA a následně za 20 minut (ve 22:10) byl dosažen 3. SPA. V profilu Uničov (Oskava) došlo k překročení 3. SPA dne 8. června v 03:20 hodin. Ke kulminacím vodních toků docházelo u většiny profilů do půlnoci, kdy následoval rychlý pokles hladin. Pouze v profilu Uničov (Oskava) byl nástup i pokles povodňové vlny pozvolnější (3. SPA v tomto profilu trval 13 hodin).

K rychlým a výrazným vzestupům hladin vodních toků docházelo také v povodí Bělé a v horních částech povodí Moravice. Vzestupy hladin zde ale nebyly tak výrazné jako v povodí Desné a Oslavy. Dne 7. června byl překročen 1. SPA na Bělé v profilech Jeseník a Mikulovice a v profilech Rýmařov (Podolský potok) a Valšov (Moravice). 2. SPA pak byl dosažen dne 8. června v profilu Velká Štáhle (Moravice).

Povodně z trvalých srážek (19. až 23. června 2020, 29. až 30. června, 12. až 20. října 2020)

Další povodňové situace v měsíci červnu byly způsobeny srážkami trvalejšího charakteru spolu s četnými bouřkami. Vyskytovaly se v období 19. až 23. června v povodí Odry a Bečvy a 29. až 30. června v povodí Odry a horní Moravy. Vzhledem k velkému nasycení území vlivem předchozích srážek docházelo v těchto obdobích k výrazným vzestupům hladin vodních toků. Meteorologické zhodnocení lze nalézt v Šrámek (2021) a Čekal (2020) nebo Kamínková (2020a).

Dne 19. června byl překročen 3. SPA v profilu Nový Jičín (Jičínka) a Bystřička nad nádrží (Bystřička). V tomto profilu byl 3. SPA v období 19. až 21. června překračován opakovaně. 2. SPA pak byl překročen v profilech napříč povodím Odry, na Černém potoce ve Velké Kraši, Černé Opavě v Mnichově, dále pak na Stonávce v Hradišti, Morávce ve Vyšních Lhotách, Ropičance v Řece, Jičínce v Novém Jičíně a také v závěrovém profilu Bohumín na Odře. V povodí Bečvy pak v profilu VD Bystřička (Bystřička) a Teplice nad Bečvou (Bečva). Nejnižší, 1. SPA, pak byl překročen na řadě profilů v rámci povodí Odry a Bečvy. Bečva v Dluhonicích kulminovala na úrovni 1. SPA, Odra v Bohumíně, jak již bylo řečeno výše, na úrovni 2. SPA.

Na konci června pak proběhla poslední povodňová epizoda v tomto měsíci. Zasáhla povodí Odry, zejména oblast Ostravska, a také povodí horní Moravy. Povodňové situace v tomto období byly způsobeny jak bouřkovou činností, tak následnými srážkami, spolu s extrémním nasycením území. Na řadě míst v povodí Odry docházelo k opětovnému překročení 1. SPA, v profilu Vřesina na Porubce pak o opakované překročení 2. SPA. V povodí horní Moravy byla nejhorší situace na toku Třebůvky, kde byly překročeny 3. SPA v profilech Hraničky, Mezihoří a Loštice a na samotném toku Moravy v Moravičanech. V povodí Jevíčky a Oskavy byl překročen 2. SPA a na dalších profilech v povodí horní Moravy byly dosaženy 1. SPA. Morava v Olomouci pak kulminovala na přelomu června a července bez dosažení SPA.

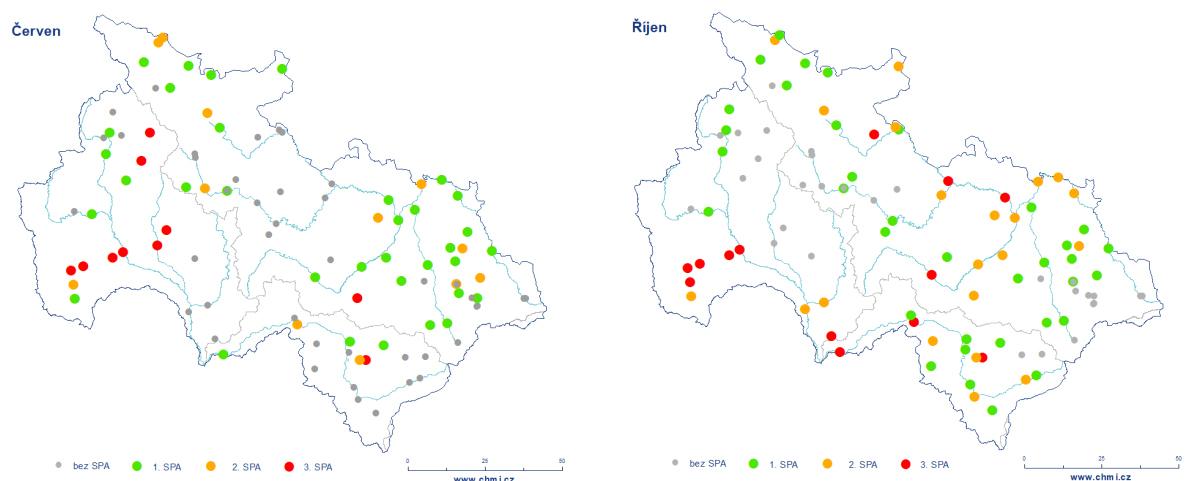
Po menších povodňových epizodách v měsících srpnu a září, kdy bylo zasaženo menší území a v žádném profilu nebyl dosažen 3. SPA, nastala další rozsáhlejší povodňová situace v měsíci říjnu. V období od 12. do 20. října 2020 byla opět zasažena většina území spadající pod ČHMÚ pobočku Ostrava a na řadě toků byl dosažen 2. a 3. SPA. Tato povodňová situace byla způsobena frontálním rozhraním, které přinášelo do celé střední Evropy počasí s velkou oblačností a postupně také i poměrně vydatné srážkové úhrny. Detailnější zhodnocení meteorologické situace lze nalézt na Kamínková, 2020c. Spolu se silným až velmi silným nasycením území začaly hladiny vodních toků stoupat v celém sledovaném regionu.

Toky začaly dosahovat 1. SPA již 12. října během ranních a dopoledních hodin. Po přechodném poklesu docházelo k opětovným vzestupům, tentokrát již s dosažením 2. a 3. SPA dne 13. října. V povodí Odry docházelo k vzestupům na 3. SPA v profilu Radim na toku Krasovka již 13. října, o den později pak byl 3. SPA překročen v profilu Odry na Odře a v profilech Opava a Děhylov na Opavě. Na řadě dalších toků v povodí Olše, Odry, Opavy a Osoblahy pak byl překročen 2. SPA. Vodní toky kulminovaly ve většině případů dne 14. října, v dolních částech povodí pak vlivem dotoku o den později. Následovaly jen velmi pozvolně poklesy hladin pod SPA. Opava v Děhylově podkročila 1. SPA až 22. října.

Také v povodí horní Moravy začaly vodní toky překračovat 1. SPA dne 12. října, a to v povodí Třebůvky. Opětovné vzestupy, tentokrát již s dosažením 2. a 3. SPA byly zaznamenány dne 13. října v profilu Hraničky na Třebůvce, 14. října pak by 3. SPA překročen i v dalších profilech v povodí Třebůvky kromě profilu Jaroměřice, kde Úsobrný potok kulminoval na úrovni 2. SPA. 3. SPA pak byl postupně dosažen také v profilech Moravičany (Morava) a Kokory (Olešnice). Morava v Olomouci kulminovala dne 16. října pod úrovní 3. SPA. SPA byly v povodí Moravy překročeny na většině profilů, kromě vodních toků v povodí Desné, Oskavy a Sitky.

Také v povodí Bečvy byly v tomto období zaznamenány vzestupy nad 3. SPA. Vzestupy hladin měly podobný průběh jako v povodí Odry a horní Moravy. Po vzestupech na 1. a 2. SPA dne 12. a 13. října byl dne 14. října překročen 3. SPA v profilech Bystřička nad nádrží (Bystřička), Teplice nad Bečvou (Bečva) a Dluhonice (Bečva). Celkem došlo k překročení SPA ve více než 85 % všech profilů v povodí Bečvy.

Nejvyšší dosažené SPA v jednotlivých profilech v červnu a říjnu roku 2020 jsou uvedeny na 0. Seznam profilů s dosažením 3. SPA během roku 2020 pak v 0.



Obr. 6 Nejvyšší dosažené SPA ve vodoměrných profilech ČHMÚ, pobočky Ostrava v měsíci červnu (vlevo) a říjnu roku 2020

Tab. 2 Kulminační průtoky v profilech s dosažením 3. SPA v roce 2020 v územní působnosti ČHMÚ, pobočky Ostrava

Stanice	Tok	Den	Hodina	Stav	Průtok	m/N	SPA
Nový Jičín	Jičínka	19. 6.	06:10	271	53,9	2	3
Kouty nad Desnou	Desná	7. 6.	22:20	180	26,9	<2	3
Sobotín	Merta	7. 6.	21:50	177	26,1	10	3
Dlouhá Loučka	Oslava	8. 6.	00:00	247	28,5	20	3
Uničov	Oskava	8. 6.	07:30	331	57,6	20	3
Moravičany	Morava	30. 6.	05:10	304	124	<2	3
Mezihoří	Třebůvka	29. 6.	15:50	183	34,5	10	3
Hraničky	Třebůvka	29. 6.	17:10	195	46,2	5	3
Loštice	Třebůvka	30. 6.	00:20	230	58,7	2	3
Bystřička nad nádrží	Bystřička	19. 6.	12:50	80	20,9	<2	3

Bystřička nad nádrží	Bystřička	21. 6.	00:40	90	24,6	2	3
Bystřička nad nádrží	Bystřička	21. 6.	07:10	92	25,4	2	3
Odry	Odra	14. 10.	15:20	288	101	5	3
Radim	Krasovka	14. 10.	06:50	185	6,14	–	3
Opava	Opava	14. 10.	19:00	377	192	10	3
Děhylov	Opava	15. 10.	02:40	398	273	5	3
Moravičany	Morava	15. 10.	13:00	320	138	2	3
Mezihoří	Třebůvka	14. 10.	10:50	187	33	20	3
Chornice	Jevíčka	14. 10.	09:10	183	27,2	10	3
Hraničky	Třebůvka	14. 10.	16:00	212	53	10	3
Loštice	Třebůvka	14. 10.	22:00	263	75,7	5	3
Kokory	Olešnice	14. 10.	18:20	304	19,3	5	3
Bystřička nad nádrží	Bystřička	14. 10.	04:40	83	22	<2	3
Teplice	Bečva	14. 10.	14:40	453	435	2	3
Dluhonice	Bečva	15. 10.	05:30	589	524	5	3

Zhodnocení vydávání výstražných informací

ČHMÚ, dle vodního zákona, zajišťuje Hlásnou a předpovědní povodňovou službu ve spolupráci se správci povodí. Předpovědní povodňová služba ČHMÚ zahrnuje i výstražnou službu, která je začleněna do tzv. Systému integrované výstražné služby (SIVS, 2021). SIVS byl zaveden v únoru 2000 a postupně byl během let inovován.

Významnou změnu ve vydávání výstražných informací přinesl rok 2019, kdy se přešlo na nový systém vydávání výstrah ve formě protokolu CAP. CAP, neboli Common Alerting Protocol – všeobecný výstražný protokol, je mezinárodně uznávaný formát souboru k výměně dat o nebezpečných událostech (CAP, 2021). Příprava a vydávání všech výstražných informací se od 29. května 2019 nově vytváří v modulu Alert Editor, který je součástí programu VisualWeather od firmy IBL (IBL, 2021). Mezi hlavní změny patří vydávání výstražných informací na úroveň obcí s rozšířenou působností (ORP) místo okresů. Výstrahy se vydávají na nebezpečné meteorologické a hydrologické jevy rozdělené do skupin jevů. Každý z definovaných nebezpečných jevů (např. teplota, vítr, dešťové srážky atd.) pak může mít rozdílnou úroveň nebezpečí. V rámci SIVS se vydávají dva druhy výstražných informací. Výstražná informace (VI) a Výstražná informace na výskyt jevu (P=100%).

Rok 2020 byl odlišný nejen z pohledu dosažení SPA ve vodoměrných profilech, ale také z pohledu vydávání VI. Srovnání VI je z důvodu k přechodu na nový systém vydávání VI provedeno jen vzhledem k roku 2019.

V průběhu roku 2020 bylo v územní působnosti ostravské pobočky ČHMÚ vydáno celkem 44 VI, které obsahovaly výstrahy na povodňové jevy (v roce 2019 jich bylo pro srovnání vydáno celkem 11). Výrazně více bylo vydáno také VI na pozorovaný jev (dosažení 3. SPA v profilu na toku s P=100%), a to celkem 29 (v roce 2019 to bylo pro srovnání jen 9).

Povodně z tání (4. a 5. února 2020)

Jak již bylo uvedeno v kap. 4.1, na začátku února se vyskytla povodňová situace v povodí horní Moravy a Bečvy. Tato povodňová situace ale nebyla podchycena vydáním výstražné informace.

Při rozhodovacím procesu o vydání či nevydání VI na povodňovou bdělost se dne 4. února vycházelo z modelových předpovědí jak deterministických (z meteorologických modelů ALADIN, ICON, GFS a ECMWF), tak z ansámblových (ALADIN-LAEF). Výpočty naznačovaly výrazné vzestupy hladin, ale bez dosažení SPA. Předpokládalo se také dřívější přechod dešťových srážek ve sněhové. Proto nakonec nebylo přistoupeno k vydání VI. Ta se nakonec nevydala ani se zpožděním, kdy na tocích již 1. SPA byly dosaženy, protože nebyl předpoklad k dalšímu zhoršování situace a správně se předpokládalo postupné ochlazování, přechod dešťových srážek ve sněhové a postupné kulminace hladin.

Na konci měsíce nastala podobná situace dne 23. února. Také se předpokládaly vzestupy hladin vodních toků z důvodu tání sněhové pokrývky a výskytu dešťových srážek. Proto, i s ohledem na situace na začátku měsíce, byla vydána VI na povodňovou bdělost pro západní část území. Tato situace ale byla nakonec nadhodnocena a 1. SPA byl překročen pouze v profilu Habartice na toku Krupá.

Přivalové povodně (7. a 8. června)

Možnosti hydrologických předpovědí jsou vzhledem k charakteru povodňové situace, která vznikne v důsledku intenzivních přivalových srážek krátkého trvání, velmi omezené. Limitujícím faktorem je většinou malá plocha zasaženého území spolu s velmi rychlým nástupem povodňové vlny a rychlým odtokem také mimo trvalou říční síť. Povodňová vlna se pak ve vodoměrných profilech, pro které je počítána hydrologická předpověď, nemusí projevit. Ve většině případů se proto vydává VI na silné nebo velmi silné bouřky a VI na povodňové jevy je následně vydávána nebo aktualizována podle vývoje situace.

Předpovědní služba ČHMÚ upozornila na očekávanou bouřkovou situaci již 6. června 2020 v dopoledních hodinách vydáním VI na silné bouřky s očekávanými srážkovými úhrny kolem 35 mm v pásu od jihu Čech, Českomoravskou vrchovinu, Pardubický, Olomoucký, Moravskoslezský a Zlínský kraj (s vybranými menšími částmi kraje Jihomoravského). V neděli 7. června 2020 v dopoledních hodinách pak byla vydána VI na velmi silné bouřky s očekávanými srážkovými úhrny kolem 55 mm pro oblast Vysočiny a vybrané části Pardubického, Olomouckého, Moravskoslezského a Jihomoravského kraje.

Vydání VI na povodňové jevy vycházelo z výsledků hydrologického modelování. V tomto období byla hydrologická předpověď počítána nejen k 6. hodině ranní, ale také ke všem termínům vydání nového výpočtu meteorologického modelu ALADIN (12, 18 a 00 hodin). Z vypočtených výsledků byla patrná velká nejistota jak prostorového rozložení srážek, tak časového. Na základě podkladů z jednotlivých srážkoodtokových modelů jak deterministických (ALADIN, GFS, ECMWF, ICON), tak ansámblových modelů (ALADIN–LAEF) a také podle upřesnění srážkových úhrnů meteorologem RPP Ostrava, proto bylo rozhodnuto o vydání VI na povodňové jevy již dne 6. června 2020 s platností od 7. června 2020 6 hodin pro vybraná ORP v Olomouckém (Jeseník, Mohelnice, Šumperk, Zábřeh) a Pardubickém kraji (Králíky, Lanškroun, Moravská Třebová). Při aktualizaci výstrah dne 7. června pak byla tato VI ponechána v platnosti beze změn. V později nejvíce zasaženém ORP Uničov byla v platnosti pouze VI na silné a později velmi silné bouřky. V tomto ORP není vydávána hydrologická předpověď pro žádný profil na toku.

O přidání tohoto ORP a zároveň zvýšení VI na povodňovou pohotovost pak bylo rozhodnuto 7. června ve večerních hodinách. Následně se pro profily s dosaženým 3. SPA vydávaly VI na výskyt jevu (P=100%). Bohužel rychlost nástupu povodňové vlny při povodních tohoto typu ve většině případů neumožňuje reagovat na vzniklou situaci s dostatečným předstihem.

Povodně z trvalých srážek (19. až 23. června 2020, 29. až 30. června, 12. až 20. října 2020)

Na rozdíl od situace výše, charakter povodňových situací v této kapitole umožňuje vydávání VI na povodňové jevy s dostatečným předstihem a pružněji reaguje na změnu situace v jednotlivých povodích. Také VI na výskyt jevu (P=100%) byla ve většině případů vydána s předstihem, tedy před dosažením 3. SPA.

Na začátku druhé dekády měsíce června proběhla významnější povodňová epizoda, která byla tentokrát způsobena plošně rozsáhlejšími srážkami. Na tuto situaci bylo upozorněno vydáním VI na povodňové jevy již 18. června s platností od 18. června 15 hodin do odvolání. Jednalo se o VI na povodňovou pohotovost na západní část území a povodňovou bdělost pro zbytek území. Tato VI byla následující den upravena podle vývoje situace a výsledků výpočtů hydrologických modelů. Vzhledem ke zhoršující se situaci na východě území bylo rozhodnuto o vydání VI na povodňovou pohotovost na zbývající část území. Naopak v povodí horní Moravy byla VI snížena na povodňovou bdělost. Zároveň byla v textu uvedena možnost ojedinělého překročení 3. SPA na menších tocích. Následující dny byla VI ponechána beze změn. Den 22. června pak již byla VI upravena podle stávající situace a bylo uvedeno ukončení platnosti VI.

Následující povodňová situace proběhla v posledních dnech měsíce června. Také při této situaci byla VI vydána s denním předstihem. Opět byla vydána VI na povodňovou pohotovost pro západní část území a VI na povodňovou bdělost pro zbytek území kromě povodí Olše, Ostravice a Vsetínského a Rožnovské Bečvy. Dne 29. června byla VI ponechána v platnosti, následující den byla upravena podle aktuální situace a zároveň došlo ke stanovení konce platnosti.

Další významnější, co do plošného rozsahu i počtem překročení 3. SPA, byla povodňová epizoda trvající od 12. do 20. října 2020. Vzhledem k charakteru této povodňové situace bylo možné VI vydat s dostatečným předstihem. Na možnost vydatných srážek spolu s možností překročení SPA na tocích v týdnu od 12. října bylo upozorněno již 11. října vydáním tzv. výhledu. První VI na povodňové jevy pak byla vydána dne 12. října. Jednalo se o VI na povodňovou bdělost, s možností ojedinělého překročení 2. SPA. Tato VI byla vydána pro celou územní působnost ČHMÚ pobočky Ostrava s platností od 12. října 12:30 hodin do 13. října 21:00 hodin, kdy VI na povodňovou bdělost přešla plynule na varování na povodňovou pohotovost pro celé území až do odvolání. Dne 13. října bylo na základě výpočtů hydrologických modelů a předpovědi srážek rozhodnuto o zvýšení stupně výstrahy pro dvě ORP v povodí Třebůvky (Moravská Třebová a Mohelnice) na povodňové ohrožení od 14. října 00:00 hodin. Na ostatním území zůstaly v platnosti stávající VI.

Dne 14. října v dopoledních hodinách bylo vzhledem ke zhoršující se situaci na tocích a také s ohledem na nové výpočty hydrologických modelů rozhodnuto o rozšíření VI na povodňové ohrožení na další ORP, zejména v povodí Odry, Opavy a Bečvy. Dne 15. října bylo možné již odvolat varování pro méně zasažené ORP. Také se zmenšil počet ORP s varováním na povodňové ohrožení a povodňovou pohotovost. Úprava VI ze dne 15. října tak reagovala na aktuální situaci na tocích. Na základě postupného uklidňování situace na tocích a poklesům hladin byla dne 17. října vydána VI na jev dotok, který se vydává, když vrchol povodňové vlny již prošel korytem řeky po celé její délce, ve všech úsecích toků jsou zaznamenávány poklesy hladin a nepředpokládá se opětovný vzestup. Tato VI se týkala zejména toku Opavy v profilu Děhylov, kde docházelo jen k velmi pozvolnému poklesu hladiny pod SPA. Dne 18. října pak byla VI na dotok aktualizována spolu se zadáním ukončení jevu. Tento nový jev byl při této povodňové situaci vydán pro územní působnost pobočky Ostrava poprvé.

Výsledky a zhodnocení modelových předpovědí

I když se může zdát, že s pokračujícím vývojem a zdokonalováním hydrologických modelů je role hydroprognostika pouze doplňková a modely by mohly být spouštěny automaticky, není to zatím zcela možné a ani žádoucí. Znalost fyzikogeografických charakteristik daného území, chování vodních toků v jednotlivých povodích za různých srážkových situací a znalost samotného srážkoodtokového modelu, je klíčová pro správné nastavení modelu i pro následnou správnou interpretaci výsledků.

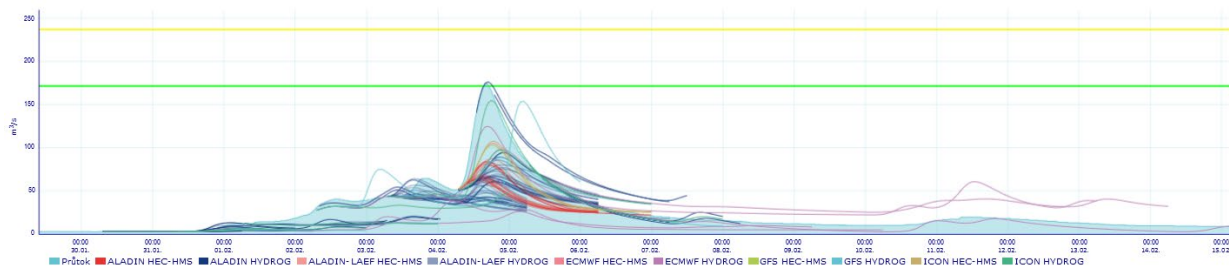
Jako primární vstup pro hydrologické modelování stále slouží model ALADIN, který je počítáný 4x denně s předstihem 66 hodin. Detailnější rozlišení modelu umožňuje lépe vystihnout orografii terénu i postihnout např. návětrný efekt pohoří. Výsledky z ostatních modelů nám pak slouží jako doplňkové informace nebo jako rozhodovací nástroj pro tvorbu výstražných informací.

V roce 2020 došlo k řadě povodňových situací, které byly hydrologickými modely zachyceny správně, ale také k situacím, kdy došlo k podhodnocení situace.

Povodně z tání (4. a 5. února 2020)

Tato povodňová situace byla bohužel ukázkou podhodnocení situace, a to zejména v povodí Bečvy. Situace, kdy při tání sněhové pokrývky a dešťových srážkách má postupně docházet k ochlazení, zastavení tání a přechodu deště do sněhu jsou pro předpověď průtoků, hned po bouřkových situacích, jedny z nejtěžších. Roli zde hraje správné nastavení modelu, zejména nastavení vodní hodnoty sněhu v povodí, ale také vstupy srážek a teploty vzduchu spolu se správným časovým určením přechodu deště ve sněh. Výstupy z modelů v povodí Bečvy neukazovaly na možnost překročení 1. SPA při výpočtech k 6. hodině ranní dne 3. února ani v den vzestupu hladin dne 4. února (0). Až přepočtení modelu ke 12. hodině dne 4. února ukázal překročení 1. SPA, což už ale bylo zřejmé z aktuální situace na tocích. Velkou roli při podcenění této povodňové situace zde sehrálo pozdější ochlazení a zastavení tání

sněhu, chybějící data k manipulacím na vodních dílech v povodí Bečvy, ale také chyba ve vstupních hodnotách charakteristik sněhové pokrývky v modelu.

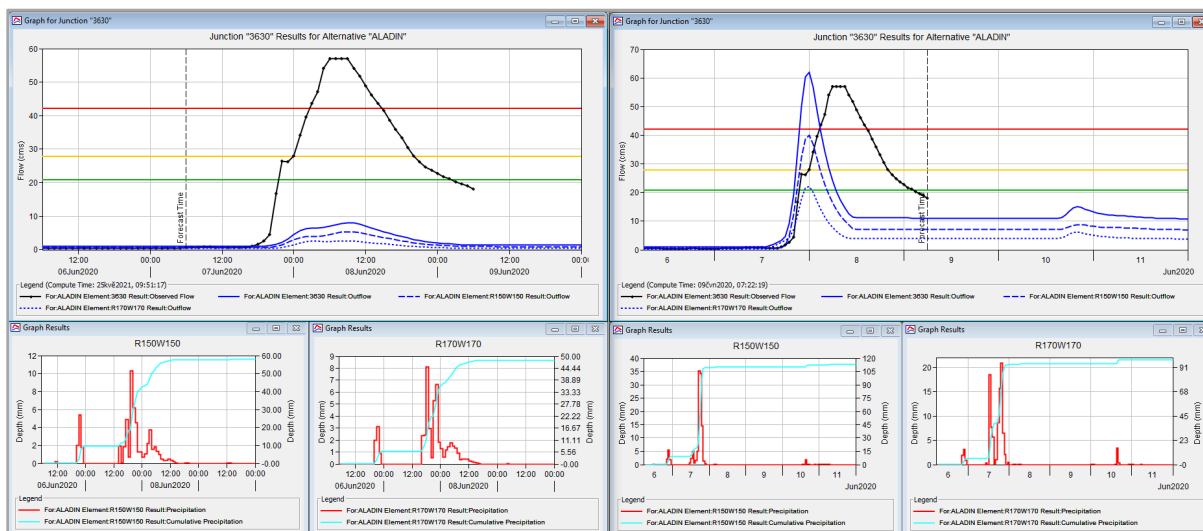


Obr. 7 Modelové hydrologické předpovědi pro profil Jarcová (Vsetínská Bečva) v období 30. 1. až 5. 2. 2020

Přivalové povodně (7. a 8. června 2020)

Při povodňových situacích, které vznikají v důsledku intenzivních přivalových srážek krátkého trvání, jsou možnosti hydrologických předpovědí velmi omezené. Předpověď bouřkových situací je problematická a složitá především z pohledu přesné lokalizace a stanovení intenzity srážkových úhrnů. Rozbor meteorologických příčin této konkrétní situace je uveden v Šrámek, 2021. Limitujícím faktorem hydrologické předpovědi je ve většině případů malá plocha zasaženého území, rychlý odtok mimo trvalou říční síť a velmi rychlý nástup povodňové vlny.

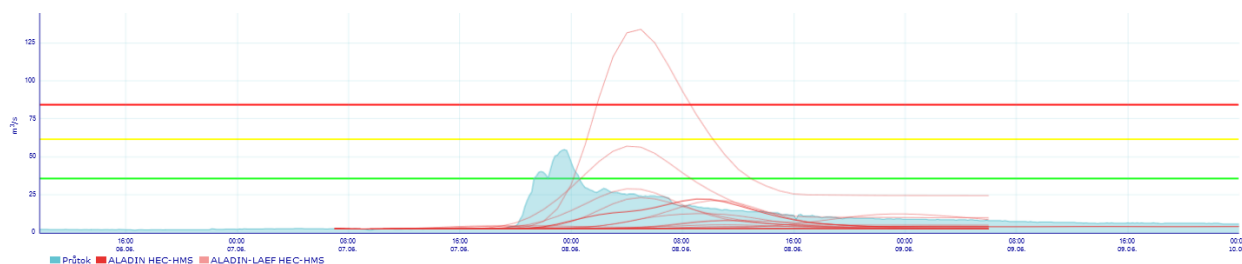
Jak již bylo uvedeno výše, pro nejpostiženější povodí Oskavy se nepočítá oficiální hydrologická předpověď, ale v modelu HEC–HMS lze vykreslit předpověď pro profil Uničov. Resimulací na reálných srážkových datech bylo potvrzeno, že model byl správně nastaven, ale predikce srážkových úhrnů byla pro tuto oblast podhodnocena (0). Model při resimulaci správně zachytil nástup povodňové vlny, hodnotu kulminace, pouze zmenšil objem vlny.



Obr. 8 Předpověď průtoků v profilu Uničov (Oskava) ze dne 7. června (vlevo) a resimulace na reálně spadlých srážkách (vpravo) pomocí srážkoodtokového modelu HEC–HMS

Při rozhodovacím procesu o vydání nebo nevydání VI na povodňové jevy za těchto bouřkových situací se lze rozhodovat i podle výpočtu ansámblových předpovědí ALADIN–LAEF. Na 0 jsou ukázány tyto výstupy z modelu HEC–HMS. A i když deterministický model ALADIN na rozdíl od ansámblových výstupů nepredikoval dosažení SPA, rozptýl jednotlivých ansámbľů se pohyboval až do 3. SPA. Zde je ale potřebná správná interpretace výsledků, protože nastavení ansámblové předpovědi závisí na nastavení deterministické předpovědi, což při očekávaných extrémních srážkových úhrnech s časovou i prostorovou nejistotou, na jejichž základě dojde k úpravě nastavení modelu, může zkreslit výsledky

ALADIN–LAEF. Celkově ale lze říci, že výstupy vycházející z modelu ALADIN–LAEF mohou pomoci při rozhodovacím procesu vydávání VI.



Obr. 9 Modelové hydrologické předpovědi ALADIN–LAEF pro profil Šumperk (Desná) ze dne 7. června 2020

Povodně z trvalých srážek (19. až 23. června 2020, 29. až 30. června, 12. až 20. října 2020)

Na rozdíl od bouřkových situací, lze při předpovědi plošných déle trvajících srážek hydrologickými modely poměrně dobře vystihnout tvar i kulminaci povodňových vln na tocích. V obou případech je ale nutné správné nastavení hydrologických modelů. Zhodnocení výsledků modelování je v této kapitole provedeno u předpovědních profilů s dosaženým 3. SPA.

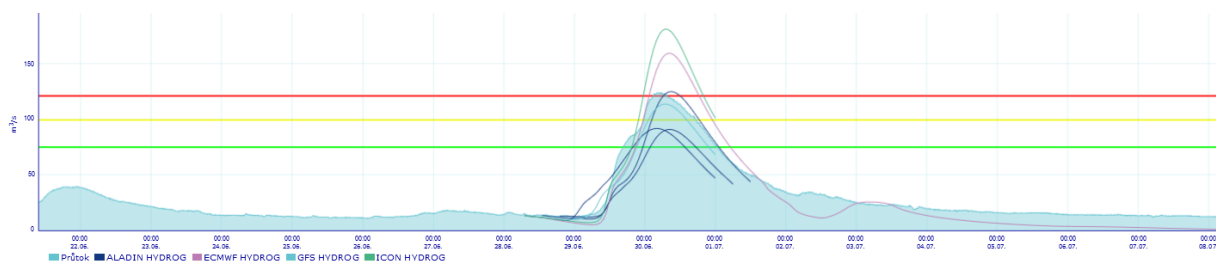
V období 19. až 23. června nebyl překročen 3. SPA na žádném předpovědním profilu na tocích. V poslední povodňové epizodě měsíce června pak došlo k překročení 3. SPA v profilech Loštice (Třebůvka) a Moravičany (Morava). Meteorologické faktory vedoucí k povodňové situaci jsou detailně popsány v Šrámek, 2021.

Následující 0 ukazuje predikci SPA pomocí různých meteorologických vstupů spolu s uvedením použitého hydrologického modelu.

Tab. 3 Vypočtené SPA pomocí hydrologických modelů v období 27. až 29. června 2020

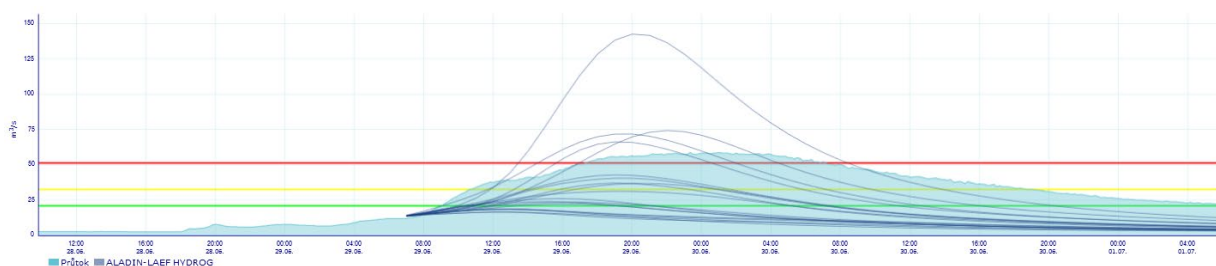
Den	Čas výpočtu	ALADIN		ICON	GFS	ECMWF
		HYDROG	HEC-HMS	HYDROG	HYDROG	HYDROG
Loštice (Třebůvka)						
27.6.	6hod	2	2	1	bez SPA	bez SPA
28.6.	6hod	bez SPA	–	3	1	2
29.6.	6hod	2	3	bez SPA	bez SPA	bez SPA
Moravičany (Morava)						
27.6.	6hod	2	3	bez SPA	bez SPA	bez SPA
28.6.	6hod	1	–	3	2	3
29.6.	6hod	3	3	3	1	3

V 0 jsou ukázány pouze hlavní výpočty hydrologických modelů vždy k rannímu termínu, ale během povodňových epizod dochází k přepočtu modelů i k dalším termínům, které navazují na dostupnost nových meteorologických dat. Na 0 je jsou ukázány výsledky hydrologického modelování ze dne 28. června v profilu Moravičany (Morava), kdy výpočty k 6. hodině a 12. hodině vycházející ze vstupu meteorologického modelu ALADIN naznačovaly vzestup hladiny na 1. SPA, ale k 18. hodině již i tento model naznačoval vzestup nad 3. SPA. Tento výpočet se nakonec ukázal jako velmi přesný a s předstihem 48 hodin zachytil jak čas, tak hodnotu kulminace.



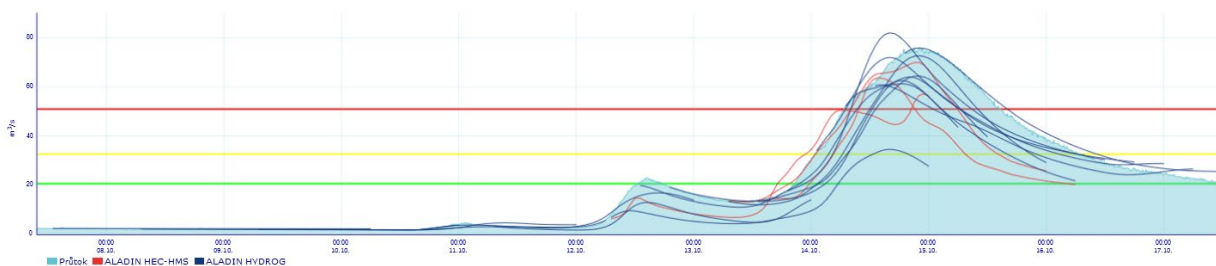
Obr. 10 Variantní hydrologické předpovědi pro profil Moravičany (Morava) ze dne 28. června 2020

V profilu Loštice (Třebůvka) nebyl vzestup nad 3. SPA tak jednoznačný. Hydrologické modely naznačovaly dosažení 3. SPA jen ojediněle. Pokud se podíváme na výsledky vycházející ze vstupních dat modelu ALADIN–LAEF (0), tak 25 % ansámblů naznačovalo vzestup nad 3. SPA a 50 % všech ansámblů pak vzestup nad 2. SPA.



Obr. 11 Modelové hydrologické předpovědi ALADIN–LAEF pro profil Loštice (Třebůvka) ze dne 29. června 2020

V říjnu byl 3. SPA překročen v pěti předpovědních profilech. Při této povodňové situaci dávaly velmi dobré výsledky vstupní meteorologická data z modelu ALADIN. Ostatní meteorologické vstupy pak sloužily při rozhodovacím procesu o vydání VI jako doplňková informace. Meteorologické příčiny povodňové situace jsou detailněji popsány v Povodňové zprávě (Kamínková, 2020c). Hydrologická předpověď pro jednotlivé profile se počítala nejen k 6. hodině ranní, ale docházelo k průběžným výpočtům a aktualizaci předpovědí během celého dne. Na 0 je ukázáno množství předpovědí vypočtených na základě meteorologického modelu ALADIN v profilu Loštice (Třebůvka) před a během trvání povodňové situace.



Obr. 12 Modelové hydrologické předpovědi pro profil Loštice (Třebůvka) v období 7. až 14. října 2020

V 0 jsou pak uvedeny výsledky výpočtů k 6. hodině ranní dva dny před a v den kulminace u profilů s dosaženým 3. SPA. Je zde ukázána predikce SPA v jednotlivých dnech pomocí různých meteorologických vstupů. Pouze u profilu Opava na Opavě nebyl ani v jeden termín výpočtu hydrologických modelů predikován vzestup nad 3. SPA. V ostatních profilech byl vzestup nad 3. SPA predikován již 48 hodin před povodňovou situací.

Tab. 4 Vypočtené SPA pomocí hydrologických modelů v období 12. až 14. října 2020

Den	Čas výpočtu	ALADIN		ICON	GFS	ECMWF
		HYDROG	HEC-HMS	HYDROG	HYDROG	HYDROG
Loštice						
12. 10.	6hod	2	3	bez SPA	bez SPA	1
13. 10.	6hod	3	3	3	2	2
14. 10.	6hod	3	–	3	3	3
Moravičany						
12. 10.	6hod	3	3	bez SPA	bez SPA	3
13. 10.	6hod	3	3	bez SPA	2	2
14. 10.	6hod	2	–	1	3	1
Opava						
12. 10.	6hod	1	2	bez SPA	1	2
13. 10.	6hod	2	2	2	2	2
14. 10.	6hod	2	–	2	2	2
Děhylov						
12. 10.	6hod	2	3	1	2	2
13. 10.	6hod	3	3	3	3	3
14. 10.	6hod	3	–	3	3	3
Dluhonice						
12. 10.	6hod	2	1	2	3	3
13. 10.	6hod	2	2	2	3	3
14. 10.	6hod	3	–	3	3	3

Výsledky hydrologického modelování v jednotlivých předpovědních profilech, spolu s detailnějším textovým rozбором, jsou uvedeny v Povodňové zprávě, která byla zpracována RPP Ostrava (Kamínková, 2020c).

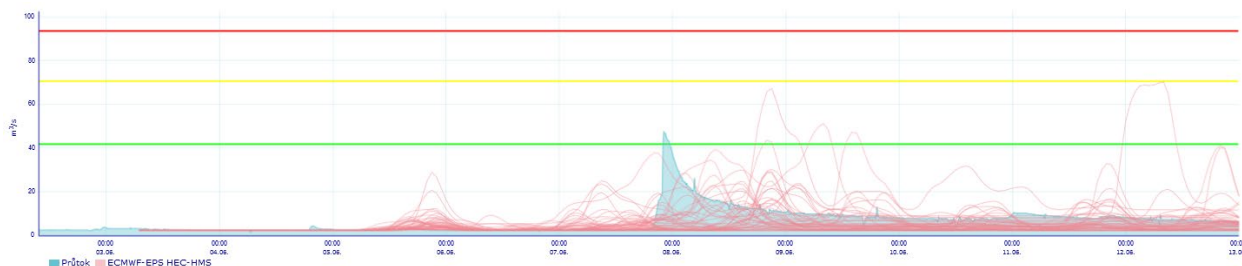
Diskuze

Při zpracování tohoto příspěvku a celkově při pohledu na povodňové situace v roce 2020 vyvstaly otázky, návrhy nebo doporučení, na co se v dalších letech zaměřit nebo co případně změnit. Z hlediska hydrologického modelování lze říct, že při situacích, kdy dochází k vzestupům hladin v důsledku déle trvajících plošně rozsáhlejších srážek, jsou výsledky hydrologického modelování velmi dobré. V období vzestupu hladin v důsledku tání a dešťových srážek hraje velkou roli správné nastavení hydrologických modelů z hlediska vodní hodnoty sněhu v jednotlivých částech povodí, ale také správné modelové teplotní vstupy zejména při přechodu dešťových srážek ve sněhové a naopak. Celkově lze ale říct, že u těchto dvou povodňových situací se lze ve většině případů velmi dobře spolehnout na deterministický, příp. variantní meteorologický vstup. Rozptyl ansámblových výstupů není příliš velký.

U přívalových srážek je situace složitější. V důsledku velké nejistoty prostorového i časového rozložení srážek spolu s velkým rozptylem srážkových úhrnů z jednotlivých výstupů meteorologických modelů, je velmi obtížné správně nastavit hydrologický model a následně správně časově a prostorově vydat výstražnou informaci. U těchto případů se dá ve větší míře využít ansámblových vstupů srážek a vyjádřit tak nejistotu výstupů. Ansámblové předpovědi ALADIN–LAEF vycházejí z nastavení modelu pro deterministickou předpověď, na což je třeba myslet při předpovědi přívalových srážek, kdy je model upraven tak, aby na přívalovou srážku nereagoval tak výrazným vzestupem. Toto nastavení se pak přenáší do výpočtu ALADIN–LAEF a pokud vstupní srážky nejsou tak extrémní, tak pak může být výpočet značně podhodnocen.

Výstupy z ansámblových předpovědí ECMW–EPS jsou na pobočce Ostrava v testovacím režimu a nepočítají se dlouhou dobu. V současné době jsou testovány na zaváděné platformě FEWS a v roce 2020 se testovaly také v modelu HEC–HMS na pilotním povodí Bělé. Z dosavadních výsledků lze však říci, že ansámblové výstupy nám mohou naznačit potenciální riziko v delším časovém horizontu, které se každým dalším výpočtem modelu zpřesňuje. Na 0 je uvedena ukázka výsledku výpočtu pomocí modelu HEC–HMS v období bouřkových situací v červnu 2020. Úkolem do dalšího období by

mělo být určení způsobu prezentace ansámblových modelových předpovědí tak, aby byly výsledky srozumitelné široké veřejnosti.



Obr. 13 Modelové hydrologické předpovědi ECMWF–EPS pro profil Mikulovice (Bělá) ze dne 3. června 2020

Závěr

Rok 2020 nám poskytl mnoho situací, na kterých jsme si mohli ověřit funkčnost a spolehlivost nástrojů hydrologického modelování, které se během posledních let vyvíjely jak v rámci celého ČHMÚ, tak v rámci RPP Ostrava. Předkládaný příspěvek se snažil ukázat nejdůležitější povodňové epizody z hlediska jejich zvládnutí jak po stránce hydrologických předpovědí, tak po stránce včasného varování obyvatelstva a příslušných povodňových orgánů. Z výše uvedeného lze říct, že se stále vyskytují povodňové situace, které nelze stoprocentně předpovědět a jejichž průběh je tak rychlý, že na ně nelze v některých případech ani adekvátně a rychle reagovat. Proto je zapotřebí se neustále vzdělávat, detailněji poznávat chování vodních toků v různých geografických prostředích, snažit se zdokonalovat nástroje pro hydrologické modelování a rovněž pro výstražnou službu. Protože pro kvalitní hydrologické modelování je důležitý nejen správně nastavený srážkoodtokový model, ale také pohled toho, kdo tento model obsluhuje.

Poděkování

Část práce byla vytvořena v rámci projektu MV VI20192021166 „Hydrometeorologická rizika v České republice – změny rizik a zlepšení jejich predikcí“

Zdroje

Belluš, M. et al. (2019) ALADIN-LAEF. In: *Advances In Science and Research*, roč. 16, s. 63–68 [on-line.] [cit. 20. 5. 2021] Dostupné z WWW: <https://doi.org/10.5194/asr-16-63-2019>.

CAP (2021) [on-line.] [cit. 04. 05. 2021] Dostupné z WWW: www.wmo.int/pages/prog/amp/pwsp/CommonAlertingProtocol_en.html.

Čekal, R. et al. (2020) Povodně na území České republiky v říjnu 2020. ČHMÚ [on-line.] [cit. 22. 2. 2021] Dostupné z WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/povodnove_zpravy/cr_2020_10.pdf.

Čekal, R. et al. (2021) Průběh povodní v červnu 2020 v jednotlivých povodích. In: *Meteorologické zprávy*, roč. 74, č. 1, s. 11–19. ISSN 0026-1173.

CNRM (2021) Aladin. [on-line.] [cit. 20. 5. 2021] Dostupné z WWW: <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article122&lang=en>.

Deltares (2021) Delft-FEWS [on-line.] [cit. 22. 2. 2021] Dostupné z WWW: https://www.deltares.nl/app/uploads/2015/01/Delft-FEWS_brochure-2017.pdf.

DWD (2021) NWF forecast data. [on-line.] [cit. 20. 5. 2021] Dostupné z WWW: https://www.dwd.de/EN/ourservices/nwp_forecast_data/nwp_forecast_data.html.

- ECMWF (2012) The ECMWF Ensemble Prediction System. [on-line.] [cit. 20. 5. 2021] Dostupné z WWW: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2012/14557-ecmwf-ensemble-prediction-system.pdf>.
- ECMWF (2021) About our forecasts. [on-line.] [cit. 20. 5. 2021] Dostupné z WWW: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support>.
- IBL (2021) Wisual Weather. [on-line.] [cit. 04. 05. 2021] Dostupné z WWW: <https://www.iblsoft.com/products/visualweather/>.
- Kamínková, A. (2020a) Činnost Hydrologické předpovědní služby ČHMÚ Ostrava v červnu 2020. In: *Zpravodaj Českého hydrometeorologického ústavu*, roč. 2020, č. 6, s. 33–36 [on-line.] [cit. 1. 5. 2021] Dostupné z WWW: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/zpravodaj/2020/zpravodaj-2006.pdf>.
- Kamínková, A. (2020b) Povodňová situace v druhé dekádě měsíce října v povodí Odry, horní Moravy a Bečvy. In: *Zpravodaj Českého hydrometeorologického ústavu*, roč. 2020, č. 10, s. 33–36 [on-line.] [cit. 1. 5. 2021] Dostupné z WWW: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/zpravodaj/2020/zpravodaj-2010.pdf>.
- Kamínková, A., Volný, R. (2020c) Hydrometeorologická zpráva o povodňové situaci ze dne 12. až 20. října 2020, ČHMÚ [on-line.] [cit. 22. 2. 2021] Dostupné z WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/povodnove_zpravy/os_2020_10.pdf.
- Kosík, O., Křížka, F., Walder, J., Židek, D., (2017) Využití databázového systému CLIDATA v hydrologii. Praha, ČHMÚ, 52 s. ISBN 978-80-87577-71-4.
- Kosík, O., Kamínková, A., Šustková, V., (2018) Využití databázového systému CLIDATA a aplikační nadstavby SOMDATA pro přípravu variantních vstupních dat pro tvorbu hydrologických předpovědí za použití srážkoodtokových modelů AQUALOG, HEC–HMS a HYDROG. In: *Meteorologické zprávy*, roč. 71, č. 6, s. 179–185. ISSN 0026-1173.
- Krejčí, J. (2009) The use of hydrological systém AquaLog for flood warning service in the Czech Republic [on-line.] [cit. 20. 5. 2021] Dostupné z WWW: https://www.researchgate.net/publication/301358002_The_use_of_hydrological_system_AquaLog_for_flood_warning_service_in_the_Czech_Republic.
- Mrakomor (2021) © Petr Drobek, ČHMÚ Ostrava. [on-line.] [cit. 1. 5. 2021]. Dostupné interně z WWW: <http://192.168.90.3/mrakomor>.
- NOAA (2021) NCEP Numerical Forecast. [on-line.] [cit. 20. 5. 2021] Dostupné z WWW: <https://www.emc.noaa.gov/emc/pages/ncep-numerical-forecast-systems.php>.
- SIVS (2021) Systém integrované výstražné služby ČHMÚ. [on-line.] [cit. 22. 2. 2021] Dostupné z WWW: <https://www.chmi.cz/informace-pro-vas/prezentace-a-vyuka/SIVS>.
- Šrámek, J. et al. (2021) Zhodnocení meteorologických příčin povodní v červnu 2020. In: *Meteorologické zprávy*, roč. 74, č. 1, s. 2–10. ISSN 0026-1173.
- STARÝ, M., (1997) HYDROG-S. Popis programu. Brno, Hysoft. Nепublikováno. 112 s.
- Tolasz, R. et al. (2021) Rok 2020 v Česku. In: *Meteorologické zprávy*, roč. 74, č. 2, s. 33–45. ISSN 0026-1173.
- USACE – US Army Corps of Engineers (2020) Hydrologic Modeling System HEC–HMS User's Manual. [on-line.] [cit. 22. 2. 2021]. Dostupné z WWW: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.7/>.

Varovný systém lokálních povodní založený na měření infiltrace srážek

Zbyněk KULHAVÝ¹, Jana KALIBOVÁ², Pavel KREJZEK³

¹ VÚMOP, v.v.i., B. Němcové 231, Pardubice, Česká republika, email: kulhavy.zbynek@vumop.cz,

² ČZU v Praze, Kamýcká 129, Praha-Suchdol, Česká republika, email: kalibova@fzp.czu.cz,

³ ADCIS, s.r.o., Bohdanečská 280, Pardubice, Česká republika, email: krejzek@adcis.cz

Úvod

Mezi klíčové faktory, které podmiňují vznik povrchového odtoku ze srážek a následné rozvinutí přívalové lokální povodně, patří infiltrační schopnost půdy. Tuto schopnost ovlivňují přírodní podmínky stanoviště, způsob využití pozemků, ve značné míře ale také aktuální nasycenost půdy vodou (úroveň hladiny podzemních vod a vlhkost půdy). Nejrychleji probíhá infiltrace na půdě suché a se zvyšující se vlhkostí rychlost infiltrace výrazně klesá.

Tento příspěvek představuje nový varovný protipovodňový systém (VPS), který je schopen vyhodnotit riziko vzniku přívalové povodně v předstihu několika hodin (12 a více). Využívá přitom výsledky přímého měření doby výtopy a rychlosti infiltrace v konkrétních podmínkách stanoviště. Poskytuje tak chráněné oblasti dostatek času pro aplikaci adekvátních opatření. Tím se odlišuje od varovných systémů založených na měření průtoku ve vodním toku nebo od systémů globálních, které nemohou dostatečně respektovat heterogenitu půdních vlastností.

Varovný systém je tvořen dispečinkem a jednotlivě instalovanými měřícími terminálovými stanicemi. Dispečink řídí provoz terminálových stanic VPS automaticky, vzdálenou komunikací. Pro stanovení termínu a parametrů infiltračního/zadešťovacího testu používá sofistikované postupy vycházející z dat o předchozí i aktuální meteorologické situaci. Zadešťování probíhá konstantní nebo proměnlivou intenzitou, korespondující s predikovanou srážkou. Z výsledků provedeného infiltračního testu je získán kritický čas dosažení výtopy a parametry křivky rychlosti infiltrace. Během celého procesu stanovení rizika povodně jsou realizovány kontrolní testy, minimalizující případná falešná varování.

Metodika

Vyhodnocení rizika vzniku povrchového odtoku a následně rozvoje lokální povodně je založeno na srovnání délky trvání testovacího deště o intenzitě odvozené z predikované srážky a doby výtopy způsobené simulovanou srážkou (doba výtopy je přitom stanovena reálným infiltračním pokusem). Z praktických důvodů je zvolena jednotná (zkrácená) doba zadešťování 15 minut a doba trvání celého infiltračního pokusu jedna nebo dvě hodiny (slouží k získání parametrů S, K, viz dále). Ke stanovení parametrů testovacího deště na základě aktuálních radarových dat doplněných o predikci úhrnů srážek je v základním provedení VPS použito modelu DES_RAIN (Vaššová, Kovář, 2013) a vstupních dat z nejbližší srážkoměrné stanice.

VPS je vhodný pro ochranu oblastí, situovaných pod zdrojovými plochami malých, především zemědělsky využívaných povodí (s plochami v řádu několika stovek hektarů), kde jsou infiltrační vlastnosti půd citlivé na její počáteční vlhkost – tj. půdy těžké a středně těžké, půdy mělké nebo půdy náchylné k hydrofobii povrchu.

Terminálová stanice VPS

Roli autonomního zadešťovacího infiltrometru plní terminálová stanice VPS (viz Obr. 1, 2). Je přizpůsobena k sezónní instalaci v kritickém profilu zdrojové oblasti tvorby povrchového odtoku příslušné plochy povodí a umožňuje trvalý provoz. Tvoří ji řídicí jednotka „Infiltration Control Unit“ (ICU), infiltrační jednotky (prstenec, zadešťovací tryska a hladinový snímač), zdroj energie (akumulátor

a solární panel), zdroj vody (typicky kanistr). Součástí ICU je hydraulický a elektronický přepínač, řídicí elektronika, dávkovací čerpadlo, datalogger a komunikační port pro vzdálený přístup, případně lze doplnit kalibrační jednotku a další čidla přes sběrnici SDI-12. Stanovení hydraulických vlastností půdy ve stavu před plným nasycením hraje klíčovou roli při popisu dynamiky půdní vody. Sorptivita společně s hydraulickou vodivostí, stanovené před zátěžovou dešťovou srážkou/na počátku zátěžové dešťové srážky, jsou klíčovými atributy půdy, které v rámci srážko-odtokového procesu určující riziko vzniku povrchového odtoku – následně povodně.



Obr. 1 Konstrukční části terminálové stanice

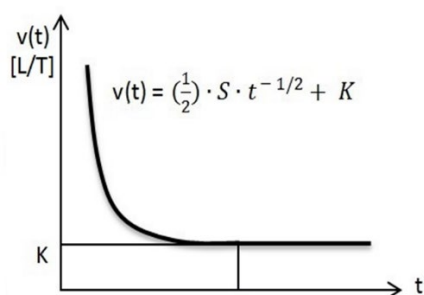
1 – řídicí jednotka (ICU); 2 – infiltrační jednotka sestávající ze zarážecího prstence, zadešťovací trysky a hladinového snímače; 3 – univerzální přepínač hladinových snímačů; 4 – potrubí rozvodu vody (na obrázku zobrazen jeden ze šesti volitelných výstupů); 5 – solární panel – vnější zdroj energie



Obr. 2 Příklad instalace do porostu vojtěšky, vpravo dole detail válečku s hladinovým snímačem

Po zahájení umělého zadešťování (zvolenou konstantní nebo proměnlivou intenzitou) dochází v první fázi měření k nepřerušované infiltraci s řízenou intenzitou přívodu vody k infiltraci do půdy tak dlouho, dokud nedojde k prvnímu dosažení nastavené úrovně hladiny vody ve vymešovacím válci infiltrační jednotky. Naměřený čas trvání zadešťování dané intenzity a úhrnu (vyjádřeného v jednotkách sloupce vody) vyjadřuje parametry kritického deště, který by způsobil povrchový odtok – neboli by byla překročena infiltrační schopnost půdního profilu v konkrétních přírodních podmínkách (viz patent CZ 307 090, 2017). Zjednodušeně je tedy možno porovnávat pouze tyto dva časy (tj. dobu dosažení výtopy s dobou trvání deště predikovaných parametrů).

Klíčovým faktorem, určujícím infiltrační schopnost půdy v jejím počátku, je sorptivita. Obecně platí, že čím je nižší půdní vlhkost, tím je vyšší sorptivita (Zhang 1997, Mirlas 2009, Singh 2009, Villarreal et al. 2019). Dle Philipa (1957) se koeficient \underline{S} mění s počáteční půdní vlhkostí $\underline{\theta}$ (Jaynes and Gifford 1981). Jak v průběhu infiltrace roste objem vody v půdě, klesá sorptivita \underline{S} i intenzita infiltrace \underline{v} (viz Obr. 3) a roste objem infiltrované vody.



Obr. 3 Infiltrační křivka

V momentě, kdy výtopa dosáhne předem určené úrovně hladiny (výška cca 5 mm na terénu, detekovaná snímačem hladiny), přístroj automaticky zaznamená čas doby výtopy od počátku měření. Teoreticky by hladina výtopy měla odpovídat výšce 0 mm nad terénem. Snímač hladiny je však umístěn výše (zpravidla 5 mm), čímž se eliminuje chyba způsobená drobnými terénními nerovnostmi. Tato chyba je ošetřena automatickou korekcí při finálním zpracování dat. Následuje proces infiltrace, a to opakovaně v periodách vždy poté, kdy dojde k poklesu hladiny výtopy. Tehdy se opět spustí simulace deště (tentokrát o maximální možné intenzitě přívodu vody) a zaznamenává se objem vody (kumulativně) dodaný do infiltračního prstence do doby detekce další výtopy. Takto se proces opakuje až do ukončení experimentu.

S využitím infiltrační teorie dle Philipa byla odvozena jednoduchá rovnice pro výpočet sorptivity z doby výtopy, intenzity deště a nasycené hydraulické vodivosti. Ze záznamu vertikální neustálené infiltrace, která nastává po době výtopy, byla stanovena hydraulická vodivost. Odvození rovnic popisuje (Kalibová J. a kol., v recenzním řízení).

Úprava zařízení (užitý vzor č. 33 692, 2020) zvyšuje spolehlivost přístroje v automatizovaném, zejména dálkově řízeném režimu užívání v terénních podmínkách, umožňuje v případě potřeby provádět doplňující testy, kalibraci čerpadla a dále rozšiřuje měření o odezvu půdy na aktuálně probíhající srážku (Kalibová a kol., 2021).

Stanovení kritických parametrů půdy

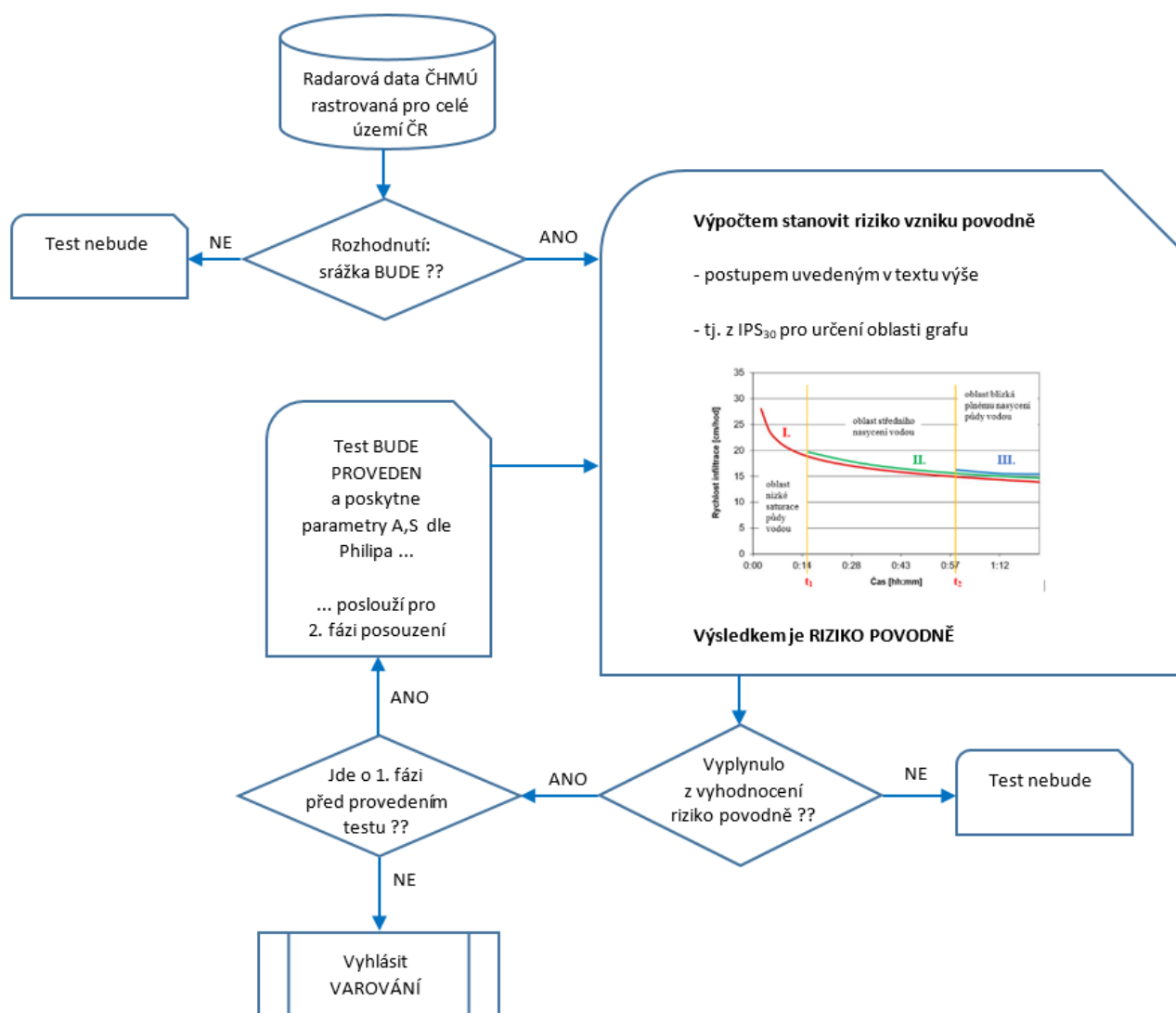
Terminálovou stanicí VPS je třeba umístit do místa, které největším dílem přispívá k tvorbě povrchového odtoku. Toto místo lze vybrat na základě analýzy území nebo zhodnocením znalostí místních obyvatel. Metodika instalace předpokládá využití mapových podkladů o výskytu hydrologických skupin půd, odvozených např. z kódu BPEJ. Pro uplatnění kontrolních procedur (minimalizujících falešná krizová hlášení) je doporučeno pro vybrané místo instalace provést přístrojem alespoň 3x opakovanou zkoušku infiltrace. Na základě těchto měření bude popsána charakteristická křivka rychlosti infiltrace (následně aproximovaná parametry S , K).

Provoz VPS – stanovení potřeby provedení infiltračního testu

Serverový systém je centrální částí VPS. Sleduje informace o povětrnostních podmínkách z externích zdrojů (výstrahy ČHMÚ, radarová data, ...), průběžně je vyhodnocuje a v případě splnění stanovených kritérií zadá příslušným měřicím stanicím povely ke spuštění měření. Výsledky těchto měření pak přijme, vyhodnotí a v případě potřeby rozešle varování jednotlivým odběratelům. Zároveň trvale monitoruje stav měřicích stanic a ukládá veškerá data získaná během provozu pro účely další analýzy prostřednictvím specializovaných nástrojů. V případě detekce nestandardního stavu nebo poruchy některé součásti či měřicí stanice odešle upozornění příslušnému správci.

Pro efektivní provoz VPS je třeba v případě zvýšeného rizika výskytu srážek rozhodnout o provedení infiltračního testu. Test lze přitom provést kdykoli před srážkou (v řádu hodin nebo i dní) a tímto předstihem tak vytvořit dostatečný časový náskok pro organizaci krizových řízení. Pokud se však test provede, je místo instalace konkrétního infiltračního prstence z dalšího testování vyloučeno. Terminálová stanice VPS je proto vybavena několika prstenci pro postupné nebo současné použití. Jeden z jednodušších postupů, vedoucích k rozhodnutí o provedení testu na základě zhodnocení aktuální nasycenosti půdy vodou, využívá indexu předchozích srážek (IPS_{30}). Na základě takto stanovené saturace půdy bude odvozena pravděpodobná oblast křivky rychlosti infiltrace (I. až III. – viz Obr. 4, graf vpravo) pro posouzení rizika vzniku povodně.

Model DESRAIN je použit k přepočtu informace z radaru (resp. jakékoli predikce budoucí srážky) na intenzitu/parametry testu provedeného terminálovou stanicí (tedy z praktických důvodů zpravidla na srážku o trvání "jen" 15 min). Parametry DESRAIN stanovené pro konkrétní srážkoměrné stanice ČR jsou interpolovány do místa instalace terminálové stanice VPS (přesnost interpolace není kritická, neboť výsledkem provedeného testu jsou skutečně naměřená data).

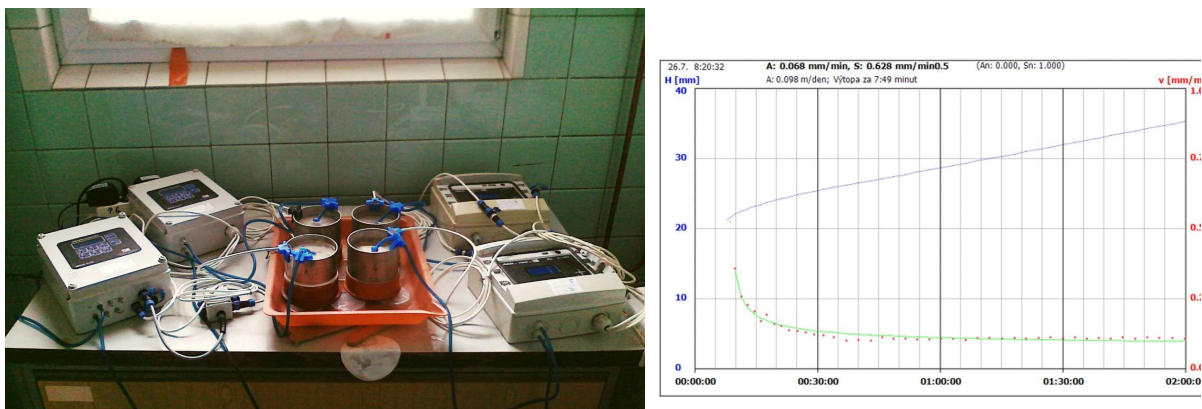


Obr. 4 Algoritmus procesu, vedoucího k rozhodnutí o spuštění infiltračního testu

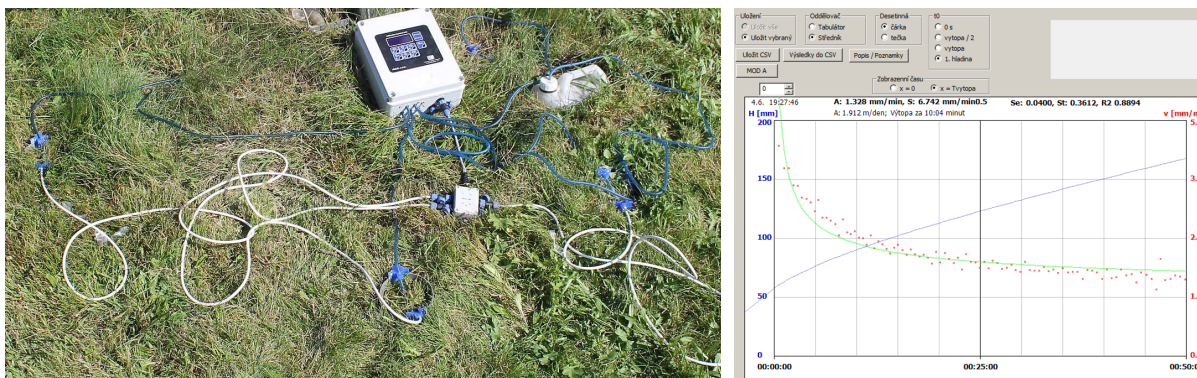
Pokud bylo riziko povodně stanoveno jako reálné (půda nebude dle výpočtů schopná srážku infiltrovat), bude proveden infiltrační test s parametry odvozenými z předpokládané srážkové události. Výsledek skutečného testu bude posouzen dalšími verifikačními procedurami. Pokud validační proces vyhodnotí zkoušku jako neplatnou, odešle požadavek na opakování zkoušky na jiném místě jinou infiltrační jednotkou v příslušné měřící stanici. Validovaný výsledek zkoušky je poté vyhodnocen a podle výsledku bude rozesláno na příslušná místa varování resp. informace o provedených měřeních.

Výsledky

V průběhu řešení výzkumného projektu TAČR evid. č. TH02010802, řešeného v letech 2017–2020, byla provedena řada experimentů v laboratořích VÚMOP i ČZU – viz Obr. 5 (konsolidovaná půda a kaolinit) i přímo v terénu – viz Obr. 6 (přirozený půdní profil). Vlastnosti kaolínu jsou vhodné pro ověření vlivu počátečního zvlhčení (Pelíšek I. a kol., 2021; Kalibová J. a kol., v recenzním řízení IF).



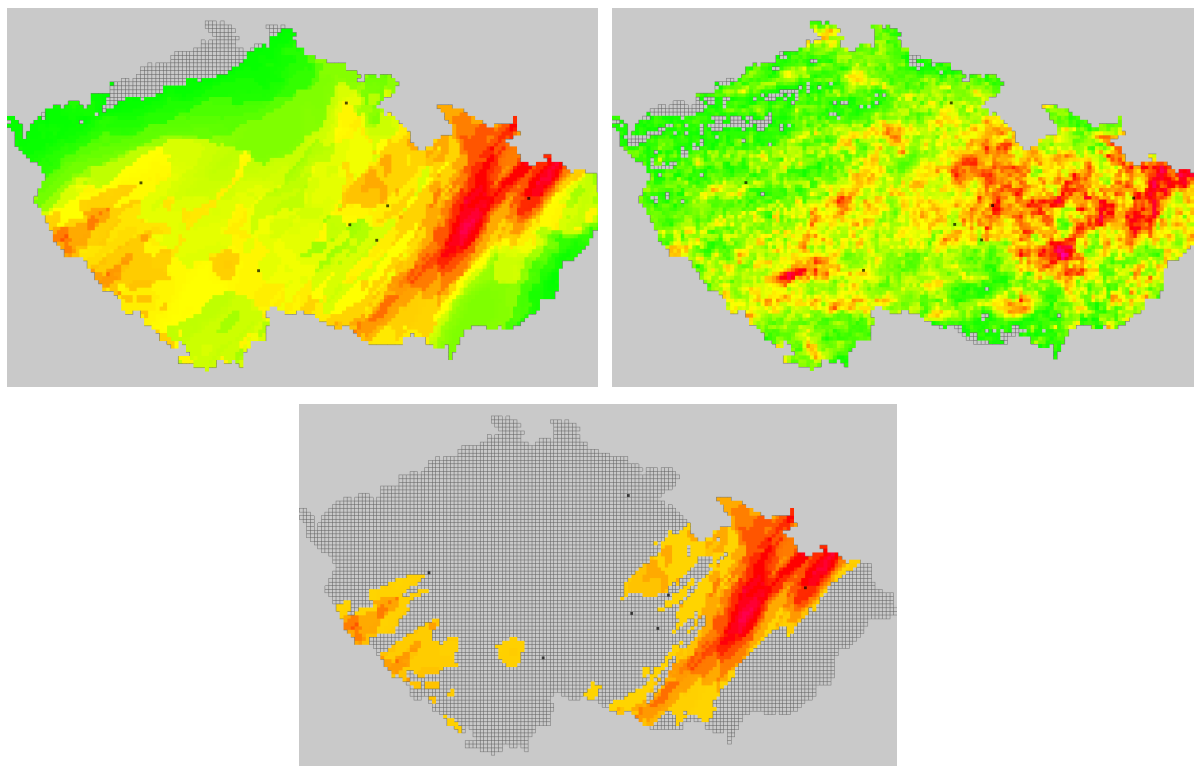
Obr. 5 Vlevo: Laboratorní testování parametrů na vzorcích kaolínu (laboratoř pracoviště VÚMOP, v.v.i.). Vpravo: Příklad záznamu z testu pro případ homogenizovaného vzorku kaolínu. Čas T_0 = čas začátku zkoušky. Zelená čára reprezentuje aproximaci rychlosti infiltrace dle Philipa (Philip, 1957). Modrá čára odpovídá téměř, avšak vyjádřená jako kumulativní infiltrace. Body jsou naměřená data.



Obr. 6 Vlevo: Příklad instalace pro terénní měření v Pokřikově u Skutče, kdy jsou na jednu ICU připojeny čtyři infiltrační prstence, srážkoměr a pasivní hladinový snímač externí výtopy. Vpravo: Příklad průběhu testu na ploše Rozhovice, vzrostlý travní porost. Náhled v prostředí SW InfiltrView (ADCIS, s.r.o.). Čas T_0 = čas dosažení výtopy.

Výsledky naměřené pomocí reálných simulací byly porovnány s hodnotami stanovenými ověřenými numerickými metodami. Korelační koeficient prověřovaných závislostí se pohyboval v rozmezí 0,8–0,9. Toto poukazuje na vhodnost použitých postupů a dokládá, že nově vyvinutý varovný protipovodňový systém je spolehlivým nástrojem, díky kterému je možné reagovat na hrozící riziko přívalové povodně v předstihu několika hodin.

Funkce VPS jako celku byla testována během roku 2020 (viz Obr. 7). Zaměřili jsme se na bouřky s přívalovým deštěm ve východní části republiky a systém testovali v obcích Uničov a Šumvald, které byly zasaženy 7. 6. 2020 okolo 18. hodiny a obec Heřmanův Městec, zasažený dne 14. 6. 2020 okolo 17. hodiny. Ve všech případech byla situace systémem zachycena, byla vyhodnocena tak, že byl vydán povel k otestování infiltrační schopnosti půdy. Například pro lokality Uničov a Šumvald byl tento povel vydán již 4. 6. 2020, tj. 84 hodin před epizodou – ale systémem byla tato událost vyhodnocena tak, že srážka bude v celém objemu infiltrována a k povodni nedojde. Dne 6. 6. 2020 byla vydána následující výstraha, která již byla vyhodnocena jako kritická a bylo rozesláno varování 24 hodin před povodňovou epizodou.



Obr. 7 Příklad zpracování meteorologické situace ze dne 7. 8. 2020

Vlevo nahoře: předpověď srážek na území ČR za 12 h. Vpravo nahoře: Vypočtený IPS_{30} .

Dole uprostřed: prvotní výstraha na území ČR.

Černé body v mapě jsou jak stanice reálně provozované v testovacím režimu, tak stanice hypotetické (viz text).

Závěr

Zde představený varovný protipovodňový systém (VPS), založený na přímém měření infiltrace srážek, je jednoduchý, ale účinný nástroj s relativně nízkými pořizovacími náklady, nízkou náročností na provoz a údržbu, vhodný pro ochranu obcí a průmyslových objektů, nacházejících se v rizikových částech malých povodí, kde nelze úspěšně aplikovat jiné typy varovných systémů.

Ve srovnání s tradičními metodami (infiltrometr jedno- nebo dvouválcový) jsou hydrofyzikální charakteristiky půdy (K , S) stanovené touto metodou spolehlivější, více vypovídající a navíc ověřené přímo měřenou dobou výtopy (Pelíšek a kol., 2020).

Klíčová slova

přivalové povodně, rychlost infiltrace, simulace deště, doba výtopy, automatizace měření

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Ministerstva zemědělství, institucionální podpory MZE-RO0218 jako výsledek výzkumného projektu Technologické agentury ČR v programu Epsilon, evid. č. TH02010802, řešeného v letech 2017–2020.

Zdroje

Jaynes, R. A., and Gifford, G. F. (1981). „An in-depth examination of the Philip equation for cataloging infiltration characteristics in rangeland environments.“ *RE&M*, **34** (4), 285–296.

Kalibová J., Štibinger J., Krejzek P., Petru J. (2021) Varovný systém lokálních přivalových povodní, In: *Vodní hospodářství*, číslo **2**, 2021, str. 6–8.

Kalibová, J., Petru, J., Melorio, L., Štibinger, J. (v recenzním řízení): Ponding time, hydraulic conductivity and sorptivity – experimental and numerical determination. Předáno do časopisu *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* (ISSN 0733-9437).

Mirlas, V. (2009). „Applying MODFLOW Model for Drainage Problem Solution: A Case Study from Jahir Irrigated Fields, Israel.“ *J. Irrig. Drain. E.*, **135** (3), 269–278.

Patent CZ 307 090 *Simulátor deště pro měřicí systémy* (VÚMOP, v.v.i., Kulhavý Z., Čmelík M.).

Pelišek I., Štibinger J., Kulhavý Z., Melorio L. (2020) Ponding time, hydraulic conductivity and sorptivity – experimental determination by a single ring infiltrometer with rain simulator. *EGU General Assembly 2020*, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-21431, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-21431>.

Philip, J.R. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.*, **83** (5), 345–357.

Singh, S.K. (2009). „Generalized analytical Solutions for Groundwater Head in a horizontal Aquifer in the Presence of Subsurface Drains.“ *J. Irrig. Drain. E.*, **135** (3), 295–302.

Užitný vzor č. 33 692 *Simulátor deště s automatickou kalibrací* (VÚMOP, v.v.i., ADCIS s.r.o., Kulhavý Z., Krejzek P.).

Vaššová D., Kovář P. (2013) *DES_RAIN*. FŽP ČZU v Praze, dostupné z: <http://fzp.czu.cz/vyzkum/software.html>.

Villarreal, R., Lozano, L. A., Melani, E. M., Salazar, M. P., Otero, M. F., and Soracco, C. G. (2019). „Diffusivity and sorptivity determination at different soil water contents from horizontal infiltration.“ *Geoderma*, **338**, 88–96.

Zhang, R. (1997). „Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer.“ *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **61** (4), 1024–1030.

TA ČR TH02010802 „Systém včasné predikce přívalových povodní založený na přímém měření infiltrace“.

Autoři fotografií: P. Krejzek (Obr. 1), Z. Kulhavý (Obr. 2, 6), I. Pelišek (Obr. 5)

Vplyv rozdielnej priestorovej reprezentácie krajinného pokryvu a kvartérnej geológie na výsledky prepojeného modelu MIKE SHE/MIKE11

Stanislav RUMAN¹, Tom BALL², Andrew R.BLACK³, Julian R. THOMPSON⁴

¹ Katedra fyzické geografie a geoekológie, Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita, Chittussiho 10, Ostrava, Česká republika, email: stanislav.ruman@osu.cz, ²Department of Archaeology, Anthropology and Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Winchester, Winchester, UK, email: tom.ball@winchester.ac.uk, ³Geography, School of Social Sciences, University of Dundee, Dundee, Scotland, UK, email: a.z.black@dundee.ac.uk, ⁴Wetland Research Unit, UCL Department of Geography, University College London, London, UK, j.r.thompson@ucl.ac.uk

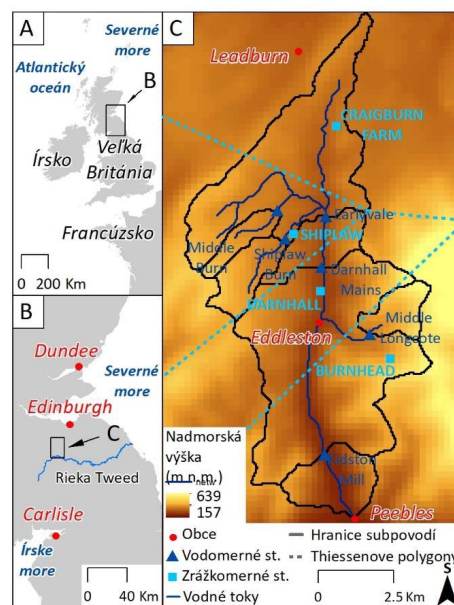
Úvod

Distribuované, fyzikálne založené modely sú charakteristické veľkými nárokmi na kvalitu a kvantitu priestorových dát. V mnohých prípadoch bola dokumentovaná ich problematická kalibrácia, dlhý výpočtový čas, nedostatočné techniky merania a problém tzv. efektívnych parametrov (Blöschl et al., 2019; Faticchi et al., 2016). Predkladaný príspevok je zameraný na určenie dopadov vybraných vstupných dát na výsledky prepojeného modelu MIKE SHE/MIKE 11. Ciele práce boli definované nasledovne: (i) stanoviť vplyv rozdielnej priestorovej reprezentácie krajinného pokryvu, (ii) určiť vplyv rozdielnej priestorovej reprezentácie kvartérnej geológie a (iii) definovať kombinovaný vplyv rozdielnej priestorovej reprezentácie krajinného pokryvu a kvartérnej geológie. Pre stanovenie rozdielov bolo zvolené experimentálne povodie Eddleston Water v Škótsku (Obr.1).

Metodika

Kalibrácia a validácia referenčného modelu

Referenčný model, s ktorým bol v nasledujúcich krokoch porovnávaný druhý, tretí i štvrtý variant, bol jediný manuálne kalibrovaný a validovaný na obdobie 10. 3. 2011 – 30. 8. 2013. Použitie dlhšieho obdobia nebolo možné z dôvodu zásahov na ploche povodia i hlavnom toku a príľahlej nive. Model bol vytvorený z gridov o veľkosti 50x50 m (27 142) a simuloval v hodinovom časovom kroku. Zrážky boli získané zo štyroch zrážkomerných staníc, a evapotranspirácia bola vypočítaná metódou FAO Penman-Monteith. V hydraulickom modeli MIKE 11 bolo schematizovaných šesť vodných tokov. Perióda bola rozdelená na kalibračnú (10. 3. 2011 00:00 – 9. 3. 2011 23:00) a validačnú časť (10. 3. 2012 00:00 – 30. 8. 2013 23:00). Následne prebehla manuálna citlivostná analýza a optimalizácia. Zo všetkých spustení modelu bolo vybraných dvadsať najlepších simulácií pre zhodnotenie neistoty v modeli. Ako objektívne kritérium výberu týchto dvadsiatich simulácií bol zvolený priemer hodnôt NSE (objektívna funkcia) zo všetkých vodomerných staníc. Výkonnosť modelu bola v každej stanici navyše hodnotená s použitím mier výkonnosti: PBIAS a E_{max} . Využitím dvadsiatich simulácií, a nielen optimálneho setu parametrov, je do istej miery

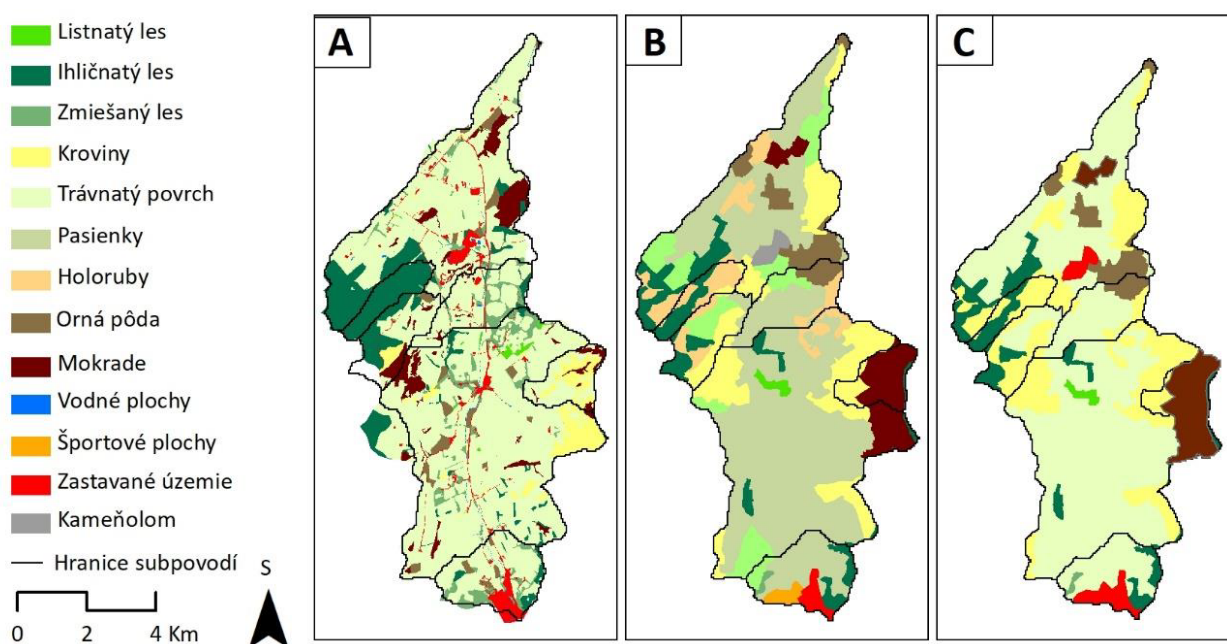


Obr.1 Experimentálne povodie Eddleston Water. A: Poloha v rámci západnej Európy, B: Poloha v rámci juhovýchodného Škótska, C: Povodie Eddleston Water. Celková plocha povodia: 69 km²; Middle Burn 2,1 km², Shiplaw Burn 3,6 km²; Middle Longcote 3,7 km²; Earlyvale 26,1 km²; Darnhall Mains 30,3 km²; Kidston Mill 62,7 km²; Zdroj podkladových dát: EDINA, Digimap Ordnance Survey Service; Autor: Ruman, 2020

umožnené do výsledkov zahrnúť koncept ekvifinality (Beven, 2012). Pre detailné zhodnotenie neistoty by bolo vhodné využiť oveľa väčší počet simulácií, podobne ako Heisterman a Kneis (2011). Avšak v dôsledku problémov spojených s výpočtovou rýchlosťou distribuovaného modelu, je táto možnosť extrémne časovo náročná. Po skončení výpočtu spojeného modelu MIKE SHE/MIKE 11 prebehol výpočet vodnej bilancie využitím nástroja WaterBalance (DHI, 2014a) a bola vyhodnotená chyba vodnej bilancie. Maximálny výpočtový časový krok modelu MIKE SHE bol pevne nastavený na jednu hodinu. Simulačný čas hydraulického modelu MIKE 11 bol nastavený na päť sekúnd. Aplikovaný bol Mann-Whitney U test pre vzájomné porovnanie kalibrácie a validácie s hodnotou $p = 0,005$. Pozorované a simulované prietoky boli vizualizované použitím hydrogramov najvýznamnejších povodňových udalostí v kalibračnej a validačnej perióde, ako aj s použitím kriviek prekročenia hodinových prietokov.

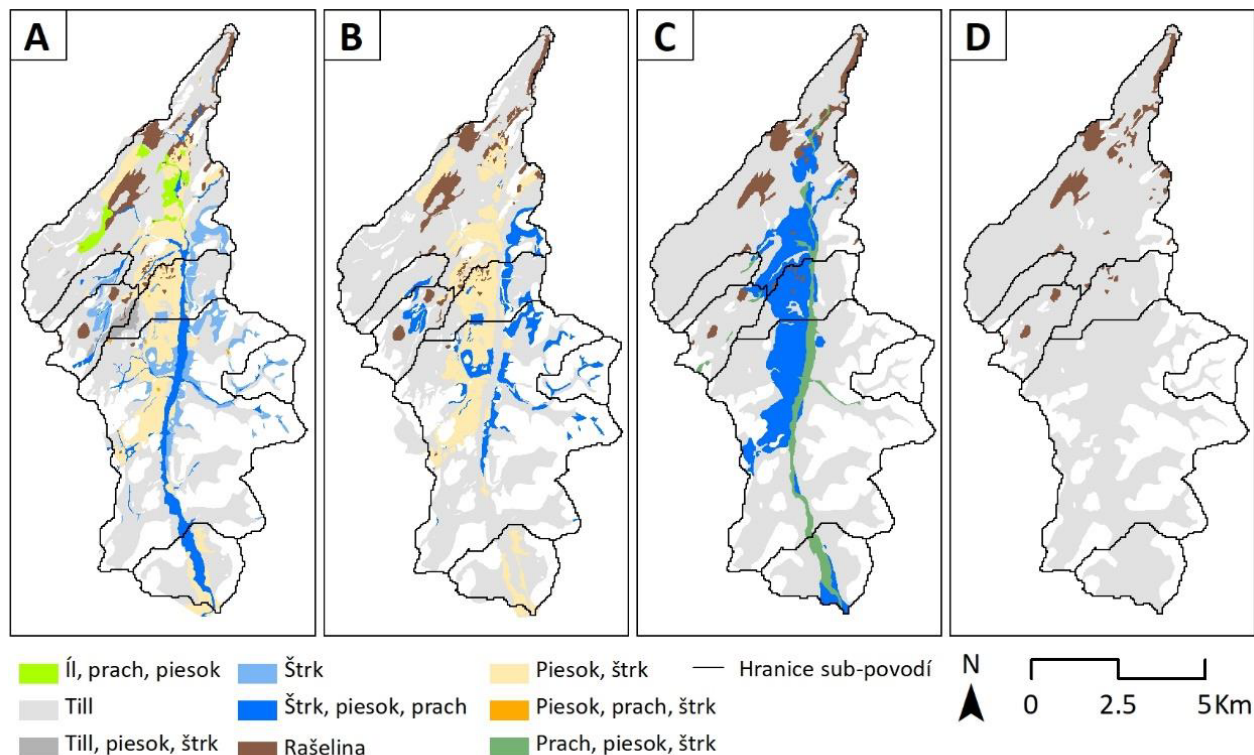
Štruktúra modelu založená na rozdielnej priestorovej reprezentácii krajinného pokryvu a kvartérnej geológie

Pri zvyšných troch variantoch modelu (Krajinný pokryv, Kvartérna geológia a Kombinácia) bola do veľkej miery použitá štruktúra popísaná vyššie. Rozdiely oproti Referenčnému modelu spočívali v priestorovom rozložení jednotlivých kategórií krajinného pokryvu a kvartérnej geológie, ako i v počte kategórií. V prípade variantu Krajinný pokryv boli využité dáta CORINE Land Cover z roku 2012 (CLC, 2012) dostupné v gride 100 x 100 m. Opätovne došlo k redukcii počtu kategórií z dôvodu zníženia počtu parametrov a zjednodušenia modelu. Redukcia predstavovala zníženie počtu z pôvodných trinástich kategórií na konečných osem (vodné plochy zobrazené na vegetačnom mapovaní biotopov sa na území nevyskytovali). Kategórie boli volené zhodne s Referenčným modelom. Priestorové rozdiely v oboch verziách i originálna mapa CORINE Land Cover sú viditeľné na Obr. 2. Pre veľký počet kategórií v originálnej mape mapovania biotopov nie je táto mapa vizualizovaná. Najvýraznejšie rozdiely v oboch mapách krajinného pokryvu sú v prípade subpovodia Middle Burn, kde došlo k poklesu plochy ihličnatého lesa v porovnaní s Referenčným modelom. Ďalšie výrazné rozdiely sú v prípade subpovodia Midde Longcote a sú spojené s väčším podielom mokradí. Kalibrácia a validácia modelu neprebehla. Boli použité parametrové sety, ktoré boli získané z dvadsiatich najlepších simulácií Referenčného modelu. Hodnoty parametrov boli z nakalibrovaného Referenčného modelu prenesené do Krajinného pokryvu. Keďže model pracuje s gridom, boli i tieto mapy (a grafy) založené na rozlíšení modelu 50 x 50 m.



Obr.2 Porovnanie rozdielov v schematizácii krajinného pokryvu. A: Referenčný model, B: Originálna mapa CORINE Land Cover, C: Krajinný pokryv. Originálna mapa z mapovania biotopov zobrazená nie je pre veľké množstvo kategórií krajinného pokryvu. Zdroj podkladových dát: EHS, 2009; CLC, 2012; GCS: OSGB 1936 Autor: Ruman, 2020

V prípade variantu Kwartérna geológia bola rovnako použitá štruktúra Referenčného modelu. Tentokrát bol rozdiel v priestorovom rozložení jednotlivých kategórií Kwartérnej geológie a v počte týchto kategórií. Toto rozloženie vychádzalo z Mapy kvartérnej geológie v mierke 1:50 000. Rovnako ako v prípade mapy mierky 1:25 000, i teraz došlo k redukcii počtu kategórií s cieľom zníženia počtu kalibrovaných parametrov a zjednodušenia modelu (Obr. 3). Z pôvodných štyroch kategórií v mape



Obr. 3 Porovnanie rozdielov v schematizácii kvartérnej geológie. A: Originálna mapa mierky 1:25 000, B: Zjednodušená schematizácia Referenčného modelu po agregácii kategórií, C: Originálna mapa mierky 1:50 000, D: Zjednodušená schematizácia Kwartérnej geológie po agregácii kategórií. Zdroj dát: BGS, 2012.

mierky 1:50 000 zostali dve kategórie totožné s verziou presnej Kwartérnej geológie (kategórie štrk a štrk a piesok sa v tejto mape nevyskytovali). Kritériom pre spájanie jednotlivých kategórií boli informácie o charaktere sedimentov. Kalibrácia a validácia modelu neprebehla. Bol použitý transfer parametrov popísaný vyššie. Najväčšie rozdiely medzi Referenčným modelom a Kwartérnou geológiou boli v prípade povodií Shiplaw Burn, Early Vale, Darnhal Mains a Kidston Mill a súviseli s väčšou plochou tillu.

Posledný variant (Kombinácia) bol založený na Mape krajinného pokryvu z CORINE Land Cover a Mape kvartérnych sedimentov v mierke 1:50 000. Rovnako ako pri predchádzajúcich variantoch, ani v tomto prípade nedošlo ku kalibrácii a validácii modelu, ale bol použitý transfer parametrov z Referenčného modelu. Zhrňujúce informácie o štruktúre modelu sú zobrazené v Tab. 1.

Tab.1 Charakteristiky štyroch modelových variantov

Verzia modelu	Typ vstupných dát s počtom originálnych a spojených kategórií
Referenčný model	Mapa kvartérnej geológie 1:25 000 (8 - 4), Mapa mapovania biotopov (39 - 8)
Krajinný pokryv	Mapa kvartérnej geológie 1:25 000 (8 - 4), Corine Land Cover (13 - 7)
Kwartérna geológia	Mapa kvartérnej geológie 1:50 000 (4 - 2), Mapa mapovania biotopov (39 - 8)
Kombinácia	Mapa kvartérnej geológie 1:50,000 (4 - 2), Corine Land Cover (13 - 7)

Hodnotenie rozdielov vo výstupoch modelu

Hodnotenie rozdielov štyroch variantov spojených modelov MIKE SHE/MIKE 11 vychádzalo z porovnania mier výkonnosti (i) a vybraných charakteristík vodnej bilancie (ii) pre hydrologický rok 2011/2012. Ako referenčný variant bol v oboch prípadoch uvažovaný Referenčný model. Hodnotenie prebehlo na základe dát z vodomerných staníc v subpovodiach: Early Vale, Darnhal Mains, Kidston

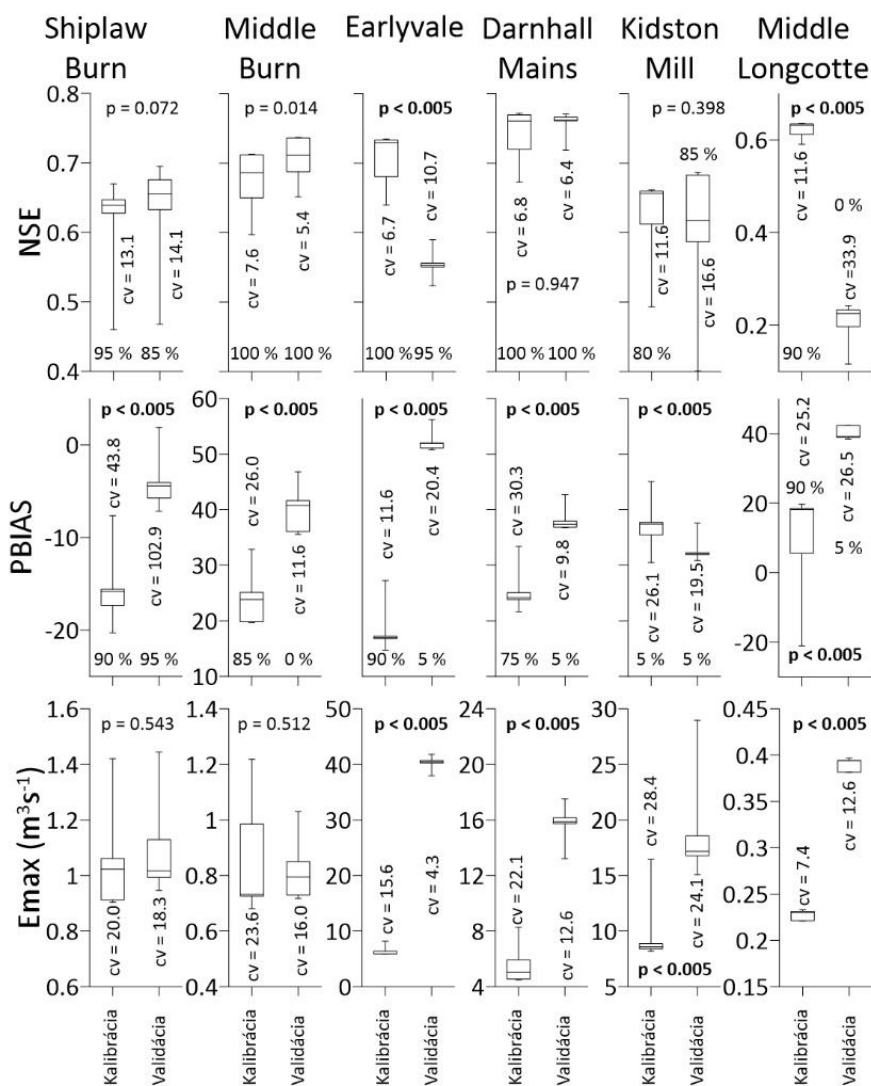
Mill, Middle Burn, Shiplaw Burn a Middle Longcote. Výsledky sú založené na osemdesiatich simuláciách (20 parametrových setov × 4 varianty modelov).

Pri hodnotení založenom na mierach výkonnosti boli zvolené miery výkonnosti použité pri kalibrácii a validácii modelu (NSE, PBIAS a Emax). Pre každé subpovodie boli vybrané dve hlavné zložky vodnej bilancie: Drenáž do vodného toku a aktuálna evapotranspirácia v prípade subpovodia Middle Longcote a Povrchový odtok do vodných tokov (z modelu MIKE SHE do hydraulického modelu MIKE 11) a aktuálna evapotranspirácia v prípade ostatných subpovodií. Tieto zložky boli vybrané, pretože predstavovali najvyššie podiely vo vodnej bilancii subpovodií. Jedná sa o výstupy modelu, pre ktoré neboli k dispozícii merané hodnoty, a preto nebolo možné overiť ich presnosť. Aplikovaný bol test Kruskal-Wallis ($p = 0,001$), aby bolo možné stanoviť, či v mierach výkonnosti a zložkách vodnej bilancie existujú signifikantné rozdiely naprieč štyrmi variantmi modelu. Následne bolo uskutočnené párové porovnanie štyroch variantov použitím Mann-Whitney U testu ($p = 0,005$). Na základe testu boli určené signifikantné zmeny na jednej strane a identifikovaný hlavný pôvodca zmeny (Krajinný pokryv/Kvartérna geológia/Kombinácia). Z dvadsiatich parametrových setov boli vypočítané i priemerné hodnoty mier výkonnosti a zložiek vodnej bilancie, aby bolo možné deterministicky porovnať rozdiely medzi Referenčným modelom a zvyšnými variantmi.

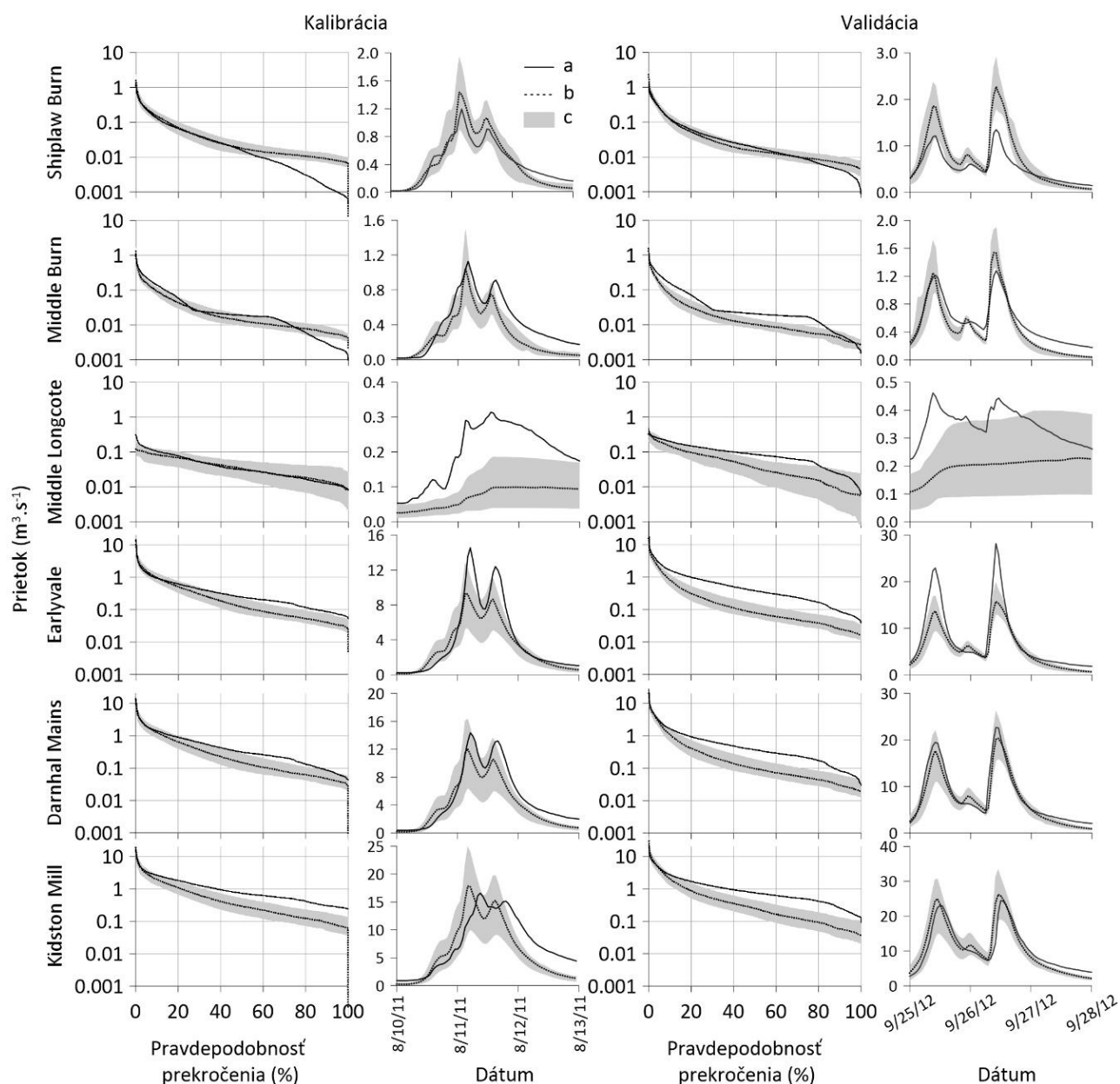
Výsledky

Kalibrácia validácia referenčného modelu

V kalibračnej perióde boli zaznamenané lepšie hodnoty mier výkonnosti NSE (0,50 – 0,69) v porovnaní s periódou validačnou (0,50–0,60). Vo všeobecnosti možno konštatovať, že miery výkonnosti založené na dynamike prietokov (NSE a Emax) a vodnej bilancie dosahovali lepšie výsledky v kalibračnej ako vo validačnej perióde (Obr. 4). Celková zhoda medzi pozorovanými a simulovanými prietokmi bola kvalitatívne dobrá. Simulované maximálne prietoky sa vyskytovali približne o 1,5 hodiny skôr ako pozorované kulminácie. Model bol schopný verne reprodukovat' povodňové hydrogramy, no vyznačoval sa podhodnocovaním bežných a nízkych prietokov (Obr. 5). Rozdiely v mierach výkonnosti medzi jednotlivými subpovodiami sú vizualizované na Obr. 28. Negatívne hodnoty PBIAS indikujú podhodnotenie bilancie hodinových prietokov, ktoré sa vyskytlo pri väčšine staníc. Výnimkou bola stanica Shiplaw Burn, kde bolo zaznamenané



Obr. 4 Výsledky kalibrácie a validácie v subpovodiach Eddleston Water. Krabicové grafy boli vytvorené z dvadsiatich simulácií ($n = 20$). Chybové úsečky predstavujú 10. a 90. percentil. Zobrazené sú výsledky koeficientu variácie (cv). Percentá ukazujú na prípady, v ktorých simulácie splnili kritérium uspokojivého modelu..



Obr. 5 Vizualizácia výsledkov kalibrácie a validácie pomocou kriviek prekročenia priemerných hodinových prietokov a hydrogramov vybraných povodňových udalostí. Legenda: a – pozorované prietoky, b – priemerná hodnota z dvadsiatich simulácií, c – rozpätie definované dvadsiatimi simuláciami

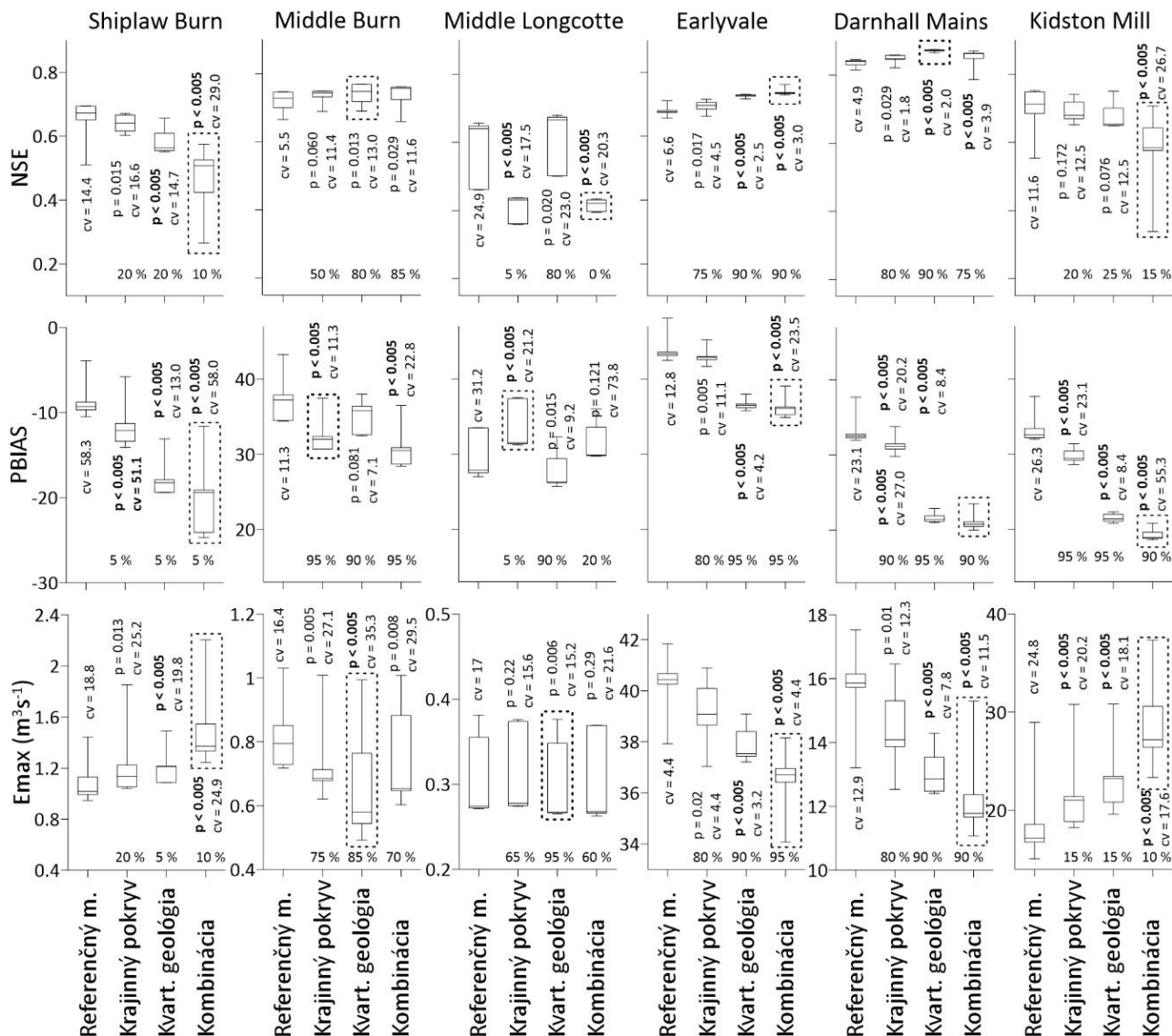
nahodnotenie indikované pozitívnymi hodnotami PBIAS (Obr. 4). Na základe Mann-Whitney U testu bolo zistené, že rozdiely v NSE v dvadsiatich parametrových setoch pre kalibráciu a validáciu boli významné pri subpovodiach Early Vale a Middle Longcote. V prípade PBIAS a Emax boli zistené významné rozdiely medzi výsledkami kalibračnej a validačnej periódy pre všetky subpovodia. Vo väčšine prípadov boli zistené nižšie hodnoty koeficientu variácie vypočítané pre kalibračnú periódu v porovnaní s periódou validačnou. Miery výkonnosti však v tomto tvrdení neboli jednotné (pozri Obr. 4 pre detail). Priemerná absolútna hodnota chyby vodnej bilancie dosahovala hodnoty 0,2 %, pričom najväčšia dosiahnutá absolútna chyba bola 1,3 %. Nakalibrované hodnoty parametrov sú zobrazené v Tab. 2.

Tab. 2 Nakalibrované hodnoty vybraných parametrov

POVRCHOVÝ ODTOK	Kategória/ parameter	Manning M	Root Depth (mm)	LAI (max)	Crop Coefficient (max)		
	<i>Ihličnatý les</i>	1,25 - 2,5	1562	6,5	1		
	<i>Zmiešaný les</i>	1,25 - 2,5	1526	5,5	0,7 - 1		
	<i>Listnatý les</i>	1,25 - 2,5	1526	4 - 6,5	0,8 - 1		
	<i>Zastavané</i>	20 - 100	0	0,9 - 1,25	1		
	<i>Trávnatý povrch</i>	30	540	4	1		
	<i>Vodná plocha</i>	100	0	1	1		
	<i>Kroviny</i>	10	1137	4,0	0,7 - 0,8		
	<i>Močiare</i>	20	150	4,0	1		
	<i>Orná pôda</i>	16,67 - 28,57	0 - 880	2 - 4	1		
		Detention Storage (mm)		Manning n			
<i>Jednotná hodnota</i>		0,6 - 5		0,045 - 0,055			
NENASÝTENÁ ZÓNA	Kategória/ parameter	Saturated moisture content	Residual Moisture Content	Alpha	n	Saturated Hydraulic Conductivity	Bulk Density (kg,m3)
	<i>Hlinito</i>	0,415	0,041	0,029	1,496	1,46-5	1330
	<i>Piesočnato</i>	0,387	0,039	0,038	1,47	2,77-5	1310
	<i>Rašelina</i>	0,4	0,02	0,12	1,7	1,00-7	1200
	<i>Hlinitá</i>	0,41	0,074	0,01	1,49	7,98-7	1470
	<i>Zastavané</i>	0,423	0,056	0,014	1,486	1,00-13	2400
	<i>Sedimenty</i>	0,46	0,034	0,19	1,8	7,00-5	1345
	<i>Materská</i>	0,387	0,039	0,383	1,47	1,00-5	2400
			Maximum bypass Fraction				
	<i>Jednotná hodnota</i>		0,15 - 0,35				
NASÝTENÁ ZÓNA	Kategória/ parameter	Horizontal Hydraulic Conductivity (m,s-1)		Vertical Hydraulic Conductivity (m,s-1)	Specific Yield	Specific Storage	
	<i>Hlinito</i>	1,46-7		1,46-6	0,2	0,1	
	<i>Piesočnato</i>	1,26-6 - 6,28-7		1,26-5 - 6,28-7	0,2	0,1	
	<i>Rašelina</i>	1,00-6 - 4,00-6		1,00-7 - 4,00-7	0,2	0,1	
	<i>Hlinitá</i>	1,28-7		1,28-6	0,2	0,1	
	<i>Zastavané</i>	2,22-13		2,22-12	0,2	1,00-3	
	<i>Piesok, prach íl</i>	4,42-6		4,42-5	0,1	1,00-4	
	<i>Till</i>	1,20-8 - 2,40-8		1,20-7 - 2,40-7	0,17	0,017	
	<i>Piesok a štrk</i>	1,58-6		1,58-5	0,24	5,33-4	
	<i>Rašelina</i>	1,00-6 - 4,00-6		1,00-7 - 4,00-7	0,2	1,00-3	
<i>Štrk</i>	3,00-6 - 1,00-6		1,00-7 - 3,00-7	0,24	7,55-4		
<i>Drobové horniny</i>	1,00-6 - 3,00-7		6,00-6 - 1,00-7	0,21	5,25-4		
		Drainage Time Constant (sec)		Drainage Level (m)			
<i>Jednotná hodnota</i>		1,00-7		-0,3			

Hodnotenie rozdielov vo výstupoch modelu

Pri porovnaní štyroch vyriantov modelu potvrdil test Kruskal-Wallis signifikantné rozdiely ($p = 0,001$) pre väčšinu mier výkonnosti a subpobd. Výnimku tvorili NSE v subpovodí Middle Burn ($p = 0,015$) a Emax v subpovodí Middle Longcote ($p = 0,033$). Model bol citlivejší na zmeny v Emax v porovnaní so zvyšnými mierami výkonnosti.



Obr. 6 Porovnanie štyroch variantov reprezentujúcich rozdielne priestorové rozloženie krajinného pokryvu a kvartérnej geológie v subpovodiach Eddleston Water v hydrologickom roku 2011/2012 na základe mier výkonnosti. Chybové úsečky predstavujú 10. a 90. percentil ($n = 20$). Zobrazené sú výsledky Mann-Whitney U testu ($p = 0,005$, signifikantné výsledky sú zvýraznené), ako aj koeficient variácie (cv). Varianta generujúca naväčšie rozdiely v porovnaní s Referenčným modelom je zvýraznená obdĺžnikom s prerušovanou líniou. Percentá zobrazujú, v koľkých prípadoch (z dvadsiatich simulácií) dosiahol daný variant modelu lepšiu zhodu s realitou v porovnaní s Referenčným modelom.

Najvýraznejšie zmeny v porovnaní s Referenčným modelom sa očakávajú vyskytovali u variantu Kombinácia vo väčšine subpovodí a pre obe úrovne porovnania. Boli zaznamenané i dve výnimky, a práve tie sú popísané v texte nižšie. Pri Mann-Whitney U teste boli najväčšie rozdiely v porovnaní s Referenčným modelom spôsobené variantom Krajinný pokryv a zaznamenané boli v subpovodiach Middle Burn a Middle Longcote. Mier výkonnosti však neboli v tomto tvrdení jednotné (Obr. 6). Absolútne rozdiely medzi priemermi mier výkonnosti štyroch variantov modelu (vypočítané ako rozdiel medzi Referenčným modelom a tromi variantmi z výstupov modelu založenom na dvadsiatich parametrových setoch) sú zobrazené v Tab. 3. V prípade subpovodí Middle Longcote (PBIAS priemer)

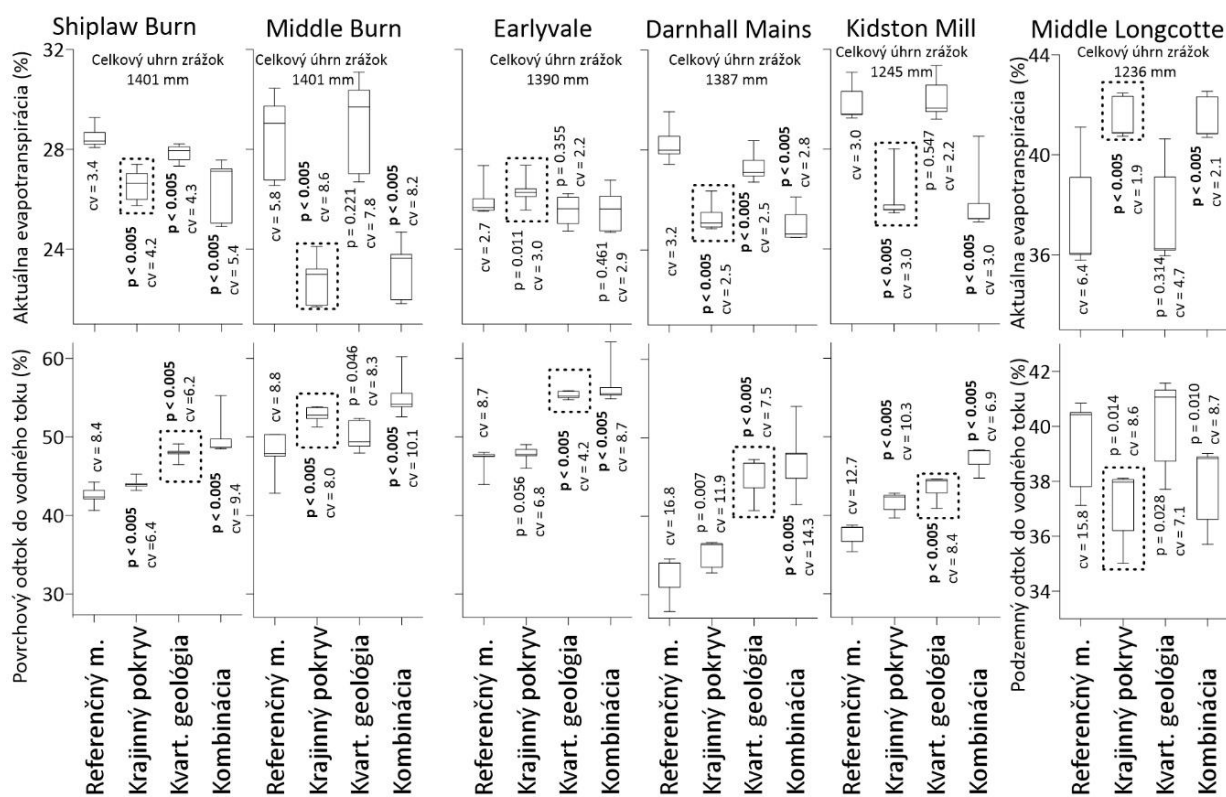
boli najväčšie rozdiely spôsobené Krajinným pokryvom. V prípade subpovodia Middle Burn (Emax priemer) to bola Kvartérna geológia.

Tab. 3: Absolútne rozdiely v priemerných hodnotách mier výkonnosti. Rozdiely boli vypočítané medzi Referenčným modelom a zvyšnými troma variantmi. Pre Emax boli hodnoty prepočítané na percentá, aby bolo možné vzájomné porovnanie subpovodí. KP – Krajinný pokryv, Geol. – Kvartérna geológia, Komb. – Kombinácia.

Subpovodie/Miera výkonnosti	NSEpriemer			PBIASpriemer			E _{max} priemer (%)		
	KP	Geol.	Komb.	KP	Geol.	Komb.	KP	Geol.	Komb.
Shiplaw Burn	0,08	0,11	0,20	5,50	9,70	15,50	20,30	20,40	41,70
Middle Burn	0,04	0,05	0,05	6,10	3,00	8,80	20,80	30,40	24,40
Middle Longcote	0,18	0,04	0,17	7,60	4,30	6,10	5,50	5,10	19,90
Early Vale	0,04	0,05	0,06	3,80	8,50	11,10	4,50	7,20	9,60
Darnhall Mains	0,02	0,04	0,04	5,50	12,90	14,00	13,70	18,70	24,10
Kidston Mill	0,06	0,07	0,15	7,20	13,40	17,40	23,90	33,30	54,10

Vo väčšine subpovodí generoval variant Kvartérna geológia najnižšie hodnoty koeficientu variácie (Obr. 6) pre väčšinu mier výkonnosti. Referenčný model dosiahol najnižšie hodnoty koeficientu variácie v subpovodiach Shiplaw Burn, Middle Burn (zhodne NSE a Emax) a Kidston Mill (NSE). Opätovne to dokumentuje rozdielne výsledky jednotlivých mier výkonnosti.

Na základe porovnania rozdielov v hodnotách NSE v Referenčnom modeli v porovnaní s troma variantmi vo všetkých subpovodiach a pre všetkých dvadsať simulácií (3 varianty modelu x 6 subpovodí



Obr. 7 Porovnanie štyroch variantov reprezentujúcich rozdielne priestorové rozloženie krajinného pokryvu a kvartérnej geológie v subpovodiach Eddleston Water v hydrologickom roku 2011/2012 na základe zložiek vodnej bilancie. Chybové úsečky predstavujú 10. a 90. percentil ($n = 20$). Zobrazené sú výsledky Mann-Whitney U testu ($p = 0,005$, signifikantné výsledky sú zvýraznené), ako aj koeficient variácie (cv). Variant generujúci naväčšie rozdiely v porovnaní s Referenčným modelom je zvýraznený obdĺžnikom s prerušovanou líniou.

x 20 hodnôt mier výkonnosti = 360 hodnôt) sme boli schopní vyhodnotiť vplyv transferu parametrov na výstupy modelu. Zo všetkých prípadov dosiahli 3 varianty modelu (Krajinný pokryv, Kvarterná geológia, Kombinácia) v 50,6 % prípadov vyššie (tzn. lepšie) hodnoty NSE. Vo zvyšných prípadoch to bol Referenčný model. Tento podiel bol vyšší pre PBIAS (68,1 %), ale nižší pre Emax (41,7 %). V prípade subpovodí Middle Burn, Early Vale a Darnhall Mains dosahovali vo veľkej väčšine prípadov všetky tri miery výkonnosti lepšie hodnoty variantu, založené na menej presných dátových vstupoch ako variant Referenčný model (Obr. 6). Opačný výsledok bol zaznamenaný pri subpovodí Shiplaw Burn, kde všetky tri miery výkonnosti označili Referenčný model ako variant, ktorý generoval najlepšie hodnoty mier výkonnosti. Vo zvyšných subpovodiach boli zaznamenané rozdielne výsledky použitím troch mier výkonnosti.

Výsledky založené na rozdieloch v jednotlivých zložkách vodnej bilancie sú zobrazené na Obr. 7. Test Kruskal-Wallis ($p = 0,001$), vypočítaný pre jednotlivé komponenty, potvrdil signifikantné zmeny medzi štyrmi variantmi modelu a vo väčšine subpovodí. Výnimky boli zaznamenané pri subpovodiach Early Vale (Aktuálna evapotranspirácia – AE, $p = 0,004$) a Middle Longcote (Drenáž do vodných tokov – DR, $p = 0,027$).

Najväčšie rozdiely medzi tromi variantmi modelu a Referenčným modelom pre povrchový odtok do vodných tokov boli v subpovodí Middle Burn spôsobené variantom Krajinný pokryv. V subpovodí Kidston Mill to bola Kvarterná geológia. Na základe testu boli naväčšie rozdiely v aktuálnej evapotranspirácii spôsobené Krajinným pokryvom v subpovodí Middle Longcote a Early Vale.

Absolútne priemerné rozdiely medzi Referenčným modelom a jednotlivými variantmi v jednotlivých zložkách vodnej bilancie sú zobrazené v Tab. 4.

Tab. 4: Absolútne rozdiely v hlavných zložkách vodnej bilancie jednotlivých subpovodí Eddleston Water v hydrologickom roku 2011/2012. Drenáž do vodných tokov bola použitá iba v prípade subpovodia Middle Longcote. KP – Krajinný pokryv, Geol. – Kvarterná geológia, Komb. – Kombinácia.

Subpovodie/ Komponent vodnej bilancie	Povrchový odtok do vodného toku priemer/ Drenáž do vodného toku priemer (%)			Aktuálna evapotranspirácia priemer (%)		
	KP	Geol.	Komb.	KP	Geol.	Komb.
Shiplaw Burn	1,8	5,5	7,1	1,9	0,6	1,9
Middle Burn	4,4	2,0	6,7	5,6	0,8	5,1
Middle Longcote	3,3	2,0	5,7	4,1	0,8	4,0
Early Vale	1,0	8,0	9,3	0,5	0,5	0,6
Darnhall Mains	3,1	12,7	15,1	3,0	1,0	3,3
Kidston Mill	4,8	6,6	12,5	4,0	0,5	4,2

Najväčšie rozdiely v aktuálnej evapotranspirácii v subpovodiach Middle Burn a Middle Longcote boli spôsobené variantom Krajinný pokryv. Vo väčšine prípadov produkovala Kvarterná geológia najnižšie hodnoty koeficientu variácie (7). Smer, ktorým prebieha zmena v aktuálnej evapotranspirácii medzi Referenčným modelom a zvyšnými modelmi, je rôzny naprieč subpovodiami a verziami. Na druhej strane je možné konštatovať konzistentný nárast v povrchovom odtoku do vodných tokov pri troch variantoch s menej presnými dátami v porovnaní s Referenčným modelom. V dôsledku absencie akýchkoľvek meraných hodnôt jednotlivých komponentov nie je možné vyhodnotiť, či menej presné dátové vstupy generovali lepšie výsledky ako Referenčný model, ani overiť presnosť konkrétnych hodnôt zložiek vodnej bilancie.

Celková syntéza dvoj-úrovňového porovnania (miery výkonnosti a zložky vodnej bilancie) je zobrazená v Tab. 5. Pri porovnaní iba Krajinného pokryvu a Kvarternej geológie boli rozdiely oproti Referenčnému modelu vyššie pri variante Kvarterná geológia. Výnimky nastali iba v prípade subpovodí Middle Burn and Middle Longcote. Pri porovnaní všetkých troch variantov s Referenčným modelom vynikli najväčšie rozdiely spôsobené Kombináciou. Vo väčšine subpovodí generovali zmeny v dôsledku Kvarternej geológie najnižšie hodnoty koeficientu variácie.

Tab. 5: Zhrňujúca tabuľka dvojúrovňového porovnania. Hviezdička označuje nesignifikantné výsledky na základe testu Kruskal-Wallis. Skratky Geol a KP označujú variant s najvyššími zmenami medzi Referenčným modelom, Krajinným pokryvom (KP) a Kvartérnou geológiou (Geol). Zvýraznený text označuje variant generujúci najvyššie zmeny v porovnaní Referenčného modelu a zvyšných variantov (ak text zvýraznený nie je, znamená to, že najväčšia zmena bola spôsobená Kombináciou). Horný index označuje variant s najnižšou hodnotou koeficientu variácie (Referenčný model – R, Krajinný pokryv – K, Kvartérna geológia – G).

Subpovodie	Miera výkonnosti			Komponent vodnej bilancie	
	NSE	E _{max}	PBIAS	OR/DR	AE
Shiplaw Burn	Geol ^R	Geol ^R	Geol	Geol ^R	KP ^G
Middle Burn	Geol^{*R}	Geol^R	KP	KP ^R	KP^K
Middle Longcote	KP ^K	Geol^{*K}	KP	KP [*]	KP^G
Early Vale	Geol ^G	Geol ^G	Geol	Geol ^G	KP^{*G}
Darnhall Mains	Geol ^K	Geol ^G	Geol	Geol ^G	KP ^G
Kidston Mill	Geol ^R	Geol ^G	Geol	Geol^K	KP ^G

Diskusia

Pre splnenie všetkých cieľov bola použitá manuálna kalibrácia modelu. Manuálna kalibrácia je subjektívny prístup a existujú kritické štúdie zameriavajúce sa na jej nedostatky (Vázquez & Hample, 2014). Naproti tomu výhody manuálnej kalibrácie boli popísané napríklad v práci (Vaze et al., 2012). V práci Vázquez a Hampel (2014) boli zistené výrazné problémy pri prehľadávaní priestoru parametrov, zapríčinené práve manuálnou kalibráciou. To viedlo k odlišným záverom pri stanovení citlivosti parametrov kontrolujúcich evapotranspiráciu v modele MIKE SHE. Bolo by preto vhodné uskutočniť automatickú kalibráciu modelu a výstupy z nej porovnať s výsledkami prezentovanými v tejto práci. Aplikácia automatickej kalibrácie je však v prípade distribuovaných, procesne orientovaných modelov do istej miery problematická v dôsledku viacrozmernosti priestoru parametrov. Zároveň bol kalibrovaný iba Referenčný model. Na základe tohto postupu je možné eliminovať vplyv objektívnych parametrov. Ako bolo diskutované v prácach Heistermann a Kneis (2011) a Yen et al. (2015), vplyv rozdielne presných dát by bol kalibráciou na všetky varianty modelu týmito efektívnymi parametrami neutralizovaný. Kalibrácia založená na dvadsiatich najlepších simuláciách, definovaná objektívnou funkciou NSE, získanou ako priemer z dvadsiatich simulácií. Čiastočne bol tento postup inšpirovaný prácou Heistermann a Kneiss (2011). Po získaní dvadsiatich setov parametrov bol uskutočnený transfer parametrov z tohoto modelu pre ďalšie tri varianty, reprezentujúce rozdielne priestorové rozloženie krajinného pokryvu kvartérnej geológie a ich kombinácie.

Referenčný model poskytoval na základe objektívnej funkcie NSE uspokojivé výsledky v porovnaní s pozorovanými hodinovými prietokmi v kalibračnej i validačnej perióde pre všetkých dvadsať simulácií. Uspokojivý model bol definovaný prahovou hodnotou $\geq 0,5$ (Moriassi et al., 2007). Väčšina simulácií vo validačnej perióde však nedosiahla akceptovateľné výsledky ($\pm 25\%$). Neuspokojivé výsledky modelu môžu byť prisúdené signifikantne odlišným podmienkam medzi kalibračnou a validačnou periódou, neadekvátnej a nesprávnej kalibrácii modelu, nepresným vstupným dátam, chybným pozorovaným charakteristikám, a v neposlednom rade neschopnosti modelu reprodukovať hydrologické procesy v povodí. Pre vyhodnotenie rozdielnych podmienok v kalibračnej a validačnej perióde, ktoré mohli ovplyvniť výsledky PBIAS, boli pre obdobie 10. 3. 2011–10. 3. 2012 (vo výstupoch pomenované ako 2011) a 10. 3. 2012–10. 3. 2013 (vo výstupoch pomenované ako 2012) vypočítané tri

charakteristiky: kumulatívny úhrn zrážok, priemerný hodinový simulovaný a pozorovaný prietok. Rozdiely medzi obdobiami 2012–2011 sú zobrazené v Tab. 13. V prípade všetkých subpovodí boli zaznamenané vyššie hodnoty za obdobie 2012, ktoré spadá do validačnej periódy. Táto hypotéza je navyše potvrdená i výsledkami Mann-Whitney U testu, ktorý bol použitý pre porovnanie rozdielov medzi kalibračnou a validačnou periódou. Pri porovnaní všetkých subpovodí sú výrazné rozdiely v priemerných pozorovaných prietokoch v subpovodiach Early Vale a Middle Longcote, ktoré nekorešponujú s rozdielmi v pozorovaných zrážkach. To ukazuje na pravdepodobný problém v kvalite pozorovaných prietokov, ktoré môžu byť následne zodpovedné za najväčšie rozdiely v PBIAS v subpovodí Middle Longcote. Ideálnym variantom by bolo použitie dlhšej periódy, ktorá by priniesla odpovede na tieto otázky. V dôsledku zásahov do koryta toku i manažmentových opatrení na ploche povodia to však nie je možné uskutočniť.

Vplyv rozdielnej priestorovej reprezentácie kvartérnej geológie a krajinného pokryvu na výstupy modelu bolo možné overiť iba pomocou jednej charakteristiky, pre ktorú boli k dispozícii pozorované hodnoty – priemerný hodinový prietok. Jedná sa o najdostupnejšiu charakteristiku, ktorá v sebe integruje hydrologickú odpoveď povodia. Použitie väčšieho počtu dostupných meraných charakteristík (napr. aktuálna evapotranspirácia, vlhkosť pôdy, hladina podzemnej vody a pod.) by umožnilo zníženie neistoty v simulácii hydrologických procesov v jednotlivých subpovodiach (Beven, 2006) a detailné preskúmanie vplyvu odlišných vstupov na ďalšie zložky vodnej bilancie (Yen et al., 2015).

Napriek tomu, že výsledky testov Kruskal-Wallis a Mann-Whitney potvrdili významné rozdiely v mierach výkonnosti a zložkách vodnej bilancie medzi Referenčným modelom a variantmi s menej presnými vstupmi, tieto rozdiely sú pri praktickom hydrologickom modelovaní väčšinou zanedbateľné. Táto skutočnosť je v súlade s výsledkami práce Yen et al. (2015). Výnimkou boli rozdiely v Emax, ktoré boli konštantne vysoké. Môže to poukazovať na fakt, že práve povodňové prietoky sú citlivejšie ako ročná vodná bilancia povodia na zmeny v priestorovom rozložení fyzikogeografických charakteristík (Huisman et al., 2009). Túto hypotézu potvrdzuje i štúdia Kalantari et al. (2014), v ktorej autori zaznamenali 60 % nárast v kulmináčnom prietoku, zapríčinený 30 % poklesom plochy lesa. Je ale pravdepodobné, že tieto rozdiely môžu byť neutralizované, prípadne znížené opätovnou kalibráciou, za cenu zvýšenia výstupnej neistoty (Vázquez a Hampel, 2014; Yen et al., 2015; Alvarenga et al., 2016).

Vo väčšine subpovodí generovali modelové varianty Krajinný pokryv, Kvartérna geológia a Kombinácia lepšiu zhodu s pozorovanými prietokmi ako Referenčný model. Použitie menej presných vstupov teda znamenalo lepšie výsledky modelu. Tento záver nie je ojedinelý a nachádzame ho vo viacerých prácach (Bell & Moore, 2000; Vázquez & Hamle, 2014; Camargos et al., 2018). V práci Bella a Moora (2000) autori vyhodnocovali citlivosť modelov na zrážkové dáta o rozdielnych priestorových mierkach. V niektorých prípadoch došli k záveru, že zrážkové dáta s nižším rozlíšením poskytlí najlepšiu zhodu s realitou. Riešenie tejto situácie vidia v zlepšení štruktúry modelu tak, aby bol model schopný vyťažiť informácie z presných dát. Vázquez a Hampel (2014) skúmali vplyv rozdielnych vstupov potenciálnej evapotranspirácie s použitím modelu MIKE SHE a metodiky GLUE. Autori vyhodnotili, že použitím menej kvalitných vstupov boli dosiahnuté porovnateľné a v niektorých prípadoch i lepšie predikcie modelu. Túto skutočnosť autori prisudzujú vzájomnej interakcii a kombinácii parametrov modelu, ktoré vykompenzovali rozdiely medzi vstupmi. V štúdiu Camargos et al. (2018) použili autori model SWAT pre vyhodnotenie rozdielnych vstupov krajinného pokryvu, digitálneho modelu terénu a pôdnych charakteristík. V ich porovnaní dosiahli vo vybraných prípadoch scenáre s menej presnými charakteristikami pôd a digitálneho modelu terénu lepšiu zhodu s pozorovanými prietokmi. Záver, že v niektorých prípadoch generujú menej presné dáta lepšie výsledky modelu, je však v rozpore so závermi štúdie Yen et al. (2015), v ktorej autori porovnávali rozdielnu kvalitu máp krajinného pokryvu. Dôvod tohto rozporu môže ležať na jednej strane v už spomínanej kalibračnej stratégii (manuálna kalibrácia, transfer parametrov z Referenčného modelu do zvyšných variant) (Yen et al., 2015), na strane druhej v štruktúre modelu (Bell & Moore, 2000) a nakoniec v ďalších neistotách, ktoré nachádzame v procese hydrologického modelovania (Fatichi et al., 2016).

Pri hodnotení chyby v hydrologickej bilancii povodia boli zaznamenané maximálne absolútne hodnoty do úrovne 1,3 %. Problémy popísané pri schematizácii subpovodia na toku Longcote, potvrdzujú hypotézu o priepustných horninách v povodí (Trom-van Meerveld et al., 2007). Bez zjednodušenia s drenážnym systémom model generoval rýchly nárast prietokov bez schopnosti vytvoriť účinnú zásobu vody a verne reprodukovať hydrologickú odpoveď. Ani vysoké hodnoty hydraulického vodivosti a ostatných charakteristík hornín navrhnuté v práci Vannier et al. (2016) nezlepšili výsledky.

V subpovodí Middle Longcote teda podľa predikcií modelu nevzniká povrchový odtok, naopak dominuje odtok podzemných vôd (odtok drenážnym systémom). Najvyššie hodnoty povrchového odtoku do vodných tokov boli modelom deklarované v stanici Middle Burn. Do určitej miery je to v povodí, ktoré je z veľkej časti tvorené ihličnatým lesom, prekvapujúce. Táto intenzívna výmena je umocnená i najvyššími hodnotami podzemného odtoku do vodných tokov (PoDV) a podzemným prítokom a odtokom (PoPO). Rovnako vysoké hodnoty týchto dvoch charakteristík má i subpovodie Shiplaw Burn, taktiež so zastúpením rašeliny.

Dôležitým krokom v procese tvorby hydrologického modelu je agregácia kategórií priestorových dát. Pri použití distribuovaných, procesne založených modelov budú stáť hydroológovia vždy pred výberom medzi presným priestorovým rozlíšením a jednoduchou štruktúrou modelu (s cieľom vyhnúť sa veľkému počtu parametrov) (Beven, 2006; Alvarenga et al., 2016). Je pravdepodobné, že agregácia kategórií, odlišná od tej použitej v tejto práci, by znamenala rozdiel vo výsledkoch.

Na základe dvojúrovňového porovnania rozdielov možno konštatovať, že v povodí Eddleston Water boli najväčšie rozdiely vo výstupoch modelu spôsobené variantom Kombinácia. To však nebol prípad subpovodí Middle Burn a Middle Longcote. Pri týchto subpovodiach to bolo spôsobené výrazným rozdielom v krajinnom pokryve (51,9 % pokles ihličnatého lesa v prospech trávnatého pokryvu v prípade subpovodia Middle Burn a 51 % nárast mokradí pri subpovodí Middle Longcote) na jednej strane a malou plochou, ktorú pokrývala kvartérna geológia (v prípade subpovodia Middle Longcote) na strane druhej. Vo zvyšných subpovodiach generoval variant Kvartérna geológia väčšie rozdiely vo výstupoch modelu v porovnaní s Krajinným pokryvom. V prípade povodia Eddleston Water je preto priestorové rozloženie kvartérnej geológie dôležitejšie ako rozloženie krajinného pokryvu. Je to spôsobené väčším potenciálom kvartérnej geológie zadržiavať vodu v porovnaní s krajinným pokryvom a ovplyvňovať tak hydrologickú odpoveď povodia na príčinnú zrážku. Iba v porovnaní založenom na aktuálnej evapotranspirácii produkoval spojený model vo variante Krajinný pokryv konštantne väčšie rozdiely voči Referenčnému modelu. Súvisí to so skutočnosťou, že charakteristiky transpirácie sú dominantne ovplyvňované práve krajinným pokryvom. Tieto výsledky sú špecifické pre charakteristiky povodia Eddleston Water a v budúcnosti by bolo vhodné závery tejto práce overiť na povodiach s rôznymi fyzikogeografickými charakteristikami.

Pre splnenie cieľov boli použité tri rôzne miery výkonnosti (NSE, PBIAS a Emax), ktoré, podobne ako pri hodnotení vplyvu rôznych metód dopĺňania zrážok, produkovali rôzne výsledky. Podobne ako v predchádzajúcom prípade, k tomu dochádza v dôsledku skutočnosti, že jednotlivé miery hodnotia rôzne zložky hydrologickej odpovede povodia/modelu (vysoký prietok, dynamiku, vodnú bilanciu). Opätovne je preto zdôraznená potreba používania niekoľkých mier výkonnosti nielen pri hodnotení rozdielov, ale aj pri samotnom hydrologickom modelovaní (Moriati et al., 2007; Ritter & Muñoz – Carpena, 2013).

Veľkosť zmien spôsobených rozdielnym priestorovým usporiadaním krajinného pokryvu je v súlade s výsledkami iných prác, ktoré skúmali vplyv krajinného pokryvu (Huisman et al., 2009; Li & Wang, 2009; Zhu & Li, 2014; Ahiablame et al., 2017). V tejto práci bol najväčší priemerný rozdiel v PBIAS medzi Referenčným modelom a Krajinným pokryvom rovný hodnote 7,6 %. Táto hodnota je v rozpätí definovaným ďalšími prácami. V práci Huisman et al. (2009) zaznamenali autori zmeny v priemerných ročných prietokoch do hodnoty približne 10 %. Podľa autorov Bormanna a Elfersa (2010) môžu zmeny v zalesnení povodia predstavovať zmenu v priemernom ročnom odtoku na úrovni 20 %. Im et al. (2009) simulovali s použitím MIKE SHE 15 % zmenu v celkovom odtoku, ktorá bola spôsobená zvýšením podielu zastavaného územia. Yang et al. (2017) zaznamenali zmenu v odtoku na úrovni 7,3 % a Zhu a Li simulovali 3 % nárast odtoku opätovne zapríčinený zväčšením plochy zastavaného územia. Na druhej strane možno pozorovať malý počet štúdií, ktoré hodnotia vplyv rozdielneho priestorového usporiadania kvartérnej geológie na výstupy hydrologických modelov. Práce Vannier et al. (2016) a Carlier et al. (2018) však potvrdzujú hypotézu o dominantnej úlohe kvartérnej geológie na simulované prietoky. V oboch štúdiách boli zaznamenané významné zmeny v mierach výkonnosti, spôsobené zmenami v reprezentácii geologických vrstiev.

Záver

V prípade povodia Eddleston Water spôsobilo rozdielne priestorové rozloženie kvartérnej geológie v spojenom modele väčšie rozdiely ako rozdielne rozloženie krajinného pokryvu. Najväčšie zmeny boli spôsobené

kombináciou týchto charakteristík. Výnimky boli zaznamenané pri subpovodiach s nízkym podielom plôch kvartérnej geológie a veľkými zmenami v krajinnom pokryve. Hypotéza, s ktorou sme pracovali na začiatku: „presnejšie dáta vedú k lepším výsledkom modelu,” sa v niektorých situáciách nepotvrdila. Môže to byť spôsobené štruktúrou modelu, použitou metódou kalibrácie alebo ďalšími neistotami, ktoré sú prítomné v procese hydrologického modelovania. Potvrdili sa tak problémy, ktorým čelia procesne orientované distribuované modely od počiatku ich vývoja. I keď bola väčšina rozdielov v mierach výkonnosti zapríčinená odlišným priestorovým usporiadaním krajinného pokryvu a kvartérnej geológie označená ako signifikantná, pri praktickom hydrologickom modelovaní sú tieto rozdiely nízke. Výnimkou sú rozdiely pri vysokých kulminačných prietokoch, čo poukazuje na skutočnosť, že výstupy modelu pri zrážkových udalostiach s vysokou intenzitou sú najcitlivejšie na zmeny v priestorovom rozložení krajinného pokryvu a kvartérnej geológie.

Zdroje

Ahiablame L, et al., (2017) Streamflow response to potential land use and climate changes in the James River watershed, Upper Midwest United States. In: *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **14**, s. 150–166. (článok odborného časopisu)

Alvarenga L.A., de Mello C.R., Colombo A., Cuartas L.A., & Bowling L.C. 2016. Assessment of land cover change on the hydrology of a Brazilian headwater watershed using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model, *CATENA*, **143**, 2016, 7–17. (článok odborného časopisu)

Beven K. 2006. A manifesto for the equifinality thesis, *Journal of Hydrology*, **320** (1), 18–36. (článok odborného časopisu)

Blöschl G, et al. (2019) Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective, *Hydrological Sciences Journal*, **64**:10, s1141–1158, (článok odborného časopisu)

Bormann D, & Elfert S. 2010. Application of WaSiM-ETH model to Northern German lowland catchments: model performance in relation to catchment characteristics and sensitivity to and use change, *Adv. Geosci.*, **27**, 1–10. (článok odborného časopisu)

Camargos C, Julich S, Houska T, Bach M, Breuer L, (2018) Effects of Input Data Content on the Uncertainty of Simulating Water Resources, In: *Water*, **10** (5), 621 (článok odborného časopisu)

Heistermann, M. & Kneis, D. (2011). Benchmarking quantitative precipitation estimation by conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, **47** (6), 1–23. (článok odborného časopisu)

Huisman, J. A., Breuer, L., Bormann, H., Bronstert, A., Croke, B.F. W., Frede, H.-G., Graff, T., Hubrechts, L., Jakeman, A. J., Kite, G., Leavesley, G., Lanini, J., Lettenmaier, D. P., Lindstrom, G., Seibert, J., Sivapalan, M. G., Viney, N. R., and Willems, P. 2009: Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) III: scenario analysis, *Adv. Water Resour.*, **32**, 159–170. (článok odborného časopisu)

Li, Y.K. & Wang, C.Z. 2009. Impacts of urbanization on surface runoff of the Dardenne Creek Watershed, St. Charles County, Missouri, *Physical Geography*, **30** (6), 556–573. (článok odborného časopisu)

Kalantari Z, et al., (2014) Quantifying the hydrological impact of simulated changes in land use on peak discharge in a small catchment. In: *Science of the Total Environment*, **466–467**, s 741–754 (článok odborného časopisu)

Moriasi, D. N. Arnold, J. G. Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*. **50** (3): 885–900. (článok odborného časopisu)

Paule-Mercado MA, et al., (2017) Influence of land development on stormwater runoff from a mixed land use and land cover catchment. In: *Science of the Total Environment*, **599–600**, s 2142–2155. (článok odborného časopisu)

- Meerveld H.J.T., Peters N.E. & McDonell J.J. 2007, Effect of bedrock permeability on subsurface stormflow and the water balance of a trenched hillslope at the Panola Mountain Research Watershed, Georgia, USA. *Hydrol. Process.* **21**, 750–769. (článek odborného časopisu)
- Ritter A. a Muñoz-Carpena R. 2013 Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments, *Journal of Hydrology*, 480, 33–45. (článek odborného časopisu).
- Vannier O., Anquetin S., Braud I. 2016. Investigating the role of geology in the hydrological response of Mediterranean catchments prone to flash-floods: Regional modelling study and process understanding, *Journal of Hydrology*, **541**. (článek odborného časopisu).
- Vaze J, Teng, J. & Spencer, G. (2010) Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, **25** (10), 1086–1098 (článek odborného časopisu)
- Vázquez RF a Hampel H, (2014) Prediction limits of a catchment hydrological model using different estimates of ET. In: *Journal of Hydrology*, 513, s 216–228 (článek odborného časopisu)
- Fatichi S, et al., (2016) An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology, In: *Journal of Hydrology*, **537**, s 45–60 (článek odborného časopisu).
- Zhu CH. & Li Y., 2014, Long-Term Hydrological Impacts of Land Use/Land Cover Change From 1984 to 2010 in the Little River Watershed, Tennessee, *International Soil and Water Conservation Research*, **2** (2), 2014, 11–21. (článek odborného časopisu).
- Yang, L, Feng, Q, Yin, Z, Wen, X, Si, J, Li, C, Deo, RC. 2017. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, Northwest China, *Hydrological Processes*, **31**, 1100– 1112. (článek odborného časopisu).
- Yen, H., Sharifi, A., Kalin, L., Mirhosseini, G., Arnold, J.G. 2015. Assessment of model predictions and parameter transferability by alternative land use data on watershed modeling, *Journal of Hydrology*, **527**, 458–470, (článek odborného časopisu).

Modelování hydrologické odezvy zelených střech – aktuální výzvy

Vojtěch SKALA, Michal DOHNAL

Fakulta stavební, ČVUT v Praze, Česká republika, e-mail: vojtech.skala@fsv.cvut.cz

Úvod

Změny klimatu vedou vodohospodářské odborníky ke studiu hydrologických procesů nejen v přirozených, ale také v městských povodích, kde je hydrologický cyklus výrazně intenzifikován. Jedním z možných vhodných opatření k redukci odtékajícího množství srážkové vody, efektu tepelného ostrova a dalších nepříznivých efektů je budování zelených střech. Stejně jako na ostatní prvky zelené infrastruktury, působí na zelené střechy rozdílné vlivy než na povodí přirozená. Tato skutečnost přináší množství výzev, které je nezbytné pro správnou předpověď jejich hydrologické odezvy vyřešit. Nepřetržitý hydrometeorologický monitoring společně s numerickým modelováním hydrologického režimu zelených střech může přispět k řešení těchto výzev. Největší nejistoty jsou spojené s měřením hydrometeorologických veličin a zjednodušujícími předpoklady numerických modelů, nebo absencí některých terénních měření. Prvky zelené infrastruktury často tvoří souvrství s nejasnou hydrologickou odpovědí. Nejčastěji se jedná o kombinaci drenážní vrstvy, geotextílie a použitého substrátu, antropogenního původu, se značně rozdílnými vlastnostmi, než je běžné u přirozených půd. Výzvou pro hydrologické modely může být také simulování umělých závlah na zelených střechách, korektní uvážení extrémních podmínek, které na těchto střechách panují, nebo zahrnutí vegetace s rozdílným mechanismem fixace uhlíku při fotosyntéze, než je běžné. Kalibrované numerické modely, schopné vypořádat se s těmito problémy, mohou být vhodným nástrojem pro návrh skladby zelených střech, způsobu a režimu závlahy či odhad odtoku zatěžujícího kanalizační sítě. Dosud bylo použito velké množství numerických modelů, od jednoduchého odhadu odtoku na základě velikosti srážky nebo pomocí vodní bilance (Bengtsson et al., 2005), přes konceptuální modely (například Kasmin et al., 2010; Palla et al., 2012; Skala et al., 2019 a další), po v hydrologii používané fyzikálně založené modely jako jsou HYDRUS (například Hilten et al., 2008; Feitosa a Wilkinson, 2016 a další), S1D (Skala et al., 2020), SWMM (Krebs et al., 2016), SWMS-2D (Palla et al., 2011) nebo PROM (Sun et al., 2013). Pro dosažení adekvátního výsledku je při modelování hydrologické odezvy zelených střech potřeba vyřešit následující problémy.

Volba modelu

Pro konceptuální modely lze nalézt uplatnění především při návrhu zelených střech, kdy jsou k dispozici pouze omezené informace o hydraulických vlastnostech jednotlivých vrstev (Palla et al., 2012). Zásadní výhodou fyzikálně založených modelů je jejich schopnost kontinuálně počítat vlhkost substrátu, kořenový odběr vody a evapotranspiraci po delší časová období (Skerget et al., 2018). S těmito údaji je možné pohodlně stanovit retenční kapacitu střešního souvrství před jednotlivými srážkovými epizodami. Tato možnost dělá z kontinuálního modelování v celé řadě případů atraktivnější přístup, než je modelování izolovaných epizod (Kasmin et al., 2010; Skala et al., 2019), ovšem za cenu větších nároků na výpočetní výkon, potřeby stanovení většího množství parametrů a měřených veličin (například kompletní mikrometeorologické měření pro výpočet evapotranspirace). Kontinuální modelování hydrologického režimu zelených střech také umožňuje snadnější porozumění interakce vegetace, substrátu a dalších vrstev zelených střech. Při epizodickém modelování je navíc třeba mít vlhkost substrátu před začátkem epizody změřenou, zvolit jí konstantní, nebo jí počítat během bezdeštných období pomocí vhodných zjednodušených metod, například indexu předchozí srážky (Kasmin et al., 2010).

Volba dimenze řešení

U fyzikálních modelů je nezbytné zvolit počet rozměrů domény proudění. Dvourozměrný přístup se zdá být nejvhodnějším vzhledem k tomu, že zohledňuje detenční projevy půdních systémů (snížení kulminace odtoku a oddálení začátku a kulminace odtoku) (Stovin et al., 2015). Podle Hakimdavara et al. (2014) je útlum špičkového odtoku výrazný u rozlehlých střech, což ověřili na zelených střechách s plochami 310 m², 99 m² a 0,09 m². V určitých situacích by mohly také najít uplatnění trojrozměrné modely, HYDRUS 3D použili například Brunetti et al. (2016). Celkový odtok z jejich šachovnicového rozložení ozeleněných a holých ploch s různou mocností substrátu ovšem vyřešili prostou superpozicí odtoku z jednotlivých polí. Složitá aplikace trojrozměrného modelu tak poněkud ztrácí význam. Naopak jednorozměrné modelování může být vhodné, pokud není k dispozici dostatečně výkonná výpočetní technika, není třeba studovat detenční schopnost zelené střechy nebo je tato schopnost zanedbatelná (například u menších ploch jako jsou experimentální segmenty zelených střech).

Zjednodušující předpoklady

Velká část autorů nahrazuje souvrství pouze jednou efektivní vrstvou a používá pro ni sadu efektivních parametrů nebo dokonce některé vrstvy úplně opomíjí a používá parametry substrátu. Nicméně tímto přístupem nelze postihnout všechny aspekty ovlivňující hydrologický režim zelených střech. Další možností konceptualizace je rozdělení zelené střechy na jednotlivé konstrukční vrstvy, zpravidla substrát a drenážní vrstvu. Tento přístup zvolili například Palla et al. (2011 a 2012), Qin et al. (2016) a Skala et al. (2020). Ve všech případech ovšem došlo k vynechání jedné či více dalších vrstev zelené střechy.

Zahrnutí drenážní vrstvy

V případě zahrnutí drenážní vrstvy do modelové struktury je vzhledem k jejím extrémním hydraulickým vlastnostem otázkou, jaký způsob řešení proudění vody v této vrstvě zvolit. Palla et al. (2012) pod substrátem modelovali vrstvu lehké vulkanické horniny. Drenážní vrstvu lze tedy ve fyzikálních modelech reprezentovat velmi propustnou půdou (například hrubým šterkem) s kořeny uvnitř, a to nejen v případě kameniva či porézních materiálů. Plastovou nopovou fólii úspěšně zahrnuli do modelu S1D podobným způsobem také Skala et al. (2020). Další možnost zahrnutí drenážní vrstvy do modelové struktury nabízí Qin et al. (2016). Pod klasickou vrstvu substrátu, vložili zásobní vrstvu se známou retenční kapacitou, reprezentující vrstvu hrubého šterku ve zkoumaném experimentálním segmentu. Pokud je retenční kapacita vyčerpána, voda odtéká ze střechy. Výpar vody a její přestup ze zásobní vrstvy zpět do substrátu je po zkonduování použit v modelu ve formě vstupu na spodním okraji. Rychlost výparu je dána teplotou uvnitř vrstvy a nasycením substrátu. K opačnému přístupu, se uchýlili Brunetti et al. (2016). Přestože zpětný výpar z drenážní vrstvy také popisují jako možný mechanismus dosycování substrátu z této vrstvy, považují ho za natolik malý, že ho není nutné modelovat. Drenážní vrstvu v modelové struktuře tak neuvažují.

Dvojitá pórovitost a preferenční proudění

Použitý substrát má přirozeně největší vliv na proudění vody skrz zelené střechy. Typicky jsou používány antropogenní lehké směsi zeminy, rašeliny a kameniva s mocností 2,5 až 15 cm. Kamenivo je voleno především lehké s vysokou pórovitostí, samotné póry jsou ovšem velmi úzké. To způsobuje poměrně nízkou hydraulickou vodivost a s tím související obtékání kameniva. Jeho zvlhčení probíhá až po určité době nasycení okolí. Vzniká tak půdní prostředí s dvojitou pórovitostí (Barenblatt et al., 1960), která ovlivňuje retenční vlastnosti substrátu (Durner, 1994). U substrátu určeného pro extenzivní zelenou střechu toto potvrzují Brunetti et al. (2016). V jejich případě vedlo k lepším modelovaným výsledkům odtoku během suchých i vlhkých období. Podle Liu a Fassman-Beck (2017) bylo v jejich případě uvážení dvojitou pórovitostí vhodné pro čtyři z pěti zkoumaných antropogenních substrátů pro zelené střechy a bioretenční objekty. Palla et al. (2009) naopak uvádí, že rozdíl v chování malých pórů a makropórů není u směsi drcených sopečných hornin, rašeliny a kompostu evidentní z důvodu jeho velké hydraulické vodivosti. Vhodnější alternativou k přístupu s dvojitou pórovitostí může být v některých případech přístup s dvojitou propustností (Vogel et al., 2000). Při špatné konsolidaci substrátové směsi, vlivem vysokých teplot a následného popraskání povrchu nebo kvůli rozsáhlému kořenovému systému

některých rostlin (například druh modré lilie používané na zelených střechách – Zhang et al., 2018) se mohou navíc vytvářet preferenční cesty, pro něž je potřeba zvolit adekvátní modelovací přístup (Gerke a van Genuchten, 1993; Jarvis, 1994; Ray et al., 1997). Zahrnutí obou výše zmiňovaných aspektů nabízí zpřesnění popisu podpovrchového proudění vody, za cenu dalších modelových parametrů .

Zahrnutí vegetace a výparu

Atmosférické vlivy působí výrazně na hydrologický a tepelný režim extenzivních zelených střech hlavně kvůli jejich malé mocnosti. Běžně dochází k rychlým změnám vlhkosti substrátu, od nasycení po úplné vysušení (Savi et al., 2013). Z tohoto důvodu jsou preferovány na extenzivních zelených střechách rostliny se schopností přežít v takto mělké půdě (Rowe et al., 2012), vysokou odolností vůči suchu a zároveň schopností omezeně transpirovat po delší suchá období (Monterusso et al., 2005; Wolf a Lundholm, 2008). Omezená transpirace však může vést k omezení schopnosti zelené střechy ochlazovat okolní prostředí. Možností jsou některé druhy rozchodníků, starčeků, bylin, mechů či suchomilných travin. Rozchodníky jsou používány na extenzivních zelených střechách pro schopnost uchovat dostatečnou zásobu vody během dlouhých suchých období a tím se vyhnout uvadnutí (VanWoert et al., 2005b). Využívají totiž při fotosyntéze CAM cyklu, který jim umožňuje fixovat CO_2 v noci a tím redukovat ztrátu vody (Starry et al., 2014). Některé z druhů dokáží navíc měnit svojí strategii z CAM cyklu na běžnější typ fotosyntézy a naopak, podle aktuální dostupnosti vláhy. Pokud je substrát vlhký, transpirují intenzivněji, než by vypařoval holý substrát. Vodu naopak začnou šetřit, pokud vlhkost klesne. Rozchodníky dokáží přežít už od hloubky substrátu 2,5 cm (VanWoert et al., 2005a; Rowe et al., 2012). Dalším důvodem redukce spotřeby vody rozchodníky je jejich anatomie. Podle měření Cristescu et al. (2011) mají některé sukulentní rostliny z rodu rozchodníků a starčeků větší mesofilní buňky (tedy buňky zadržující vodu) a jiné větší tloušťku kutikuly (vnější ochranné vrstvy listu) a menší množství stomat (průduchů sloužících k „dýchání“). Díky těmto vlastnostem je implementace rozchodníků do modelů velkou výzvou. Většina publikovaných prací opomíjí zahrnutí vegetace do modelové struktury.

Vhodnou metodou pro implementaci rostlin a jejich kořenů do struktury modelu nabízí Vogel et al. (2016). Výhodou je fyzikální podstata modelu kořenového odběru vody omezeného odporu vůči proudící vodě. Oproti tomu v modelu HYDRUS je běžně využívána empiricky stanovená Feddesova funkce (Feddes et al., 1978). Velmi podobnou metodu nabízí Skerger et al. (2018) v kombinaci s výpočtem vlhkosti půdy. Výstupem těchto metod je aktuální evapotranspirace (ET_A) řízená potenciální evapotranspirací (ET_P). V oblasti zelených střech zatím nedochází k experimentování s širokou škálou metod pro výpočet ET_P či ET_A a používanou je tak hlavně rovnice Penmana-Monteitha (Monteith, 1981) standardizovaná metodice FAO 56 (Allen et al., 1998).



Obr. 1 Čtyři segmenty zelených střech na střeše budovy Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. V pozadí meteorologická stanice (fotografie pořízena 15. července 2019).

Metodika

Popis a historie experimentu

Zdrojem dat pro matematické modelování je experiment, který je součástí dlouhodobého sledování a studování prvků zelené infrastruktury na střeše budovy Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (UCEEB) a v její bezprostřední blízkosti. Budova s výškou 10 metrů se nachází na okraji Buštěhradu nedaleko Kladna (50°09'24.8"N 14°10'10.8"E, 355 m n. m.). Průměrný roční srážkový úhrn je v oblasti přibližně 500 mm, průměrná teplota vzduchu 8°C. Tento článek využívá měřená data ze čtyř segmentů zelených střešů rekonstruovaných v říjnu roku 2017 (Obr. 1).

Konstrukce segmentů zelených střešů

Segmenty mají efektivní plochou 1×1 m a jsou tvořeny ocelovou konstrukcí s běžným souvrstvím zelené extenzivní střešy, tj. vegetace (rozchodníky), 40–60 mm substrátu, filtrační vrstva (geotextílie), drenážní vrstva s výškou 25 mm (nopová fólie), ochranná vrstva (geotextílie), hydroizolační vrstva a tepelná izolace tloušťky 100 mm (polystyren). Z důvodu měření odtoku jsou segmenty vyvýšeny přibližně 25 cm nad povrchem střešy budovy. Dva segmenty byly pokryty předpěstovanými rozchodníkovými koberci (dále označované Ca – *carpet*) na rohoži z kokosových vláken tloušťky 25–40 mm (Sedum Top Solution, Ltd., Czech Republic) s počáteční pokryvností alespoň 90 %. Zbývající dva segmenty (dále označované Cu – *cuttings*) byly osázeny rozchodníkovými řízků (s hustotou přibližně 100 g řízků na 1 m²), oddělenými od použitých koberců, z důvodu zachování stejné druhové diverzity. Konkrétně se jedná o směs rozchodníků *S. sexangulare*, *S. album*, *S. album* „coral carpet“, *S. lydium*, *S. lydium* „Glaucum“, *S. hispanicum* „Minus“, *S. acre*, *S. reflexum*, *S. reflexum* „Angelina“, *S. spurium* „Fuldagut“, *S. hybridum* „Immergrunchen“ a *S. kamtschaticum*. Jako substrát byla použita u dvou segmentů směs Acre (Acre s.r.o., Česká republika) a u dvou směs BB Com (BB Com s.r.o., Česká republika) o mocnosti 40 mm v případě rozchodníkových koberců nebo 60 mm v případě rozchodníkových řízků (Tab. 1).

Substrát společnosti Acre (segmenty s tímto substrátem dále označovány A) je určený pro extenzivní zelené střešy a obsahuje 55 % drceného přírodního spongilitu, 30 % liadrainu (drceného expandovaného jílu) a 15 % rašeliny. Substrát společnosti BB Com (segmenty s tímto substrátem dále označovány B) je určený pro extenzivní zelené střešy a obsahuje 25 % liadrainu, 25 % pórovitého struskového kameniva, 17 % čisté cihelné drtě z nestandardních výrobků cihelny, rašelinu, kompost, dolomitický vápenec a živiny. Hydraulické charakteristiky substrátových směsí, odebraných přímo ze segmentů, stanovili Sněhota et al. (2020) a zobrazuje je Tab. 1. Substrát BB Com obsahuje oproti substrátu Acre více hrubších zrn a vyznačuje se tak nižší retenční kapacitou a větší hydraulickou vodivostí.

Tab. 1 Typ vegetace a substrátu v segmentech. Hydraulické charakteristiky jsou měřené na odebraných vzorcích: reziduální vlhkost (θ_r), nasycená vlhkost (θ_s) a van Genuchtenovy empirické parametry (α , n).

Segmentu	Způsob osázení	Výška a typ substrátu	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (–)
ACu	řízky	Acre (60 mm)	0	0,407	0,008	1,35
ACa	předpěstovaný koberec	BB Com (40 mm)	0	0,490	0,011	1,36
BCu	řízky	Acre (60 mm)	0	0,297	0,007	1,49
BCa	předpěstovaný koberec	BB Com (40 mm)	0	0,436	0,010	1,43

Měřená data a zkoumané období

Odtok ze segmentů je registrován vyhřívanými překlopnými průtokoměry s rozlišením 0,065 mm/hod (minutový krok). Uprostřed výšky substrátu každého segmentu je umístěno teplotní čidlo (model 107-L, výrobce Campbell Scientific Ltd, UK, minutový krok pro ACu a ACa, 5minutový krok pro BCa a BCu) a dvě vlhkostní TDR čidla (model CS635-L, výrobce Campbell Scientific Inc, USA, 5minutový krok). Segment ACa je navíc vážen vysoce přesnými voděodolnými vahami (5minutový krok). Používáno dále je pouze proměnné zatížení (aktuální zásoba vody) získané odečtením hmotnosti konstrukce segmentu a jednotlivých funkčních vrstev od jeho celkové hmotnosti. Ve vzdálenosti 1 až 2 m od segmentů je měřen srážkový úhrn pomocí překlopného srážkoměru s rozlišením 0,1 mm/hod (minutový krok). K dispozici jsou také další běžná meteorologická měření, jako teplota vzduchu v 7 a 200 cm nad povrchem střechy, relativní vlhkost vzduchu, rychlost a směr větru a čistá radiace (vše minutový krok). Absence překážek a malá vzdálenost segmentů, srážkoměru a meteorologické stanice zaručuje, že jsou segmenty vystaveny stejným vnějším podmínkám. Zkoumaným obdobím pro tuto studii je série po sobě jdoucích epizod od 15. do 31. května 2019. Níže popsany model byl použit pro simulaci hydrologického režimu segmentů ACu a ACa.

Stanovení rozsahu vegetačního pokryvu

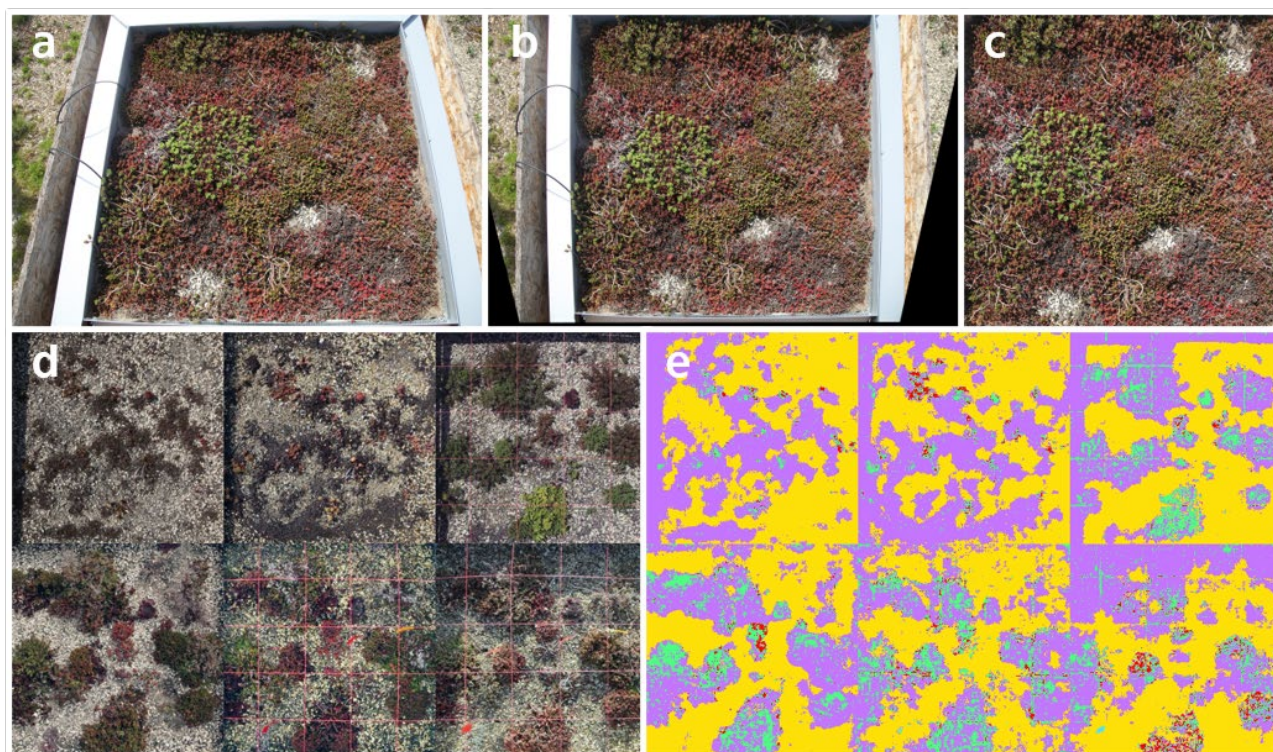
Segmenty jsou ve vegetačním období přibližně dvakrát za měsíc snímány. Kolmost snímků je zajištěna opravou perspektivy pomocí open-source softwaru pro úpravu snímků Fiji ImageJ (Schindelin et al., 2012). Snímky jsou následně čtvercově oříznuty pouze na efektivní plochu a jejich kontrast je regulován pomocí dostupných nástrojů stejného softwaru tak, aby byl získán soubor snímků stejných rozměrů a kontrastu. Soubor je následně analyzován pluginem Trainable Weka Segmentation (Arganda-Carreas et al., 2017), který pomocí strojově učeného algoritmu přiřazuje jednotlivým pixelům snímku požadovanou informaci, v tomto případě týkající se pokryvu – vegetace nebo holá půda. Z poměru počtu pixelů s vegetací a bez ní lze získat procentuální zastoupení vegetace na jednotlivých snímcích (příklad vyhodnocení na Obr. 2).

Stanovení evapotranspirace a intercepce

Množství vody zadržené vegetací H_I bylo stanoveno modifikovaným intercepčním modelem Liu (1997):

$$H_I = (C_m - C_0)[1 - \exp(-kH_p/C_m)] + H_E \quad (1)$$

kde H_p – srážkový úhrn [mm], C_m – intercepční kapacita vegetace [mm], C_0 – aktuální intercepční kapacita na počátku časového kroku [mm], k – procentuálního zastoupení vegetačního pokryvu [–] a H_E – evaporace z povrchu vegetace [mm], v dalším časovém kroku je C_0 redukováno o $H_I - H_E$



Obr. 2 Příklad postupu při vyhodnocování zastoupení vegetačního pokryvu. (a) pořizovaný snímek, (b) oprava perspektivy, (c) ořez na efektivní plochu segmentu, (d) sjednocení kontrastu a vytvoření souboru snímků, (e) stanovení pixelů obsahujících vegetaci, respektive holou půdu pomocí pluginu Trainable Weka Segmentation.

Modifikace původního intercepčního modelu Liu spočívá ve změně výpočtu rychlosti výparu z povrchu vegetace (Skalová et al., 2021). Modifikace byla zahrnuta z důvodu přesnějšího popisu průběhu výparu v reálném prostředí. Redukcí měřené srážkové výšky o intercepci je získán propad, který je použit jako vstup modelu popisujícího proudění vody. Za účelem odhadu maximální intercepční kapacity C_m byla u segmentu s nejvyšší pokrývností a měřením hmotnosti, ACa, provedena analýza tvorby rosy a její případný vliv na proměnné zatížení segmentu. Aktuální teplota v 5 cm nad povrchem střechy budovy byla porovnána s vypočtenou teplotou rosného bodu ve stejné výšce. Bylo zjištěno, že podmínky pro vznik rosy na střeše budovy jsou splněny pouze v listopadu a prosinci, kdy je segment již ve stavu částečného nebo plného nasycení. Provedena byla dále analýza malých srážkových epizod (do 5 mm) a reakce vlhkostních čidel na tyto epizody. Zjištěna byla maximální velikost epizody, na kterou vlhkostní čidla nereagují. Z této analýzy vyplynula přibližná hodnota C_m 1,5 mm.

Aktuálně zadržené množství srážkové vody je vypařováno během bezdeštných období intenzitou výparu z volné hladiny stanovené Penmanovou metodou (Penman, 1948). Současně je evapotranspirace předem stanovená v minutovém kroku kombinovanou metodou Penmana-Monteitha (Monteith, 1981) nastavena na nulu, a to až do doby, kdy je povrch vegetace suchý. Výpar z povrchu vegetace je během srážkové epizody nebo během noci (kdy je radiační část Penmanovy rovnice zanedbatelně malá nebo záporná) stanoven pomocí aerodynamické metody. Zbývající potenciální evapotranspirace byla převedena na hodinový krok a následně použita jako vstup pro model popisující proudění vody. V modelu je použita jako předepsaná potenciální transpirace. Vzhledem k nízkému prostorovému zastoupení vegetace v případě segmentu ACu považujeme v budoucnu za vhodné rozdělit potenciální evapotranspiraci na výpar z půdy a transpiraci. Výpar z půdy by potom mohl probíhat i v případech kdy je na vegetaci zachycena voda.

Fyzikálně založený model

Hydrologická reakce zkoumaných segmentů je průběžně vyhodnocována a simulována fyzikálním modelem S1D vyvinutým na ČVUT v Praze (Vogel et al., 2010), numericky řešícím dvojici Richardsových rovnic (Vogel et al., 2000) pro jednorozměrné vertikální proudění:

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right) - S_m + \frac{\Gamma_m}{w_m} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_f \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + 1 \right) \right) - S_f + \frac{\Gamma_f}{w_f} \quad (3)$$

kde h – tlak půdní vody [m], θ – objemová vlhkost [m^3m^{-3}], K – hydraulická vodivost [ms^{-1}], S – intenzita odběru vody kořeny [s^{-1}], t – čas [s], z – prostorová souřadnice uvažovaná jako kladná směrem nahoru [m], Γ – přenosový člen [s^{-1}], m – index pro doménu matrice a f – index domény preferenčních cest

Dvojice rovnic reprezentuje dvě vzájemně komunikující domény proudění s rozdílnými hydraulickými vlastnostmi, které jsou parametrizovány modelem van Genuchtena-Mualem (van Genuchten, 1980). Duální verze modelu byla upřednostněna s ohledem na bimodální charakter retenčních křivek jednotlivých příměsí použitých substrátů (Flores-Ramirez et al., 2018). Intenzita odběru vody kořeny S z rovnice (2) a (3) je dána rozdílem mezi tlakem v půdě a tlakem v xylemu kořenů. Intenzitu snižuje hydraulický odpor na rozhraní půdy a kořenů (Vogel et al. 2013; 2016):

$$S(z) = \frac{2\pi r_0 R(z)}{r_{soil}(z) + r_{root}} [H_{soil}(z) - H_{rx}] \quad (4)$$

kde $R(z)$ – hustota kořenů [m^{-2}], r_0 – průměrný aktivní poloměr kořenů [m], r_{root} – radiální odpor kořenů [s], r_{soil} – hydraulický odpor půdy [s], H_{soil} – potenciál vody v půdě [m] a H_{rx} – potenciál vody v xylemu [m]

Odpor půdy r_{soil} je získán z funkce hydraulické vodivosti a charakteristické délky, kterou musí voda překonat z půdy k povrchu kořenů. Potenciál vody v xylemu kořenů H_{rx} je počítán v každém kroku numerického řešení Richardsovy rovnice:

$$H_{rx} = \frac{\int_{z_R}^{z_0} \left[\frac{2\pi r_0 R(z)}{r_{root} + r_{soil}} \right] H_{soil} dz - ET_p}{\int_{z_R}^{z_0} \left[\frac{2\pi r_0 R(z)}{r_{root} + r_{soil}} \right] dz} \quad (5)$$

kde z_0 a z_R – souřadnice dolní a horní hranice kořenové zóny [m] a ET_p – potenciální evapotranspirace [ms^{-1}]

Pokud H_{rx} klesne pod kritickou hodnotu H_{crit} definovanou pro danou potenciální míru transpirace, H_{rx} se rovná H_{crit} a aktuální transpirace ET_a je pak dána rovnicí:

$$ET_a = \int_{z_R}^{z_0} S(z) dz \quad (6)$$

kde ET_a – aktuální transpirace [ms^{-1}]

ET_p (nulová během výparu vody zachycené vegetací) slouží společně s měřenou srážkou (redukovanou o vodu zachycenou vegetací) jako horní atmosférická podmínka. Na spodní hranici systémů byla zvolena jako okrajová podmínka výronová plocha, dovolující vodě vytéct ze segmentu pouze při plném nasycení ($h \geq 0$).

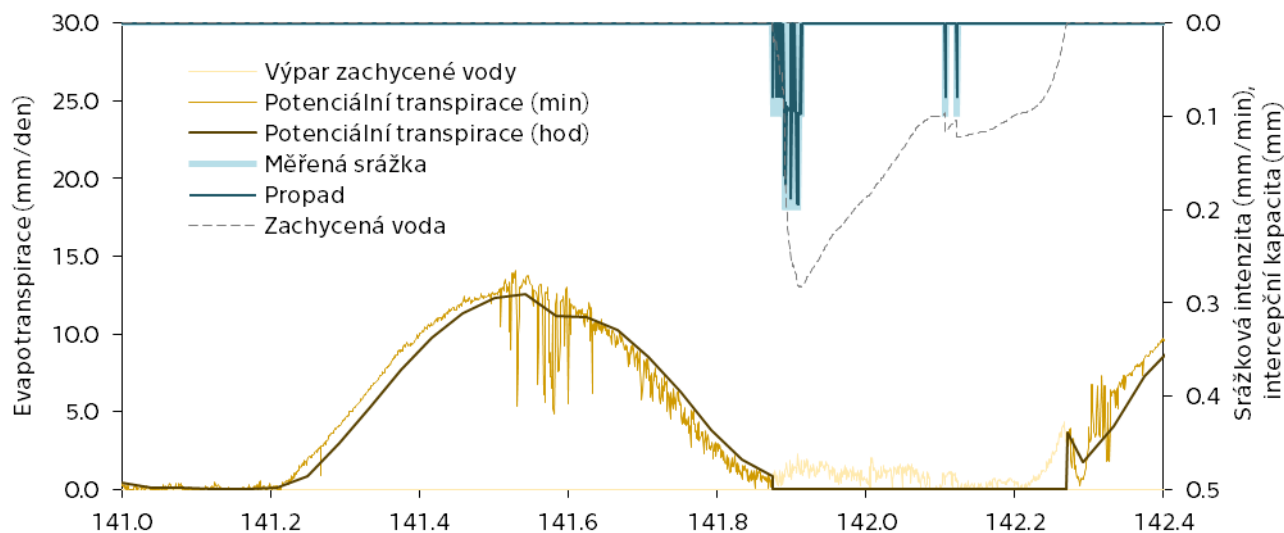
Pro účely modelu byl svislý řez segmentů zjednodušen na dvě vrstvy, 60 mm půdního substrátu a 25 mm drenážní vrstvy. Každá z vrstev je reprezentována sadou parametrů pro matrici a sadou parametrů pro preferenční cesty. V případě drenážní vrstvy byly parametry stanoveny tak, aby reprezentovaly vlastnosti skutečně použité drenážní vrstvy (Skala et al., 2020). V případě matrice substrátu byly použity měřené hodnoty (Tab. 1) s redukcí θ_s na hodnotu $0,267 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ v případě segmentu ACu, respektive

0,389 v případě ACa, které odpovídají maximálním vlhkostem měřeným TDR čidly. Nasycená hydraulická vodivost byla odhadnuta $K_s = 50 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$. Počáteční hydraulické parametry preferenční domény byly zvoleny tak, aby umožňovaly rychlé drénování půdního profilu. Tyto počáteční odhady byly optimalizovány (Doherty et al., 1994) s cílem snížení sumy kvadrátů odchylek měřeného a simulovaného kumulativního odtoku. Do výsledných hodnot parametrů se promítá vliv nejistot spojených s měřením hydraulických parametrů substrátu, s přítomností netěsností a preferenčních cest vznikajících v průběhu času a nepřesností modelu zahrnující například jeho jednorozměrný charakter reprezentující vícerozměrný systém. Výslednými parametry preferenční domény jsou $\theta_r = 0,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, $\theta_s = 0,035 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, $\alpha = 0,73 \text{ cm}^{-1}$, $n = 1,862$ a $K_s = 2000 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$. Preferenční doména představuje 20 % z celkového objemu oproti matici, která zaujímá zbývajících 80 % a to v obou simulovaných vrstvách – substrátové a drenážní.

Výsledky

Vegetační pokryv, intercepce, evapotranspirace

Přestože je ve zkoumaném období pokrytí segmentu ACu vegetací poměrně nízké (od 22,4 % na začátku do 36,4 % na konci), úhrn zachycené srážky dosahuje 6,5 % z celkového naměřeného úhrnu (změřeno 63,0 mm; propad 58,9 mm). U segmentu ACa s pokryvností přes 80 % byl stanoven v tomto období propad 53,3 mm (15,4 %). Kumulativní množství transpirace dosahuje 117 mm v případě ACu, respektive 113 mm u ACa. Příklad funkce intercepčního modelu pro segment ACu je na Obr. 3, v jehož spodní části je potenciální transpirace v minutovém kroku, klesající k nule ve chvíli, kde se začne plnit intercepční kapacita. Transpirace je opět zahájena ve chvíli, kdy je intercepční kapacita vyprázdněna. Z obrázku dále plyne, že intercepční model neredukuje z počátku epizody celý srážkový úhrn až do výše intercepční kapacity. Ta je plněna postupně s ohledem na její aktuální stav a procentuální pokryvnost (hodnota $C_m = 1,5 \text{ mm}$ platí pro 100% pokryvnost, proto dosahuje kapacita na Obr. 3 maximálně hodnoty asi 0,3 mm).

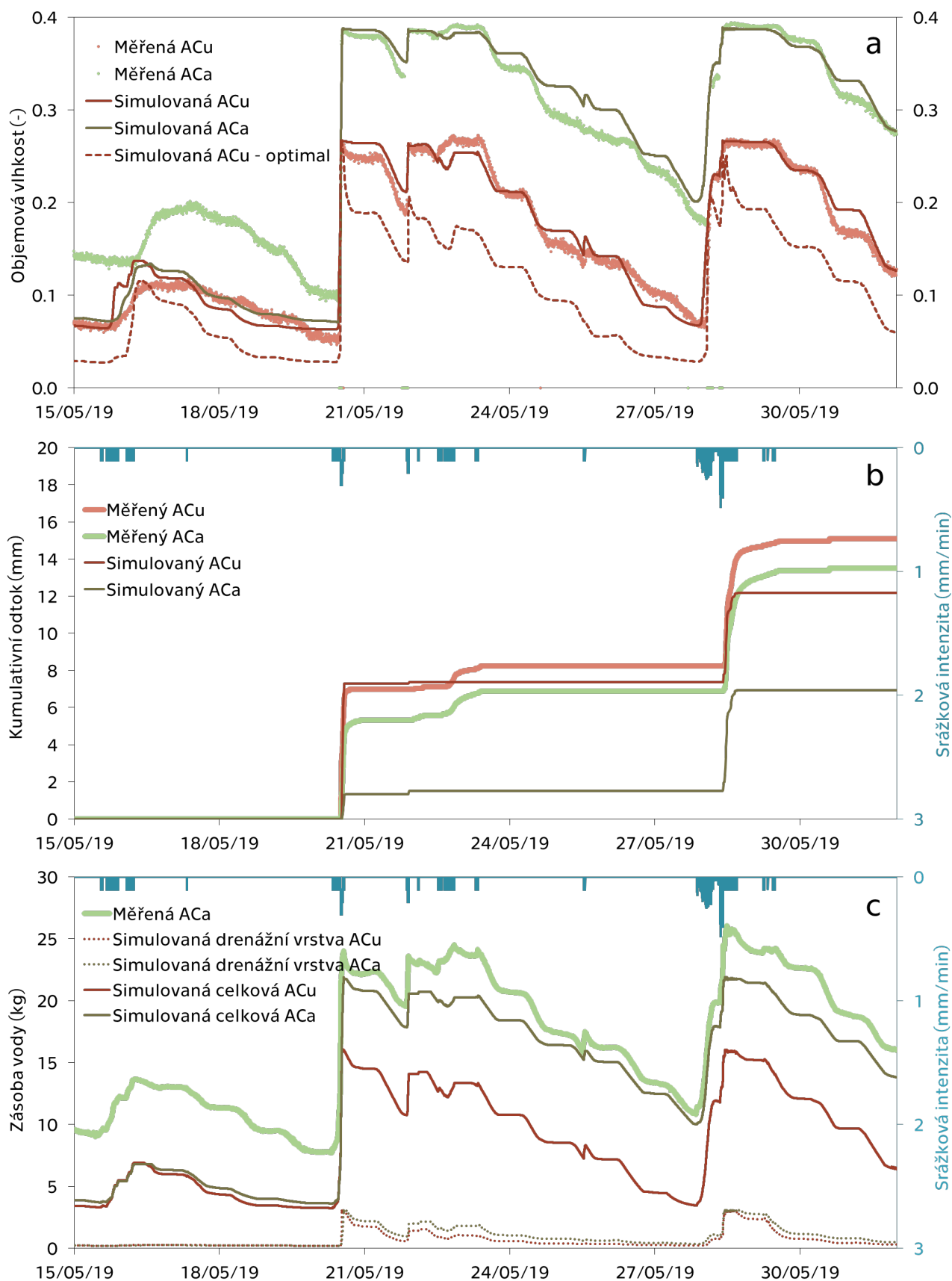


Obr. 3 Příklad funkce intercepčního modelu pro jednu ze srážkových epizod ve zkoumaném období. Vodorovná osa zobrazuje pořadí dne v roce.

Modelové výsledky

Aktuálně dosažené výsledky zobrazuje Obr. 4. Průběh simulované vlhkosti velmi dobře kopíruje měřenou vlhkost, s drobnými odchylkami ve velikosti některých denních poklesů způsobených výparem. Výraznější odchylka je patrná u segmentu ACa na počátku zobrazovaného období, pravděpodobně z důvodu nepřesně zvolených počátečních podmínek. Celkově je dosažená shoda dobrá a potvrzuje správnost hydraulických charakteristik měřených v laboratoři na vzorku získaném ze segmentů, které byly použity jako parametry matrice.

Výtok z matriční domény segmentu ACu činí 8,4 mm, oproti měřeným 15,1 mm. Zahrnutím preferenční domény bylo dosaženo celkového kumulativního odtoku ve výši 12,2 mm s hodnotou koeficientu NSE = 0,846 (Nash a Sutcliffe, 1970). V případě segmentu ACa bylo změřeno 13,5 mm, simulovaný odtok pocházející z matrice 4,1 mm, celkově pak 6,9 mm s NSE = -0,965. Oproti vlhkosti tedy nebylo dosaženo dobré shody, hlavně v případě segmentu ACa, u kterého byl odtok redukován, oproti segmentu ACu, jeho větší intercepční a retenční kapacitou. Případná zlepšená shoda simulovaného a měřeného kumulativního odtoku je vždy kompenzována zhoršenou přesností předpovědi vlhkosti. Příklad je zobrazen v části (a), kde po dosažení koeficientu shody NSE = 0,990 pro kumulativní odtok klesla shoda simulované a měřené vlhkosti (červená čárkovaná čára). Při pokusech zvýšit přesnost jedné ze simulovaných veličin tak dochází k poklesu přesnosti druhé veličiny.



Obr. 4 Výsledky modelu pro segmenty ACu a ACa v porovnání s měřenými veličinami: (a) objemová vlhkost v hloubce 3 cm po povrchu, (b) kumulativní odtok, (c) aktuální zásoba vody (měřená zásoba je ze segmentu ACa, s vyšší pokryvností a pravděpodobně vyšší retenční kapacitou, u segmentu ACu neměřena).

V poslední části (c) je pak aktuální průběh simulované celkové zásoby vody v obou vrstvách (substrátové a drenážní) v porovnání se zásobou odvozenou z jediné měřené hmotnosti, a to segmentu ACa. Ten je pokryt rozchodníkovým kobercem s pokryvností větší než u segmentu ACu osázeného na počátku rozchodníkovými řízkami a je tedy u něj předpokládána větší retenční kapacita. S uvážením této skutečnosti je považována shoda simulované zásoby vody v segmentu ACu za dobrou. V případě segmentu ACu došlo k mírnému podhodnocení, s výjimkou začátku období, kdy je simulovaná zásoba dokonce pouze poloviční. Poměr celkové simulované zásoby vody a zásoby vody v drenážní vrstvě ukazuje, že v navržené konceptualizaci vertikálního profilu zelené střechy se zadržuje voda především v substrátu.

Závěr

Modelování hydrologického režimu extenzivních zelených střech se věnovala řada autorů. Téměř každý z nich využil jiného přístupu. Používány jsou konceptuální a v poslední době častěji fyzikální modely. Právě fyzikální modely nabízejí více možností, jak studovat komplexní procesy probíhající uvnitř zelených střech.

Segmenty zelených střech jsou vhodným experimentálním nástrojem pro studium chování zelených střech. Při tom je možné uplatňovat metody používané v přirozených povodích. Výhodou je malé měřítko zelených střech a snáze definovatelné okrajové podmínky. Výrazným rozdílem jsou extrémní klimatické podmínky plynoucí z polohy zelených střech, uměle vytvořené vrstvy zelených střech a použití specifických vegetačních druhů pro ozelenění. Užitím modelu S1D bylo v minulosti prokázáno, že je možné úspěšně simulovat hydrologickou reakci segmentů zelených střech včetně drenážní nopové fólie a kořenového odběru vegetace, kterou jsou segmenty osázeny. Aplikace duální verze modelu prokázala, že je tímto způsobem možné dále zvýšit přesnost modelové předpovědi s ohledem na aktuální zásobu vody a vlhkost. Lepší porozumění hydrologickému režimu zelených střech může v budoucnu vést k návrhu souvrství, která budou lépe plnit požadovanou funkci.

U modelování hydrologického režimu zelených střech jsou, v porovnání s běžnými půdními systémy, největšími výzvami adekvátní implementace suchomilné vegetace do modelu a proudění vody přes drenážní vrstvu. Dále pak uzpůsobení modelu pro fungování v extrémních klimatických podmínkách, panujících na těchto střechách, které způsobují změnu substrátu od nasycení po reziduální vlhkost. Pro správné řešení je nezbytné vhodně zkoumaný střešní profil zjednodušit. Výrazně může výsledky modelu v neposlední řadě ovlivnit volba dimenze řešení. Vzhledem k relativně velké šířce a délce střech a jejich malé hloubce je považováno za nejvhodnější dvourozměrné řešení. Větší výzvou může být také popis proudění vody v antropogenních substrátech, které prokazatelně obsahují příměsi charakteristické bimodální retenční křivkou.

Poděkování

Tato práce vznikla v souvislosti s řešením projektu GAČR 20-00788S. Dodatečná podpora byla poskytnuta z grantu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS21/050/OHK1/1T/11. Experimentální měření byla podpořena Národním programem udržitelnosti I, Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy s číslem LO1605.

Zdroje

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, In: *Food and Agriculture Organization*, Rome.

Arganda-Carreras I, Kaynig V, Rueden C, Eliceiri KW, Schindelin J, Cardona A, Seung HS (2017) Trainable Weka Segmentation: a machine learning tool for microscopy pixel classification. *Bioinformatics* číslo 33, 2424–2426 doi:10.1093/bioinformatics/btx180.

- Barenblatt GI, Zheltov IP, Kochina IN (1960) Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, In: *J. Appl. Math. Mech.* číslo **24** (5), 1286–1303, doi:10.1016/0021-8928(60)90107-6.
- Bengtsson L, Grahn L, Olsson J (2005) Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden, In: *Hydrology Research.* číslo **36** (3), 259–268, doi:10.2166/nh.2005.0019.
- Brunetti G, Simunek J, Piro P (2016) A comprehensive analysis of the variably saturated hydraulic behavior of a green roof in Mediterranean climate, In: *Vadose Zone J.* číslo **5** (9), doi:10.2136/vzj2016.04.0032.
- Cristescu M, Anton D, Manuela M., Nicu C (2011) Study of leaves structures that determine the resistance to dryness at succulent plants, In: *J. of Horticulture, Forestry and Biotechnology.* číslo **14**, 60–64.
- Doherty J, Brebber L, Whyte P (1994) Model-independent Parameter Estimation, User 's Manual, *Watermark Computing*, Australia.
- Durner W (1994) Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, In: *Water Resour. Res.* číslo **30** (2), 211–223, doi:10.1029/93WR02676.
- Feddes RA, Kowalik PJ, Zaradny H (1978) Simulation of field water use and crop yield. PUDOC, Wageningen, the Netherlands.
- Feitosa, R.C., Wilkinson, S., 2016. Modelling green roof stormwater response for different soil depths. *Landsc. Urban Plan.* číslo **153**, 170–179, doi:10.1016/j.landurbplan.2016.05.007.
- Flores-Ramirez E, Abel S, Nehls S (2018) Water retention characteristics of coarse porous materials to construct purpose-designed plant growing media, In: *Soil Science and Plant Nutrition*, číslo **64** (2), 181–189, doi:10.1080/00380768.2018.1447293.
- Gerke HH, van Genuchten MTh (1993) A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media, In: *Water Resour. Res.* číslo 29, 305–319, doi:10.1029/92WR02339.
- Hakimdavar R, Culligan PJ, Finazzi M, Barontini S, Ranzi R (2014) Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance, In: *Ecol. Eng.* číslo **73**, 494–508, doi:10.1016/j.ecoleng.2014.09.080.
- Hiltner RN, Lawrence TM, Tollner EW (2008) Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D, In: *J. Hydrol.* číslo **358** (3–4), 288–293, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.06.010.
- Jarvis NJ (1994) The MACRO model Version 3.1: Technical description and sample simulation, In: *Rep. Diss. Dep. Soil Sci. Swed. Univ. Agric. Sci.* číslo **19**, 51.
- Jelínková V, Dohnal M, Pícek T (2015) A Green Roof Segment for Monitoring the Hydrological and Thermal Behaviour of Anthropogenic Soil Systems, In: *Soil and Water Research* číslo **10**: 262–270, doi:10.17221/17/2015-SWR.
- Jelínková V, Dohnal M, Šácha J (2016) Thermal and water regime studied in a thin soil layer of green roof systems at early stage of pedogenesis, In: *Journal of Soils and Sediments*, číslo **16** (11): 2568–2579, doi:10.1007/s11368-016-1457-7.
- Kasmin H, Stovin V, Hathway EA (2010) Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs, In: *Water Sci. Technol.* číslo **62** (4), 898–905.
- Krebs G, Kuoppamäki K, Kokkonen T, Koivusalo H (2016) Simulation of green roof test bed runoff, In: *Hydrol. Process.* číslo **30**, 250–262.
- Liu R, Fassman-Beck E (2017) Hydrologic response of engineered media in living roofs and bioretention to large rainfalls: experiments and modeling, In: *Hydrol. Process.* číslo **31**, 556–572.
- Liu S (1997) A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies, In: *Ecological Modelling*, **99** (2–3), číslo 151–159, doi:10.1016/S0304-3800(97)01948-0.

- Monteith JL (1981) Evaporation and surface temperature, In: *Q. J. R. Meteorol. Soc.* číslo **107**: 1–27, doi:10.1002/qj.49710745402.
- Monterusso MA, Rowe DB, Rugh CL (2005). Establishment and persistence of *Sedum* spp. and native taxa for green roof applications, In: *Hortscience*. číslo **40** (2), 391–396, doi:10.21273/HORTSCI.40.2.391.
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles, In: *J. Hydrol.* číslo **10** (3), 282–290, doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Palla A, Gnecco I, Lanza LG (2009) Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof, In: *J. Hydrol.* číslo **379** (1–2), 193–204, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.10.008.
- Palla A, Gnecco I, Lanza LG (2012) Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof, In: *Hydrol. Process.* číslo **26** (1), 73–84, doi:10.1002/hyp.8112.
- Palla A, Sansalone JJ, Gnecco I, Lanza LG (2011) Storm water infiltration in a monitored green roof for hydrologic restoration, In: *Water Sci. Technol.* číslo **64** (3), 766–773, doi:10.2166/wst.2011.171.
- Qin H, Peng, Y Tang Q, Yu S (2016) A HYDRUS model for irrigation management of green roofs with a water storage layer, In: *Ecol. Eng.* číslo **95**, 399–408, doi:10.1016/j.ecoleng.2016.06.077.
- Ray C, Ellsworth TR, Valocchi A.J, Boast CW (1997) An improved dual porosity model for chemical transport in macroporous soils, In: *J. Hydrol.* číslo **193**, 270–292, doi:10.1016/S0022-1694(96)03141-1.
- Rowe DB, Getter KL, Durhman AK (2012) Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years, In: *Landsc Urban Plan.* číslo **104**, 310–319, doi:10.1016/j.landurbplan.2011.11.010.
- Savi T, Andri S, Nardini A (2013) Impact of different green roof layering on plant water status and drought survival, In: *Ecol. Eng.* číslo **57**, 188–196, doi:10.1016/j.ecoleng.2013.04.048.
- Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E (2012) Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* číslo **9**, 676–682. doi:10.1038/nmeth.2019.
- Skala V, Dohnal M, Votrubova J, Jelinkova V (2019) The use of simple hydrological models to assess outflow of two green roofs systems, In: *Soil Water Res.* číslo **14** (2), 94–103, doi:10.17221/138/2018-SWR.
- Skala V, Dohnal M, Votrubová J, Vogel T, Dušek J, Šácha J, Jelínková V (2020) Hydrological and thermal regime of a thin green roof system evaluated by physically-based model, In: *Urban For. Urban Green.* číslo **48**, doi:10.1016/j.ufug.2020.126582.
- Skalová V, Dohnal M, Votrubová J, Vogel T, Šanda M (2021) Interannual Variability of Catchment Water Balance in Montane Norway Spruce Forest, In: *aktuálně v revizním řízení*.
- Skerget L, Tadeu A, Brebbia CA (2018) Transient numerical simulation of coupled heat and moisture flow through a green roof, In: *Eng. Anal. Bound. Elem.* číslo **95**, 53–68, doi:10.1016/j.enganabound.2018.06.018.
- Sněhota M, Hanzlíková J, Sobotková M, Moravczik P (2020) Water and thermal regime of extensive green roof test beds planted with sedum cuttings and sedum carpets, In: *J Soils Sediments*, doi:10.1007/s11368-020-02778-x.
- Starry O, Lea-Cox JD, Kim J, van Iersel MW (2014) Photosynthesis and water use by two *Sedum* species in green roof substrate, In: *Environ. Exp. Bot.* číslo **107**, 105–112, doi:10.1016/j.envexpbot.2014.05.014.
- Stovin V, Vesuviano G, De-Ville S (2015) Defining green roof detention performance, In: *Urban Water J.* číslo **14** (6), 574–588, doi:10.1080/1573062X.2015.1049279.

Sun T, Bou-Zeid E, Wang Z, Zerba E, Ni GH (2013) Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport, In: *Build. Environ.* číslo **60**, 211–224.

van Genuchten MT (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: *Soil Sci Soc Am J.* číslo číslo **44** (5), s. 892–898, doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

VanWoert ND, Rowe DB, Andersen JA, Rugh CL, Xiao L, (2005b) Watering Regime and Green Roof Substrate Design Affect Sedum Plant Growth, In: *HortScience.* číslo **40** (3), 659–664, doi:10.21273/HORTSCI.40.3.659.

VanWoert ND, Rowe DB, Andresen JA, Rugh CL, Fernandez RT, Xiao L (2005a) Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth, In: *J. Environ. Qual.* číslo **34** (3), 1036–1044, doi:10.2134/jeq2004.0364.

Vogel T, Březina J, Dohnal M, Dušek J (2010) Physical and Numerical Coupling in Dual-Continuum Modeling of Preferential Flow, In: *Vadose Zone J.* číslo **9** (2), s. 260–267, doi:10.2136/vzj2009.0091.

Vogel T, Dohnal M, Dušek J, Votrubová J, Tesař M (2013) Macroscopic Modeling of Plant Water Uptake in a Forest Stand Involving Root-Mediated Soil Water Redistribution, In: *Vadose zone J.* číslo **12** (1), doi:10.2136/vzj2012.0154.

Vogel T, Gerke HH, Zhang R, van Genuchten MTh (2000) Modeling flow and transport in a two-dimensional dual-permeability system with spatially variable hydraulic properties, In: *J. Hydrol.* číslo **238**, 78–89, doi:10.1016/S0022-1694(00)00327-9.

Vogel T, Votrubová J, Dušek J, Dohnal M (2016) Mesoscopic aspects of root water uptake modeling – Hydraulic resistances and root geometry interpretations in plant transpiration analysis, In: *Adv. Water Resour.* číslo **88**, 86–96, doi:10.1016/j.advwatres.2015.12.006.

Wolf D, Lundholm JT (2008) Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability, In: *Ecol. Eng.* číslo **33** (2), 179–186, doi:10.1016/j.ecoleng.2008.02.008.

Zhang Z, Szota C, Fletcher TD, Williams NSG, Werdin J, Farrell C (2018) Influence of plant composition and water use strategies on green roof stormwater retention, In: *Sci Total Environ.* číslo **625**, 775–781, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.231.

Post-processing krátkodobých hydrologických předpovědí pomocí aplikace metody DRESSING

Tomáš VLASÁK, Jakub KREJČÍ

Český hydrometeorologický ústav, Česká republika, email: tomas.vlasak@chmi.cz, jakub.krejci@chmi.cz

Abstract

Pravděpodobnostní hydrologické předpovědi používané v operativním provozu jsou často založené výhradně na různých variantách předpovědi srážek, které jsou dominantním zdrojem nejistoty předpovědi v období povodňových stavů. Navržená metoda označovaná dressing zahrnuje do hydrologického předpovědního ansámblu nejistotu z hydrologického modelu pomocí statistické analýzy odchylek modelovaných a pozorovaných průtoků. Úprava pravděpodobnostních předpovědí průtoků je aplikována post-processingem bez zásahů do samotného modelu a je zaměřena především na odtokové fáze, kdy se nepředpokládají vydatné srážky a rozptyl původního ansámblu je nedostatečný. Porovnáním úspěšnosti krátkodobých operativních ansámblových předpovědí před a po úpravě metodou dressing bylo prokázáno zřetelné zlepšení statistiky.

Úvod

Zjednodušení reality v předpovědních modelech, nepřesná vstupní data a další zdroje nejistoty vedou nevyhnutelně k předpovědím, které se vždy, více či méně, odchylují od reality. Nepřesnosti předpovědi jsou nejdůležitějším omezením v jejich využití a jedním z řešení je kvantitativní vyjádření jejich nejistoty. Proto předpovědi průtoků hydrologických služeb zahrnují často dva základní produkty: 1.) **deterministickou předpověď**, jednu variantu průběhu vodního stavu a průtoku vypočtenou z jedné zvolené sady příčin (srážky, nasycenosti, atd.) a 2.) **pravděpodobnostní předpověď**, u které opakovaným výpočtem při různých variantách vstupů a nastavení hydrologického modelu získáme rozptyl variant průtoků, ze kterých lze odhadnout rizika (pravděpodobnosti) dosažení různých odtokových scénářů. Pravděpodobnostní předpovědi umožňují prodloužit časový předstih předpovědi a efektivněji je využít nejen v protipovodňové ochraně, ale i při nízkých průtocích. Proto je na jejich úspěšnost vyvíjen stejný tlak jako u deterministických předpovědí.

Pravděpodobnostní předpovědi lze získat několika postupy. Některé jsou založené na kvantifikaci různých zdrojů nejistot předpovědi, vytvoření statistického rozložení možných odchylek (perturbaci) a jeho aplikaci do výpočtu předpovědi vytvořením předpovědního ansámblu. Jiné využívají několika deterministických předpovědí vytvořených z různých modelů. V případě hydrologických pravděpodobnostních předpovědí průtoků je velmi často předpovědní ansámbl založen výhradně na různých variantách předpovědi srážek a teplot. Nejistota vznikající při hydrologickém modelování se zanedbává. Tento postup je obhajitelný především při povodních, kdy je vliv nejistoty předpovědi srážek natolik dominantní, že pro účely protipovodňové ochrany je tato pravděpodobnostní předpověď dostatečná. Nicméně hydrologické předpovědi získávají postupně i jiné využití, než je protipovodňová ochrana. Pro plánování manipulací na vodních dílech, pro energetiku nebo pro čerpání vody z řek v době sucha mají pravděpodobnostní předpovědi význam i v době nevýrazného kolísání nebo poklesu průtoků. Kromě toho fungující ansámblový systém v době „hydrologického klidu“ je důležitý pro získání důvěry v pravděpodobnostní předpovědi a proto by pravděpodobnostní předpovědi měly obsahovat kvantifikovanou informaci o nejistotě celého předpovědního systému, nikoliv pouze předpovědi srážek. Prezentovaná metoda rozšiřuje hydrologickou předpověď o nejistotu hydrologického modelování a je primárně určena pro zpřesnění pravděpodobnostních předpovědí založených výhradně na variantách srážek. Vychází z metody dressing, kterou publikoval Pagano a kol. (2012). Je založena na analýze historických odchylek modelovaných a pozorovaných průtoků a následném vytvoření chybových

modelů. Aplikuje se metodou post-processingu, tedy úpravou hydrologické předpovědi po jejím výstupu z hydrologického modelu. Výhodou post-processingu je snadná implementace do provozu bez narušení ostatních předpovědních procedur.

Nejistota hydrologických předpovědí

Předpovědní modely a jejich zdroje nejistoty

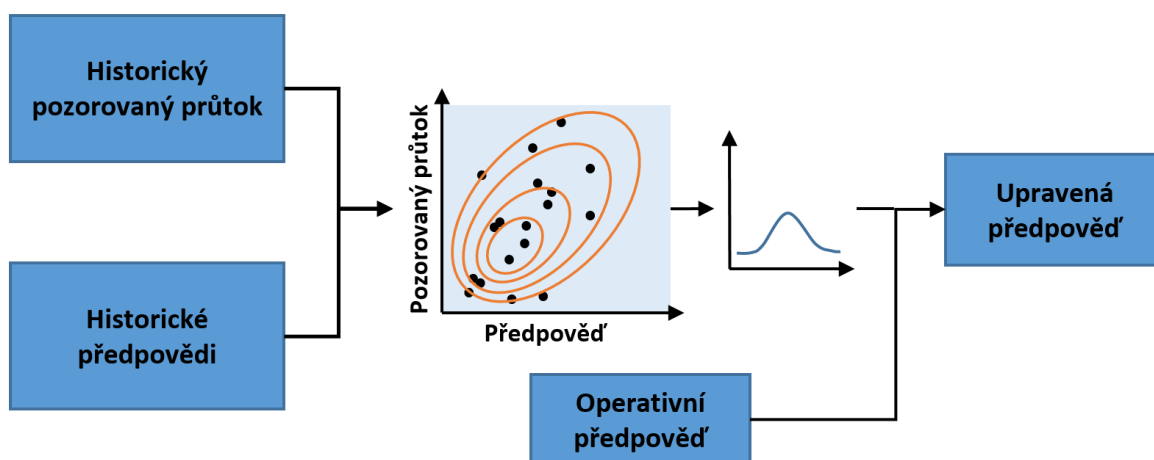
Pochopení důvodů proč se hydrologické předpovědi odchylojí od pozorování je klíčem k rozvoji úspěšnosti jak deterministických tak pravděpodobnostních předpovědí. Krzysztofowicz (1999) rozděluje nejistotu hydrologických předpovědí do tří skupin a to na:

1. **nejistotu operativní**, která je způsobena náhodně chybějícími nebo chybnými daty a operativním řízením modelu,
2. **nejistotu vstupů**, která zahrnuje odchylky naměřených a především předpovídaných dat a skutečnosti, které souvisejí s nedokonalostí metod jejich zpracování.
3. **nejistotu hydrologickou**, zahrnující další vlivy, především ale nepřesnosti vlastního hydrologického modelu a jeho parametrů.

Nejistotu vstupů řeší metody pre-processingu, které předcházejí samotnému výpočtu v modelu předpovědi. Pozorované prvky (srážky, teploty, průtoky) zpravidla nejsou zatíženy takovou chybou. Jejich nejistota se většinou zanedbává, nebo se zmenšuje či kvantifikuje pomocí některé z pre-processingových metod, například (Schaaake a kol., 2010). U předpovědi v období povodňových stavů je dominantním zdrojem nejistoty kvantitativní předpověď srážek z numerických předpovědních modelů. Různé varianty srážek jsou proto základní a často také jedinou kvantifikovanou nejistotou pro pravděpodobnostní hydrologickou předpověď. Pravděpodobnostní hydrologické předpovědi založené pouze na různých variantách srážek trpí především nedostatečným rozptylem variant v době srážkově chudého období. V těchto případech je podstatnější nejistota hydrologická a operativní.

Nejistota operativní a hydrologická, případně i nejistota hydrologické předpovědi jako celku se upravuje většinou metodami post-processingu, které stojí mezi výstupem předpovědi z modelu a její finální publikací pro uživatele. Statistický post-processing je zjednodušeně řečeno model, který využívá vztah mezi předpovědí a pozorovaným prvkem (obr. 1). Metod statistického post-processingu je celá řada, od jednoduché metody percentilů přes složitější statistické postupy jako je Kalmanův filtr nebo Bayesova metoda až po aplikace neuronových sítí. Přehled metod post-processingu v hydrologii uvádí například Li. (2017).

Metoda dressing spojuje již vytvořený ansámbl hydrologické předpovědi, který je zpravidla založený na pravděpodobnostní předpovědi srážek, se statistickým rozdělením odchylek hydrologického modelování, a tím dosahuje komplexního popisu nejistoty hydrologické předpovědi.



Obr. 1 Schéma statistického post-processingu hydrologické předpovědi (Li a kol., 2017)

Použité metody hodnocení pravděpodobnostních předpovědí

Pro vyhodnocení úspěšnosti metody dressing byly použity tři metody používané v oblasti ansámblových předpovědí, které se zaměřují na vlastnosti rozdělení, předpovědní dovednost (skill) a podmíněnou verifikaci předpovědi. Rovněž byla testována spolehlivost předpovědi pomocí intervalu spolehlivosti, ale výsledky nejsou v tomto článku prezentovány. Rank histogram (talagrand) byl použit pro posouzení rozsahu ansámblu předpovědi se skutečnou variabilitou pozorování. Brier score je vhodné kritérium pro verifikaci kategorické předpovědi z pohledu přesnosti pravděpodobnostní předpovědi, kdy zkoumáme, zda nastal definovaný jev. Odpovídá na otázku, jak velká je chyba pravděpodobnostní předpovědi. Přínos posledního z použitých kritérií ROC (relative operation characteristics) spočívá v jeho schopnosti rozlišit mezi výskytem a nevýskytem určité události pro dané podmínky. Charakterizuje rozlišení předpovědi.

Post-processing metodou dressing s dynamicky vytvářeným chybovým modelem

Navržený postup je určen pro úpravu pravděpodobnostní hydrologické předpovědi počítané z meteorologického předpovědního ansámblu a je odvozen od metody dressing, který publikoval Pagano a kol. (2012). Nejistota hydrologického modelování je vyjádřena chybovým modelem, který je odvozen ze statistického rozložení odchylek historických předpovědí průtoků od pozorovaného průtoku pro různý předstih předpovědi.

Historické předpovědi pro tento účel byly vypočteny tak, že na vstupech do hydrologického modelu byly předpovídané srážky nahrazeny pozorovanými srážkami, aby došlo k odstínění vlivu nejistoty předpovědi srážek. Způsob výpočtu historických předpovědí a rozsah jejich datové základny je zásadní pro fungování metody. Historické předpovědi by měly dobře reprezentovat nejistoty hydrologického modelování v operativním provozu a měly by pokrývat co nejvíc odtokových variant.

V případě testování metody dressing bylo využito resimulací historických předpovědí hydrologickým systémem AquaLog, jehož srážko-odtokovou komponentou je kontinuální model SAC-SMA (Krejčí a Zezulák, 2009). Model AquaLog je v České republice používán pro operativní hydrologickou předpověď a jeho provoz je z větší části automatizovaný s výjimkou napojení modelovaného průtoku na poslední změřenou hodnotu při asimilaci průtoků. Předpokládáme proto, že odchylky historických předpovědí od pozorovaného průtoku dobře reprezentují nejistotu hydrologického modelování jako celku bez rozlišení jednotlivých zdrojů nejistoty (vstupní data, počáteční podmínky, struktura modelu, operativní řízení, atd.)

Výpočtem systému AquaLog bylo pro každý vodoměrný profil v povodí horní Vltavy po VD Orlické přehradě připraveno 2780 předpovědí z let 2012 až 2020. Všechny předpovědi začínaly v 7:00, tedy ve stejný čas jako operativní předpověď. Tento faktor může být důležitý při post-processingu epizod vyvolaných táním sněhu, které mívají silný denní chod z důvodu vysokých teplot přes den a nízkých přes noc. Zpracováním odchylek ze souboru historických předpovědí vzniká chybový model.

Vytvoření chybového modelu

Úspěšnost výpočtu průtoku hydrologickým modelem se liší pro různé předpovědní profily a zároveň klesá s předstihem předpovědi. Různá úspěšnost souvisí s hydrologickými poměry, vstupními daty, vlivem nemodelovaných procesů (lidské aktivity) a dalšími faktory. Časový pokles úspěšnosti hydrologické předpovědi s narůstajícím předstihem a při zanedbání vlivu předpovědi srážek má dvě příčiny: 1) předpověď je v poslední fázi výpočtu napojena na pozorovaný průtok, což eliminuje chybu v krátkém předstihu předpovědi, 2) u dolních profilů se v předstihu, který odpovídá doběhové době z horního profilu, předpověď zčásti počítá modelem na postup vody korytem toku, který je spolehlivější než srážko-odtokový model.

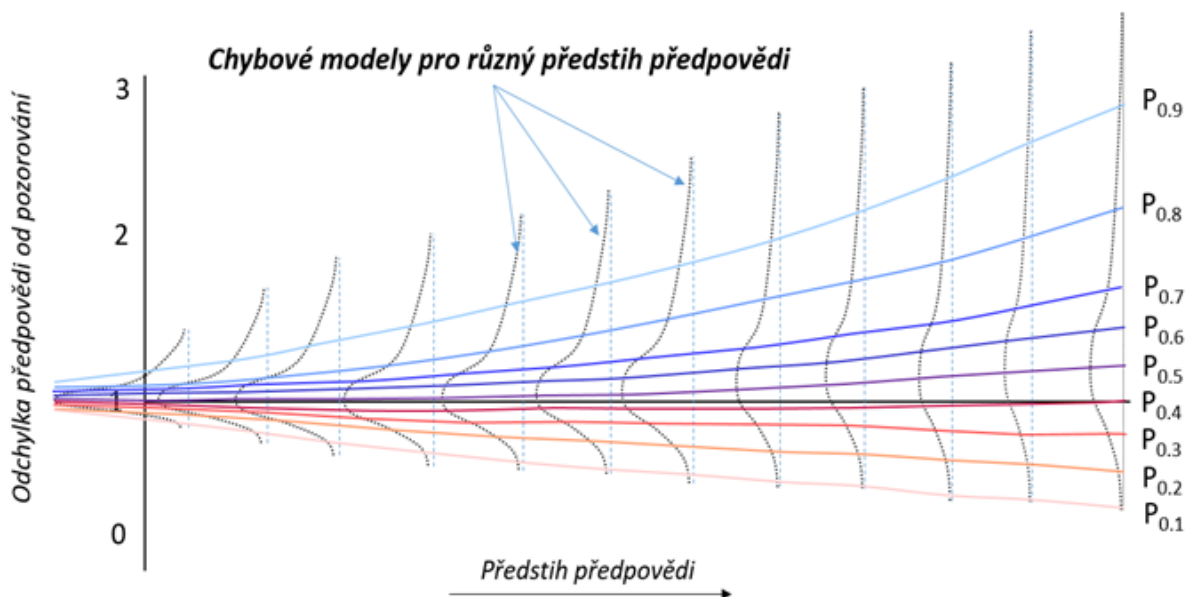
Z těchto důvodů byly vytvořeny chybové modely pro každý předstih předpovědi zvlášť, s časovým krokem, který odpovídá časovému kroku operativního výpočtu, tedy 1 hodiny.

Chybový model vznikl statistikou odchylek Q_{dif} vypočtených podle vzorce:

$$Q_{dif_p} = \frac{Q_{obs_p}}{Q_{sim_p}} \quad (2)$$

kde Q_{simp} je vypočtený průtok v čase předpovědi p a Q_{obs} je pozorovaný průtok v čase předpovědi s předstihem p .

Při krátkém časovém předstihu je většina odchylek odečtených z historických předpovědí blízká číslu jedna a se zvyšujícím se předstihem se zvětšuje směrodatná odchylka a rozšiřuje rozptyl odchylek (viz obr. č. 2). U některých vodoměrných profilů se v chybových modelech vyskytuje nerovnoměrné rozdělení nadhodnocených a podhodnocených předpovědí, tzn. systematická odchylka (bias), která souvisí s kalibrací modelu a volbou vhodných parametrů. Takto vytvořený chybový model upravuje ansámbovou předpověď dvěma způsoby: 1) rozšiřuje rozptyl hydrologického ansámblu počítaného podle variant srážek a 2) redukuje systematickou chybu modelu (bias).



Obr. 2 Typický průběh chybového modelu v závislosti na předstihu předpovědi. Barevné čáry označují percentily rozložení odchylek.

Pagano a kol. (2012) používají jeden chybový model pro každý vodoměrný profil. Výhodou tohoto přístupu je malá rozkolísanost chybového modelu, který je vypočtený z velkého množství historických předpovědí. Jeden chybový model pro každý vodoměrný profil také usnadňuje aplikaci metody do operativního provozu. Ve skutečnosti je zřejmé, že nejistota hydrologického modelu se liší u různých odtokových fází. Nárůst chybovosti průtoku s předstihem u období beze srážek, kdy se očekává setrvalý stav hladin nebo mírný pokles a při předpovědi silných srážek, se výrazně liší.

Vhodným řešením tohoto problému se ukázalo dynamické sestavení chybového modelu. To znamená, že chybový model se liší nejen pro každý předpovědní profil a časový předstih, ale také podle typu odtokové fáze. Pro každou upravovanou předpověď je v archivu historických předpovědí vybrán určitý počet nejpodobnějších epizod a z nich je následně sestaven chybový model. Metoda dressing je tímto přístupem kombinovaná s post-processingovou metodou historického analogu (Li, 2017).

Kritériem podobnosti pro výběr historických analogů byl zvolen široce používaný Nash-Sutcliffe koeficient. Jeho výpočet vychází z rovnice (2):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

kde S_i je průtok aktuální předpovědi v čase i , O_i je průtok historické předpovědi v čase i a \bar{O} je průměrný průtok historické předpovědi.

Konstrukce chybového modelu pro různé odtokové fáze je korektnější, protože nezahrnuje do jednoho chybového modelu různé odtokové fáze hydrogramu. Jeho další výhodou je možnost odlišení předpovědí, které se pro metodu dressing nehodí. Jsou to předpovědi, které mají natolik dynamický

vývoj, že je obtížné k nim najít podobné historické epizody a chybové modely mohou být proto rozkolísané a dávat příliš velký rozptyl. V naprosté většině se jedná o předpovědi v období vyšších stavů, kdy je dominantním zdrojem nejistoty kvantitativní předpověď srážek a proto původní ansámbl, založený na variantách předpovědi srážek, zpravidla poskytuje dostatečný odhad nejistoty předpovědi.

O tom, kolik předpovědi se zohlední při konstrukci chybového modelu pro metodu dressing, rozhoduje minimální velikost Nash-Sutcliffe (NS) koeficientu, který odděluje historické předpovědi vhodné od nevhodných pro chybový model a délka porovnávané časové řady. U hydrologických předpovědi existuje silná autokorelace mezi pozorovaným a předpovídaným průtokem a proto porovnávaný úsek časové řady by měl kromě předpovědi zahrnovat i co nejdélší část pozorovaného průtoku, který předpovědi předchází. To ovšem zásadně zmenšuje šanci nalézt mezi historickými předpověďmi dostatečný počet analogonů a proto se hledání podobných historických předpovědi provádělo pouze srovnáním předpovídaných průtoků.

Aplikace na předpovědní ansámbl

Chybový model byl vyjádřen 9 hladinami pravděpodobnosti překročení ze seřazených odchylek předpovědi od pozorovaného průtoku. Hladiny odpovídají percentilům P_{0,1}; P_{0,2}; P_{0,3} až P_{0,9}. Každá hydrologická předpověď (každý člen předpovědního ansámblu) se pomocí těchto percentilů rozpočetl na 9 nových předpovědí tak, že se průtok vynásobil postupně devíti odchylkami chybového modelu pro každý předstih předpovědi. Tím vznikl nový ansámbl o velikosti 9x původní počet členů. V případě použití metody na úpravu krátkodobé předpovědi srážek ze 17členného systému ALADIN-LAEF vznikl 153členný předpovědní ansámbl.

Počet členů předpovědního ansámblu by se ale po post-processingu neměl měnit ze dvou důvodů: 1.) dressing některých předpovědí z důvodu malého počtu podobných historických předpovědí vůbec neproběhne a 2.) post-processing by neměl ovlivnit další zpracování předpovědi (publikace, archivace). Z těchto důvodů je dalším krokem metody redukce počtu členů na jeho původní počet. Z více testovaných postupů byla nakonec zvolena jednoduchá metoda výběru podle percentilů. Členové rozšířeného ansámblu se seřadí podle velikost na základě zvoleného kritéria (průměrný průtok, nebo maximální průtok nebo kombinace více ukazatelů) a ze všech 17 intervalů se z každého vybere jeden člen. Úskalí toho přístupu spočívá v tom, že nově vytvořené varianty předpovědi nemusí být přímo provázané s původní neupravenou předpovědí, a proto některé varianty, typicky s podružnými vlnami, se v novém ansámblu nemusí objevit. Rozptyl předpovědí podle zvoleného kritéria (průměrný průtok, maximální průtok, atd) je ale vyjádřený správně.

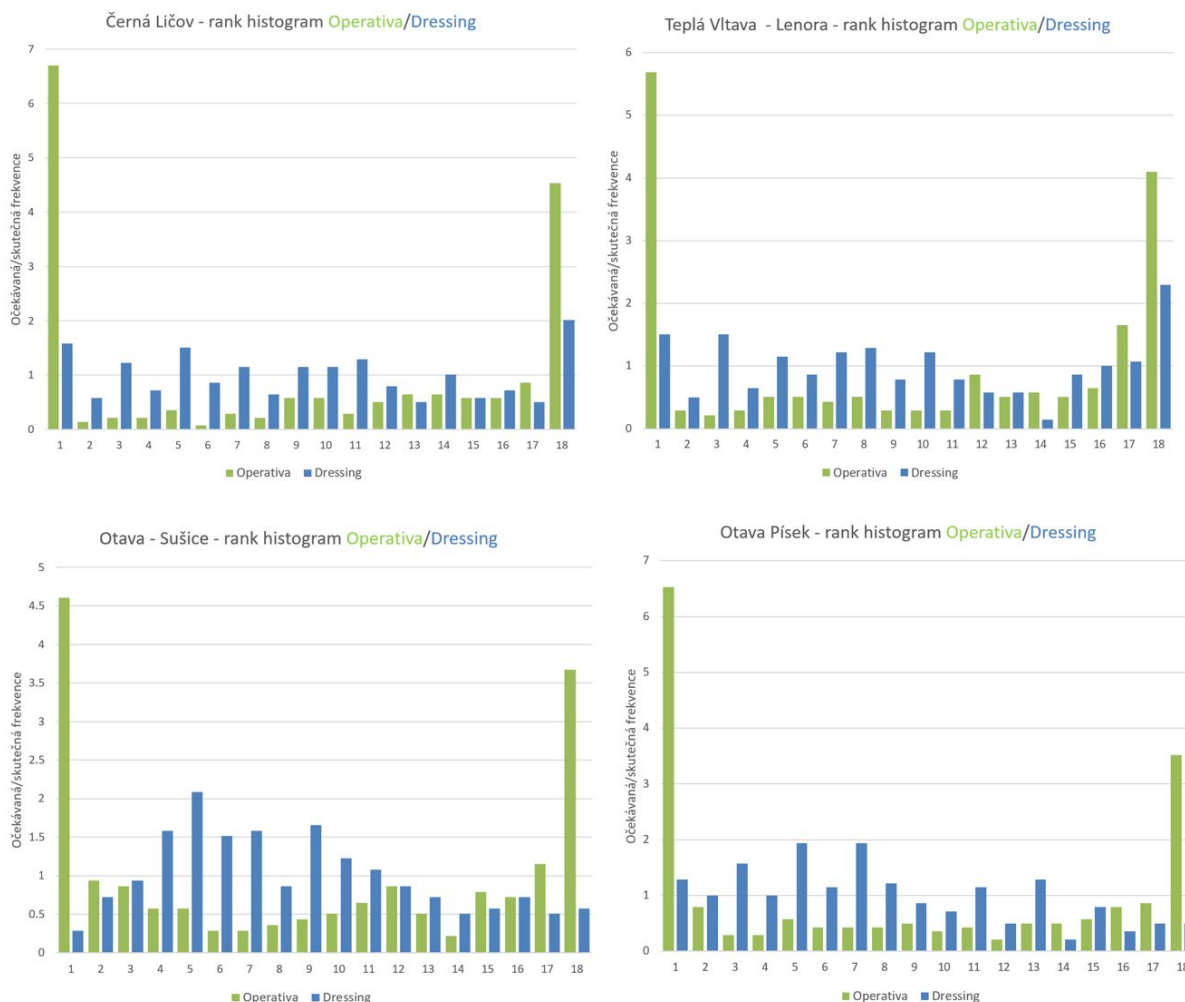
Výsledky

Testování postprocessingové metody dressing s dynamicky vytvářeným chybovým modelem zpočívalo v nalezení optimálních parametrů pro konstrukci chybového modelu a následného vyhodnocení změny úspěšnosti ansámblových předpovědí operativního provozu po aplikaci post-processingu. Pro výběr chybového modelu bylo použito 2780 historických předpovědí z let 2012–2020, pro testování úspěšnosti metody 270 reálných pravděpodobnostních předpovědí vypočtených v operativním provozu v letech 2020 až 2021 na základě 17 variant srážek z předpovědního systému ALADIN-LAEF.

Výběr historických předpovědí pro konstrukci chybového modelu je závislý na minimálním počtu historických předpovědí a na nastavené míře podobnosti s aktuální předpovědí, respektive na minimální velikosti koeficientu NS. Příliš malý počet historických předpovědí způsobuje rozkolísání chybového modelu, a proto byl minimální počet nalezených analogonů stanoven na 20 případů.

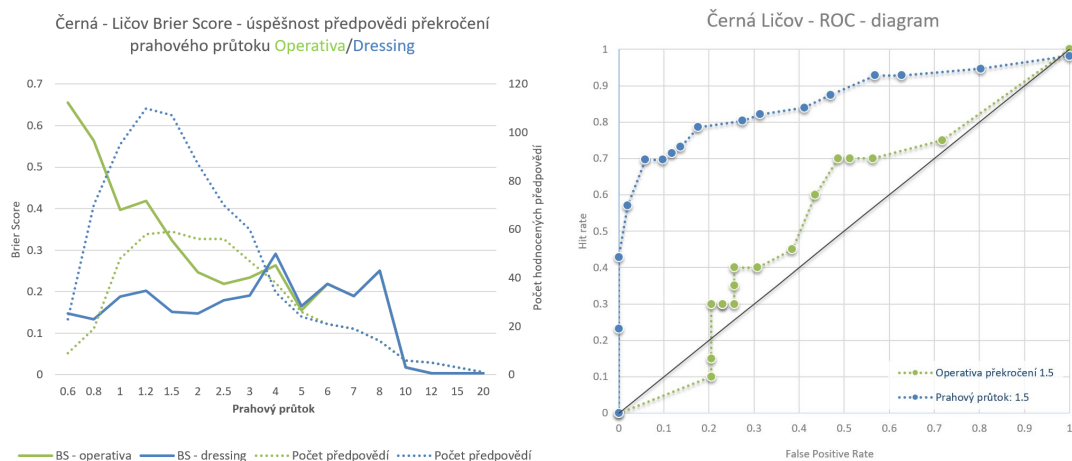
Při vysoké míře podobnosti ($NS > 0,7$) mezi upravovanou předpovědí a jejími historickými analogony docházelo k nejlepším výsledkům, ale podíl předpovědí, které byly upraveny post-processingem klesl na jednotky procent. U kritéria výběru $NS > 0$ bylo již upraveno mezi 95 a 99 % všech předpovědí. Rozptyl chybového modelu byl ale příliš velký a produkoval horší výsledky zejména v nadmíru velkém rozptylu upraveného ansámblu hydrologických předpovědí. Jako optimální hodnota se ukázala velikost NS mezi 0,2 až 0,3, která umožňuje úpravu přibližně poloviny předpovědí.

Při srovnání úspěšnosti metody se sledovaly 4 hodnotící metody popsané v kapitole 3 na čtyřech vybraných předpovědních profilech o velikosti povodí v rozsahu od 200 do 3000 km². Zlepšení úspěšnosti hydrologických ansámblových předpovědí po aplikaci post-processingu se projevilo zejména výrazným poklesem případů, kdy skutečný průtok ležel mimo předpovídaný „vějíř“ odtokových variant. To dokládají nejlépe rank-histogramy na obrázku 3.



Obr. 3 Rank histogram četnosti pozorovaného průměrného průtoku mezi 17 variantami průměrných průtoků u původní předpovědi a u předpovědi upravené post-postprocessingem

Z hlediska metody, která používá hodnocení úspěšnosti pravděpodobnosti založené na překročení určitého prahového průtoku, se ukázalo, že v oblasti průměrných a podprůměrných průtoků metoda vylepšuje výsledky ansámblových předpovědí ve všech kritériích. U předpovědí do nadprůměrných průtoků a průtoků, které jsou více rozkolísané, výrazně klesá podíl upravených předpovědí (viz. graf BrieScore) a klesá také vliv úprav na úspěšnost předpovědí. Míra vylepšení předpovědí v různých vodoměrných profilech kolísá a souvisí zřejmě s různou nejistotou hydrologického modelování a historických předpovědí pro konkrétní povodí.



Obr. 4 Brier Score pro různé prahové hodnoty průtoku a úspěšnost předpovědi překročení průměrného průtoku nad $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vyjádřeno ROC diagramem u původní předpovědi a u předpovědi upravené post-processingem.

Diskuze

Úspěšnost metody je do značné míry závislá na archivu historických předpovědí, respektive na jeho rozsahu a kvalitě předpovědí. Historických předpovědí musí být dostatečný počet, aby pokrývaly variabilitu odtoku a poskytovaly dostatečně spolehlivé a málo rozkolísané chybové modely. Zároveň musí historické předpovědi dobře reprezentovat operativní režim předpovědního pracoviště, což může být u některých hydrologických služeb komplikované.

Archiv 2780 historických předpovědí za období 9 let poskytuje dostatečnou datovou základnu pro úpravu předpovědí s malou variabilitou většinou průměrných nebo podprůměrných průtoků s vyšší pravděpodobností výskytu. Při rozšíření této základny lze očekávat lepších výsledků při nastavení vyšší hodnoty podobnosti mezi aktuální předpovědí a historickými analogony.

V provozu mnoha hydrologických předpovědních pracovišť se stále uplatňuje režim interaktivního výpočtu modelu. Osoba hydrologa kontroluje vstupní data, optimalizuje počáteční podmínky (nasycenost v modelu). Může měnit i parametry modelu a upravuje také výsledný hydrogram předpovědi tak, aby plynule navazoval na měřený průtok. Automatizovaný výpočet historických předpovědí tyto zásahy nemůže beze zbytku zohlednit. Proto jsou některé historické předpovědi zatíženy jinou chybou než kdyby vznikaly v operativním režimu. Lze tedy předpokládat, že rozsah možných odchylek bude z automaticky získaných historických předpovědí větší, než je skutečná nejistota. To se také projevilo při konstrukci chybových modelů, které měly převážně příliš velký rozptyl. Pro plně automatický předpovědní systém by tento druh post-processingu mohl mít větší úspěšnost a naopak u systému, kde se zvyšuje podíl osoby hydrologa na tvorbě předpovědi, již nebude použitelný.

Vývoj hydrologických modelů směřuje k automatickému provozu, podobně jako je tomu u numerických meteorologických předpovědních modelů. Přejdem od událostních modelů na kontinuální je vyřešen přenos okrajových (počátečních) podmínek. Také složitější struktura a zejména prostorová rozlišení (plně distributivní modely) hydrologických modelů komplikují nebo přímo znemožňují zásahy do výpočtu odtoku, a proto vliv osoby hydrologa na předpověď se postupně zmenšuje. Výhodou hydrologických modelů je jejich malá náročnost na výpočetní kapacitu. Výpočet historických předpovědí je možné velmi rychle provést na běžném počítači a limitujícím faktorem je pouze délka datové základny. Na rozdíl od meteorologických modelů, lze získat zpětnými výpočty velmi dobý přehled o nejistotách celého procesu modelování a to společně s rozšiřováním automatických nebo poloautomatických provozů hydrologického modelu znamená potenciál pro další aplikace metod post-processingu.

Závěr

Metoda post-processingu dressing s dynamicky sestavovaných chybovým modelem je vhodným nástrojem pro úpravu ansámblových hydrologických předpovědí založených pouze na variantách různých předpovědí srážek ve smyslu rozšíření nejistoty předpovědi o nejistotu hydrologického modelování. Metoda odvozuje tuto nejistotu z odchylek historických předpovědí, které by měly co nejlépe reprezentovat možné chyby hydrologického předpovědního systému jako celku bez vlivu nejistoty předpovědi srážek.

Výsledky ukázaly, že metoda je velmi úspěšná u předpovědí v období průměrných a podprůměrných průtoků, které se v historii často opakovaly a je možné k nim najít dostatečný počet podobných historických případů. U předpovědí do období vyšších průtoků a při stoupající hladině řeky se obvykle nenajde dostatečný počet podobných situací v databázi historických předpovědí a proto k úpravě metodou dressing vůbec nedojde. Jsou ovšem situace, kdy dominantním zdrojem nejistoty je předpověď srážek a tu dostatečně vyjadřuje vstup ansámblové meteorologickém předpovědi.

Metoda je vhodná pro operativní provoz u hydrologických služeb využívajících automatické nebo poloautomatické předpovědní systémy. Je snadno naprogramovatelná a lze ji implementovat bez narušení již zavedených procesů.

Poděkování

Aplikace metody dressing vznikla v rámci projektu podporovaného Ministerstvem vnitra, kontrakt VI20192021166 Hydrometeorologická rizika v České republice – změny rizik a zlepšení jejich predikcí. Autoři chválí ministerstvo za podporu výzkumu.

References

- Krejčí, J., Zezulák, J., (2009), The use of hydrological system AquaLog for flood warning service in the Czech Republic. [online]. Regional Workshop on Hydrological Forecasting and Real Time Data Management At: Dubrovnik [cit. 30.6.2011] Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/301358002_The_use_of_hydrological_system_AquaLog_for_flood_warning_service_in_the_Czech_Republic.
- Li, W., Duan, Q., Miao, C., Ye, A., Gong, W., Di, Z., (2017). A review on statistical postprocessing methods for hydrometeorological ensemble forecasting. WIREs Water, e1246. <https://doi.org/10.1002/wat2.1246>.
- Pagano, T., C., Shrestha, D., L., Wang, Q., J., Robertson, D., Hapuarachchi, P., (2012), Ensemble dressing for hydrological applications, In: Hydrological Processes, Special issue S173 Hydrological Ensemble Prediction Systems (HEPS), pages.
- Schaake, J., Perica, S., Mullusky, M., Demargne, J., Welles, E., Wu, L., (2004), Pre-processing of atmospheric forcing for ensemble streamflow prediction., In: 17th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, AMS.
- Wilks, D. S., (1995) Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Academic Press, San Diego, CA, s. 465.

Projekt DAREFFORT – Medzinárodná spolupráca a výmena údajov v oblasti predpovedných systémov v povodí Dunaja

Valéria WENDLOVÁ, Marcel ZVOLENSKÝ

Slovenský hydrometeorologický ústav, Slovensko, email: valeria.wendlova@shmu.sk,
marcel.zvolensky@shmu.sk

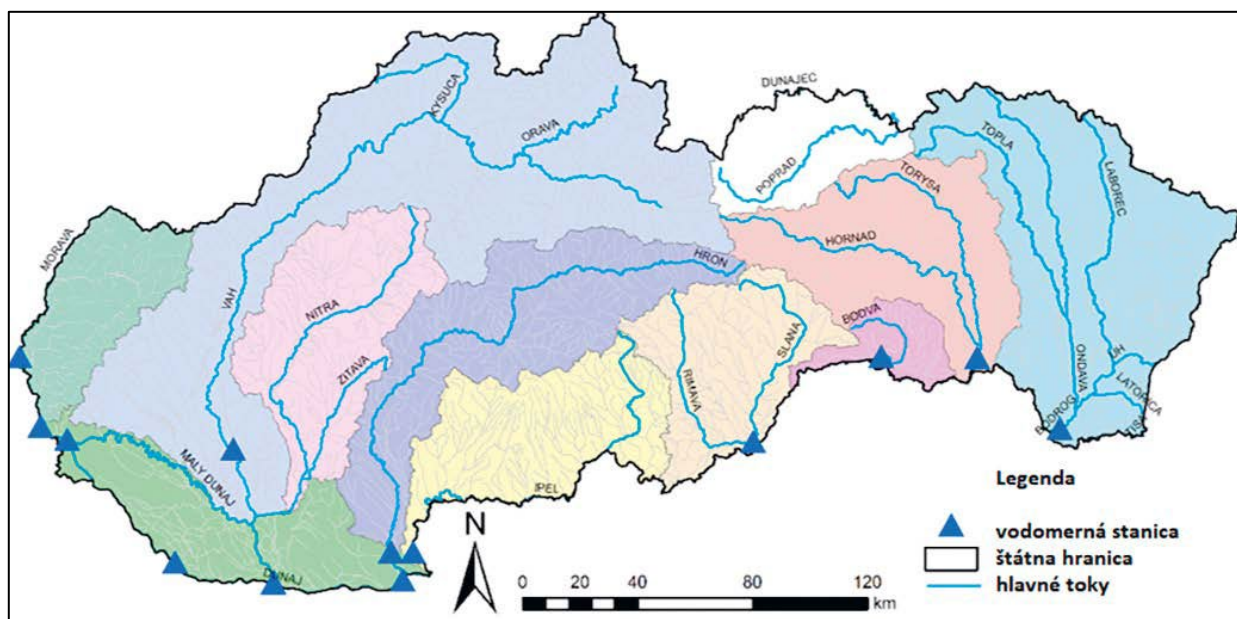
Medzinárodná spolupráca, koordinácia protipovodňových opatrení a zvýšenie kvality predpovedných systémov v celom povodí Dunaja je jedným z hlavných cieľov neštrukturálnych opatrení vyplývajúcich z Plánov manažmentu povodňového rizika. V rámci Danube Transnational Programme – Dunajského nadnárodného programu sa 1. júna 2018 začal Medzinárodný projekt DAREFFORT – Danube River Basin Enhanced Flood Forecasting, ktorý skončil v máji 2021.

Hlavným cieľom projektu bolo vytvorenie štandardizovanej medzinárodnej platformy na výmenu hydrometeorologických dát, ktorá pomôže zlepšiť kvalitu a efektívnosť predpovedných systémov v jednotlivých krajinách. Dôležitým prvkom jeho riešenia je princíp solidarity a výmena skúsenosti.

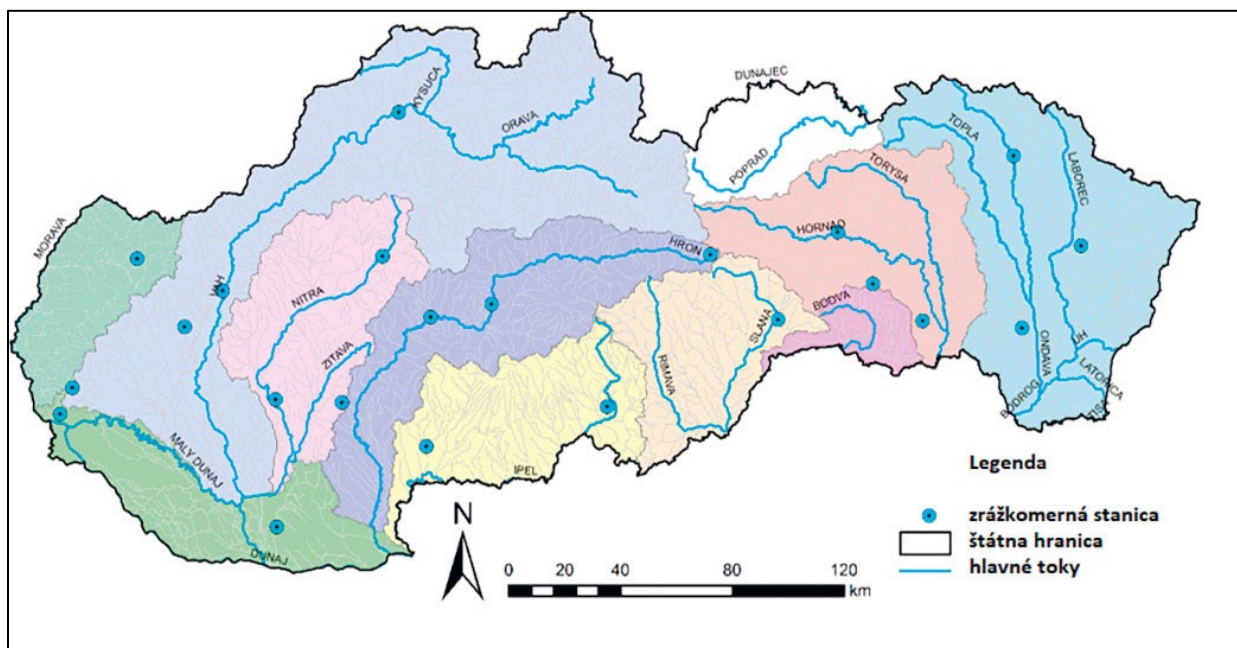
Jednotlivé aktivity boli rozdelené do 5 pracovných balíkov (ďalej WP). V rámci 1. balíka (WP1) bol zabezpečený projektový odborný a finančný manažment, t.j. reporting každých 6 mesiacov. Druhý pracovný balík (WP2) zahŕňal aktivity z oblasti propagácie projektu na národnej a medzinárodnej úrovni, na sociálnej sieti Facebook, LinkedIn, v pravidelnom spravodajcovi v digitálnej, prípadne tlačenej forme a na stránke projektu. Bola vydaná informačná brožúra v anglickom a slovenskom jazyku a prezentačné videa v anglickom a slovenskom jazyku. V júni 2019 SHMÚ v rámci Dňa Dunaja zorganizoval Informačný deň pre širokú verejnosť. Členovia projektového tímu prezentovali projekt na rôznych konferenciách. Výstupy jednotlivých pracovných balíkov a detailné informácie o projekte sú dostupné na stránke <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/dareffort>

Odborné činnosti projektu boli tematicky rozdelené do troch pracovných balíkov, ktoré sú navzájom prepojené a jednotlivé aktivity sa logicky dopĺňajú.

V treťom pracovnom balíku (WP3) sa vykonalo niekoľko analytických aktivít. Slovenskí projektoví partneri (SHMÚ a SVP š.p) vypracovali „Status Quo“ t.j. súčasný stav predpovedných systémov a metodík na predpovedanie povodní a ľadových úkazov. V rámci tohto pracovného balíka sa spracovali čiastkové správy – vyhodnotenie predpovedných systémov v jednotlivých krajinách, prehľad zdrojových údajov a ekonomická analýza scenárov budúcich možných predpovedných systémov. V záverečnom dokumente je zoznam poskytovaných hydrologických a meteorologických údajov s dôrazom na kritické miesta a rozdielnosť formátov jednotlivých údajov, prehľad predpovedných systémov a jednotlivých modelov, analýza toku dát v rámci súčasnej výmeny údajov, špecifikácia predpovedných podmienok v jednotlivých krajinách a návrh možných konceptov na optimálnu spoluprácu pri výmene údajov.



Obr. 1 Vybrané hydrologické stanice SHMÚ pre spoločnú platformu výmeny údajov HyMeDES EnviroNet



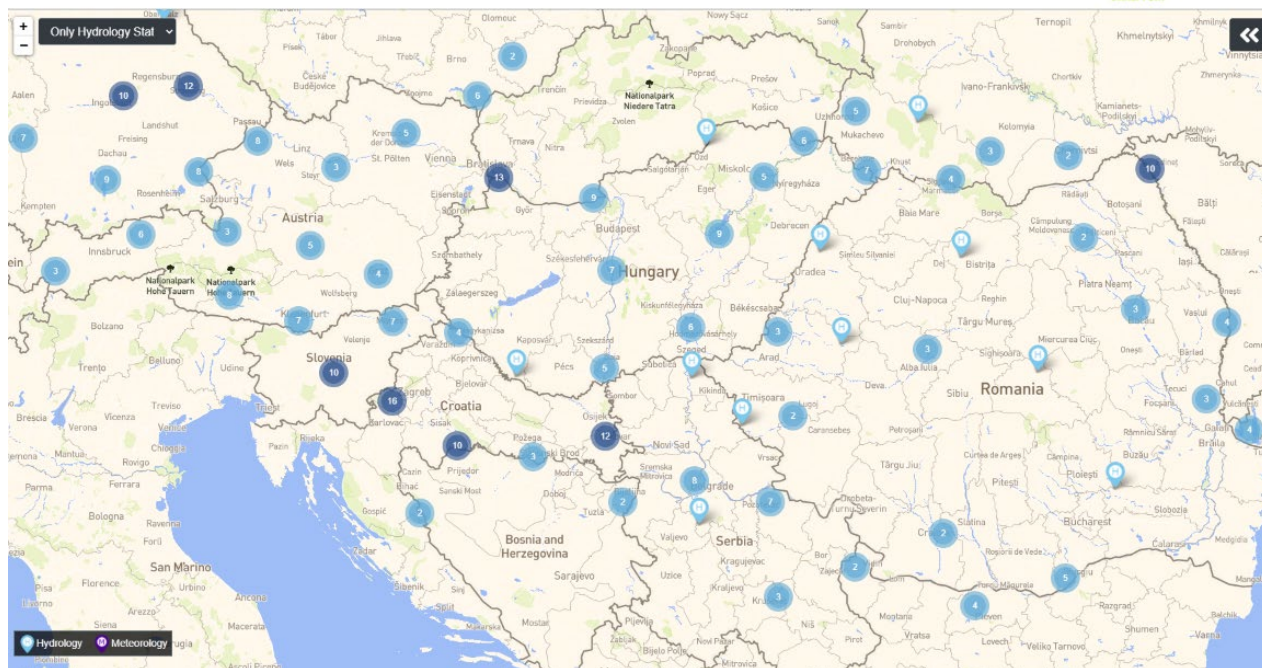
Obr. 1 Vybrané meteorologické stanice SHMÚ pre spoločnú platformu výmeny údajov HyMeDES EnviroNet

V rámci 4. pracovného balíka (WP4) partneri spoločne vypracovali politické odporúčania pre tvorbu dátovej politiky, ktoré budú predložené Medzinárodnej komisii pre ochranu Dunaja (ICPDR) v rámci fungovania Dunajského hydrologického informačného systému (DanubeHIS), čo je zásadný krok k flexibilnej a udržateľnej výmene údajov.

Po analýze dostupných údajov každého z partnerov projektu (formát údajov, používaný informačný systém) a po zadeinovaní špecifických požiadaviek na harmonizáciu údajov, každý z partnerov predložil zoznam staníc, meraných veličín a spôsob ich zdieľania. V rámci aktivít projektu bol navrhnutý koncept na výmenu údajov – HyMeDES EnviroNet (Danube Hydrological and Meteorological Common Data Exchange), ktorý definuje spôsob získavania údajov do Distribučného uzla (centrálny server), ich konverziu na spoločný formát (WaterML 2.0) a distribúciu údajov z centrálneho servera (Obr. 5). V rámci konceptu HyMeDES EnviroNet bol vyvinutý webový nástroj na interaktívne zobrazovanie údajov v mape, ktorá je založená na OpenStreetMap a zobrazuje všetky hydrologické stanice (Obr. 3) a všetky meteorologické stanice (Obr. 4).

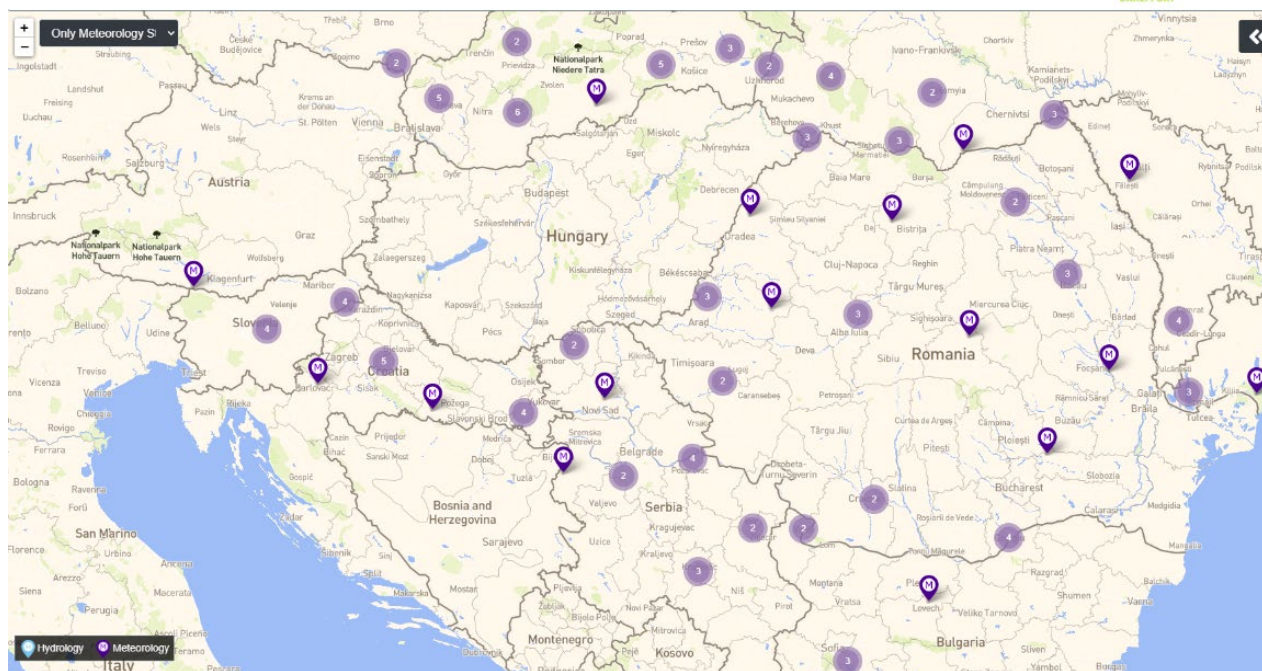
Poskytovatelia dát tak nebudú musieť meniť svoje doterajšie systémy, ani sa prispôbovať formátu údajov ktorémukol'vek z partnerov. SHMÚ navrhol pre projekt Dareffort poskytnúť údaje z 13 hydrologických staníc vodný stav, teplota vody a prietok (Obr. 1) a 22 meteorologických staníc- zrážky v hodinovom časovom kroku (Obr. 2).

Dareffort Environet Map



Obr. 2 Hydrologické stanice v povodí Dunaja

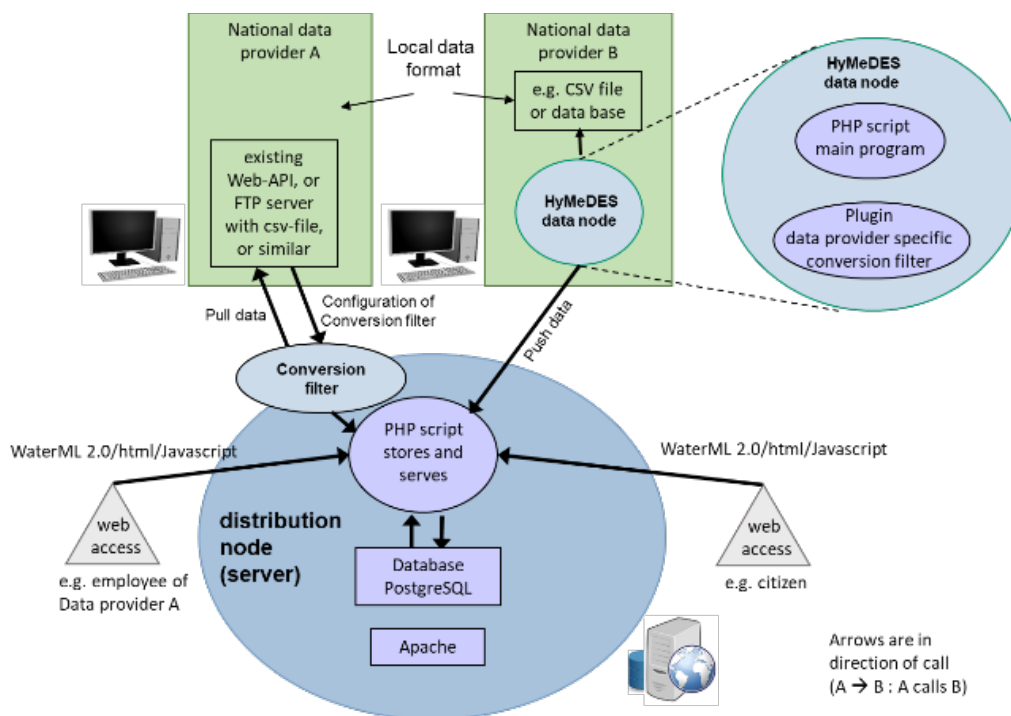
Dareffort Environet Map



Obr. 3 Meteorologické stanice v povodí Dunaja

Vyvinutá platforma a doručovanie údajov od partnerov projektu z viac ako 600 staníc do Distribučného uzla boli testované od začiatku septembra do konca októbra 2020.

Posledné mesiace fungovania platformy ukázali, že spoločný koncept výmeny údajov, konverzia národných dátových formátov do spoločného dátového formátu aj softvér fungujú ako praktická aplikácia v reálnych podmienkach. Jednotlivé krajiny v povodí Dunaja tak budú poskytovať údaje do systému a aj sťahovať údaje do vlastných predpovedných modelov. Po skončení projektu (v máji tohto roka) by mal celý systém fungovať v rámci aktivít Medzinárodnej komisie pre ochranu Dunaja ICPDR (z anglického International Commission for the Protection of the Danube river) a jeho online Informačného systému DANUBE HIS.



Obr. 4 systém HyMeDES Environet

Nástroj je vytvorený, avšak výmena údajov bude dostupná len pre odborníkov a zodpovedné organizácie až po schválení a podpise dohôd na základe dátovej politiky jednotlivých krajín. Pre odbornú a laickú verejnosť sa na webovej stránke ICPDR plánuje vytvoriť vizualizácia dostupných údajov.

Piaty pracovný balík (WP5) bol zameraný na interakciu s koncovými užívateľmi predpovedí a rozvoj znalostí a zručností pri tvorbe hydrologických predpovedí. V priestoroch Vodárenského múzea v Bratislave sa v septembri 2019 uskutočnil workshop zameraný na výmenu skúseností medzi poskytovateľmi (pracovníci SHMÚ z odboru Hydrologické predpovede a výstrahy) a užívateľmi hydrologických predpovedí a výstrah (pracovníci rezortu Ministerstva vnútra SR a zástupcovia okresných úradov – odborov starostlivosti o životné prostredie, odborov krízového riadenia, zástupcovia okresných a krajských hasičských a záchranných zborov, zástupcovia univerzít a Slovenského vodohospodárskeho podniku, š. p.). Počas pracovného workshopu užívatelia informovali o svojich skúsenostiach pri práci s produktami SHMÚ a vyjadrili návrhy na zlepšenie spolupráce.

Dôležitým výstupom projektu je školiaci nástroj (e-learning tool). Hlavným cieľom e-learningového kurzu je poskytnúť potrebné informácie potenciálnym budúcim profesionálnym používateľom výmeny údajov, ako aj podporiť lepšie pochopenie predpovedí povodní a ľadov všeobecne a popisuje hlavné výsledky dosiahnuté projektom DAREFFORT. Všetky tieto tematické okruhy sú spracované do 10 modulov. Nástroj bude dostupný na webovej stránke: <https://dflearn.environ.hu>.

Na konci projektu sa uskutočnila záverečná konferencia – 2. DAFF (Danube forecasting forum) t.j. medzinárodné stretnutie profesionálov z oblasti predpovedných systémov, užívateľov týchto produktov ako aj všetkých zástupcov projektových partnerov.

Vývoj nových technologických nástrojov na výmenu údajov, medzinárodná platforma na vzájomnú výmenu skúseností a interakcia s koncovými užívateľmi sú hlavné výstupy projektu, ktoré by mali

priniest' kvalitnejšie predpovedanie povodní a ľadových úkazov v celom dunajskom regióne a splniť jeho ciele.

Zdroje

<http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/dareffort>

Téma 3

Ekohydrologie, společenské potřeby a vzdělávání v hydrologii a vodním hospodářství



Zavodňování lužního lesa při soutoku Moravy a Dyje

Jana BÁRTOVÁ, Karel KNĚŽÍNEK, Hana HORNOVÁ

Český hydrometeorologický ústav, Kroftova 43, Brno-Žabovřesky, Česká republika, email: jana.matulova@chmi.cz, karel.knezinek@chmi.cz, hana.hornova@chmi.cz

Abstract

Lužní les je ekosystémem, který ke své existenci potřebuje vysokou hladinu podzemní vody a zaplavení i několik týdnů za rok. Při nedostatečném zaplavení může docházet k usychání rostlin, dřevin a vymírání druhů, které jsou vázány na vlhkost lužního lesa. Jeden z nejvýznamnějších luhů v České republice roste na jižní Moravě, v nejbližším okolí měst Břeclav a Lanžhot, v oblasti soutoku řek Dyje, Moravy a Kyjovky, kde se nachází obora Soutok. Článek se snaží ukázat vliv umělého zavodnění luhu při mimořádné manipulaci s průtokem v řece Dyji. Umělé zavlažování je nepravidelně a za určitých podmínek aplikováno posledních 30 let. Jaký byl vliv umělého zaplavení obory Soutok v roce 2019 a 2020? Jak se projevilo zaplavení luhu povodňovými stavy v letních a podzimních měsících v roce 2020? V chodu stavů hladiny podzemní vody se projevuje vliv vzdálenosti povrchového zdroje vody, a to jak v hodinových hodnotách, tak i měsíčních průměrných hodnotách. Z heatmap vybraných mělkých vrtů je patrný vliv výstavby Novomlýnských nádrží, suché a povodňové epizody, které ovlivňují stav hladiny podzemní vody.

Úvod

Lužní les, ke kterému se váže tento článek, se nachází na jižní Moravě u soutoku Moravy, Dyje a Kyjovky, jižně od obcí Břeclav a Lanžhot a je spojován s oborou Soutok. V zájmu místních obyvatel a příslušných organizací, spolků i odborníků je ochrana lužních lesů, ta je však složitá kvůli množství majitelů lesa. Povodňové události, na kterých je existence lužního lesa závislá, zde nejsou zdaleka tolik vítané kvůli hospodářskému využití oblasti. Organismy, které v lužním lese žijí, potřebují pravidelné zaplavení po dobu i několika týdnů ročně. Tento les byl v minulosti zavlažován při povodňových stavech ze tří řek: Moravy, Dyje a Kyjovky. Díky tomu, že nedocházelo k těmto extrémním epizodám na všech řekách zároveň a se stejnou intenzitou, se mohla společenstva organismů lišit. Tato přirozená variabilita klimatických a hydrologických podmínek (sucho, povodně) pomáhala ke vzniku či zachování rozmanitosti lužních společenstev. Pro tuto rozmanitost nejsou důležité pouze extrémní jevy jako povodně a sucho, ale také variabilita vodních stavů ve zmíněných řekách. Z hlediska sezónnosti jsou pro lužní les stěžejní především jarní povodně (Veselý, 2020).

Historické zdroje dokládají uvědomělý přístup Lichtenštejnů v 19. století, kteří se sice zasadili o projekci meliorací tohoto území kvůli neatraktivitě podmáčených oblastí, zároveň však nepodporovali regulaci velkých řek Moravy a Dyje. V této době tyto meliorace fungovaly jako kanály, které při povodních odváděly vodu do sušších částí. Díky úpravám koryt Dyje, Moravy a dalších toků v zájmovém území, výstavbou Novomlýnských nádrží a řízenou manipulací na vodohospodářských objektech dochází k méně častému výskytu povodňových situací. Zahloubení a napřímení koryt a výstavba hrází kolem některých toků zamezila častějšímu vylévání vody do okolí, snížila hladinu podzemní vody, a proto les není tak často zaplaven jako tomu bylo dříve. Začala tak doba, ve které člověk rozhoduje o tom, kdy, a kolik vody se do lesa dostane (Veselý, 2020). Za běžných průtoků ($Q_a = 25 \text{ m}^3/\text{s}$) voda do lužního lesa v oboře Soutok přivodními koryty prakticky nepřitéká, ale nedostane se tam ani při vyšších průtocích v případech, kdy je nátoku zamezeno manipulačním objektem.

V 90. letech 20. století byla snaha zaplavení lužního lesa obnovovat, a to příležitostným vypouštěním vody z Novomlýnské nádrže v takovém objemu, který by měl simulovat potřebné záplavy. V dalším období docházelo k zavlažování této oblasti pomocí umělých kanálů, které původně měly sloužit

k jejímu odvodnění. Tyto snahy se však vzhledem k postupnému zanášení těchto zavlažovacích kanálů a prohlubujícímu se suchu na jižní Moravě, začaly ukazovat jako nedostatečné. Proto se v posledních letech opět přistoupilo k umělému povodňování pomocí řízeného navýšení průtoku v Dyji. K tomuto umělému zavlažování luhu dochází na základě žádosti organizace Lesy ČR, která žádá o tuto mimořádnou manipulaci podnik Povodí Moravy, většinou v období s nedostatkem srážek ať už dešťových či sněhových. Toto umělé zavlažování je však závislé na více faktorech jako je např. množství naakumulované vody v Novomlýnských nádržích, hnízdění ptáků a další (Veselý, 2020).

Umělé povodňování z řeky Dyje si Lesy ČR vyžádaly v roce 2017, 2019 a 2020. V roce 2018 to nebylo možné kvůli nedostatku vody ve vodních nádržích (Povodí Moravy, 2020; Veselý, 2020). Naopak v roce 2021 umělé povodňování neproběhlo, protože lužní les měl dostatek vláhy díky povodňovým událostem z roku 2020.

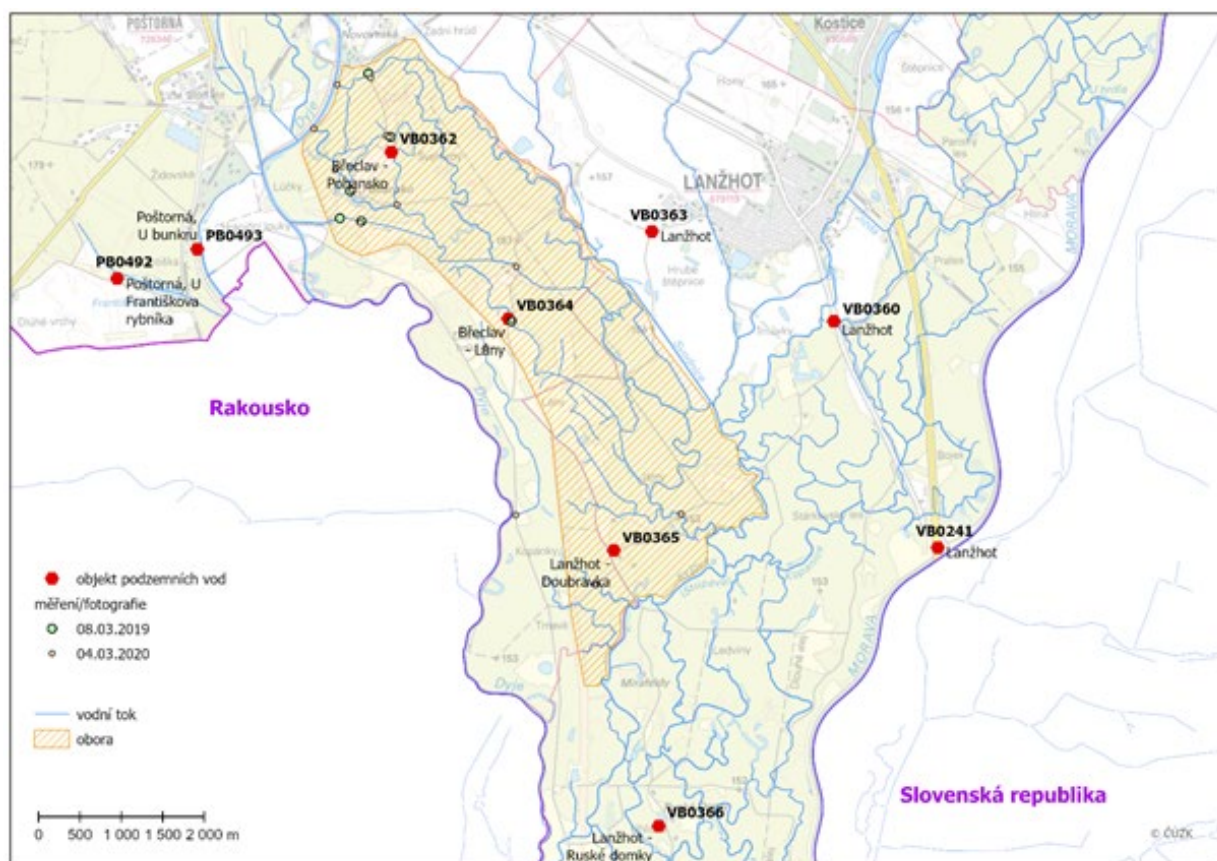
Metodika

V zájmové lokalitě byla použita data z vodoměrné stanice Lадná, která monitoruje vodní stav a průtok v řece Dyji. Tato data nám ukazují změny vodního stavu v řece, která tvoří hranici lužního lesa. Zobrazení hydrologických dat bylo provedeno pomocí hydrogramu, kde jsou vykresleny hodnoty průtoků za časové období od začátku roku 2019 do konce dubna roku 2021. Pro větší detail průběhu dat byly použity hodinové záznamy. Jelikož je prováděno umělé zavlažování na jaře, jeden z grafů zobrazuje průměrné hodinové průtoky v první polovině roků 2019, 2020 a 2021. Jak již bylo zmíněno, umělé zavlažování lužního lesa je spojeno s mimořádnou manipulací na VD Nové Mlýny, která je v hydrogramu také označena. V roce 2019 došlo k navýšení průtoků ve dnech 5.–10. března s průměrným průtokem $64 \text{ m}^3/\text{s}$, v následujícím roce byly průtoky navýšeny 3.–5. března s průměrným průtokem $88 \text{ m}^3/\text{s}$. Za významně zvýšené můžeme považovat průtoky ve vodoměrné stanici Lадná od hodnot 1-leté vody $Q_1 = 160 \text{ m}^3/\text{s}$. Pro porovnání měsíčních průměrných průtoků v téměř celém období pozorování 1967–2021 bylo využito zobrazení dat ve formě tzv. heatmap. Data z vodoměrné stanice Lадná za měsíce leden až duben roku 2021 nejsou autorizována.

Důležitou součástí hydrologie a v lužních lesích obzvláště, je stav podzemních vod. V této oblasti se nachází čtyři mělké vrty VB0362 Pohansko, VB0364 Lány, VB0365 Doubravka a VB0366 Ruské domky viz Obr. 1. Podobně jako u vodoměrné stanice, byla pro hodnocení stavu hladiny v mělkých vrtech použita data s hodinovým krokem záznamu, kde jsou rozdíly stavů zřetelné. Pro zpracování byla vybrána data od ledna roku 2019 po konec dubna roku 2021. Vrt VB0364 Lány v období umělého zavlažování v roce 2019 nebyl funkční, proto nemáme u tohoto vrtu data od počátku roku 2019. Období, kdy tento vrt nebyl měřen, je patrné z heatmap, které byly sestaveny pro všechny vrty z měsíčních průměrných dat pro období od roku 1967 do konce dubna 2021. Dalším výstupem jsou krabicové grafy, které byly sestaveny z průměrných měsíčních stavů hladiny podzemní vody z let 1981–2020. Tento rozsah zahrnuje jak referenční období 1981–2010, tak i poslední desetiletí, které zohledňuje suchou epizodu 2015–2019. Krabicové grafy obsahují medián, první a třetí kvartil, 1,5 IQR spodního a horního kvartilu a odlehlé hodnoty v daném měsíci. Do grafu jsou také vyneseny tři linie průběhu průměrných měsíčních hodnot v letech 2018, 2019 a 2020.

Pro dokreslení srážkových úhrnů v dané oblasti byla využita data z meteorologických stanic Lanžhot a Lednice. Ze srážkoměrné manuální stanice Lanžhot a klimatologické automatické stanice Lednice byly využity měsíční průměrné úhrny srážek za období 1967 až duben 2021. Podobně jako u hydrologických dat bylo pro vizualizaci dat využito heatmap.

K vytváření heatmap a krabicových grafů byl využit software RStudio a programovací jazyk R.



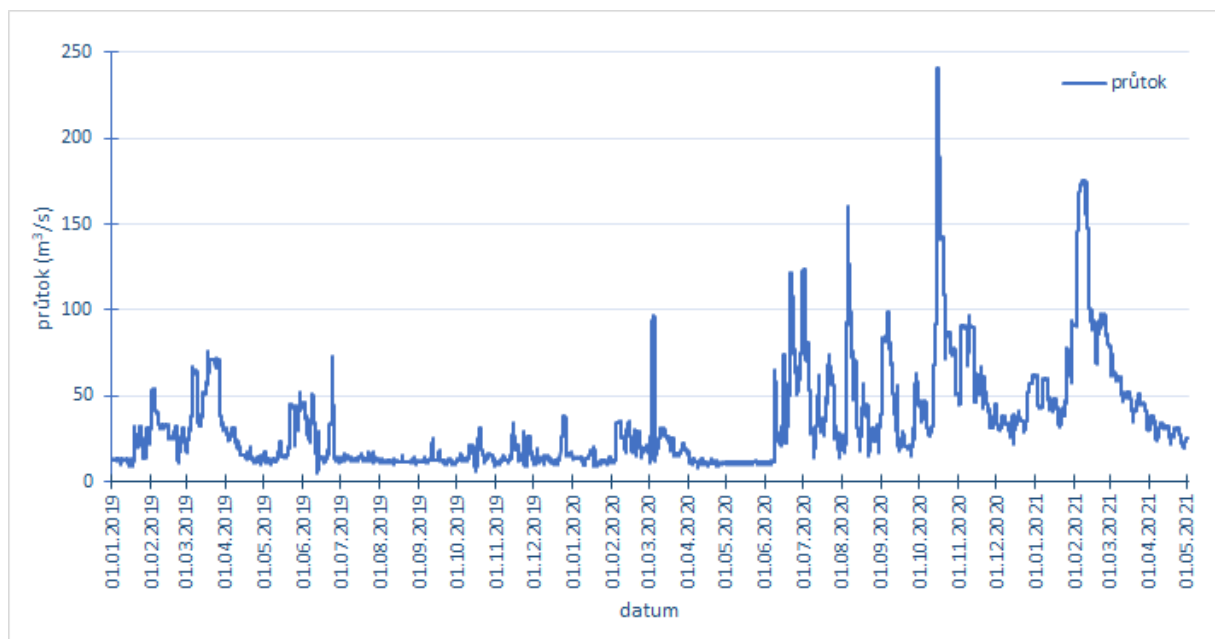
Obr. 1 Poloha objektů podzemních vod v oblasti soutoku Moravy (východní hraniční tok) a Dyje (západní hraniční tok), plocha obory Soutok je pouze orientační a zahrnuje spíše oblast, ve které může dojít k umělému zaplavení.

Na závěr vyhodnocení jsou uvedeny výsledky z terénních šetření, která proběhla v letech 2019, 2020 a 2021. Fotografie dokumentující rozdíly ve stavech povrchové vody byly pořízeny v období povodňování v roce 2019, 2020 a v také roce 2021, kdy nebyl manipulační objekt otevřen pro vypouštění většího objemu vody do obory Soutok, ale celá oblast měla dostatek vláhy z předchozího vlhkého období.

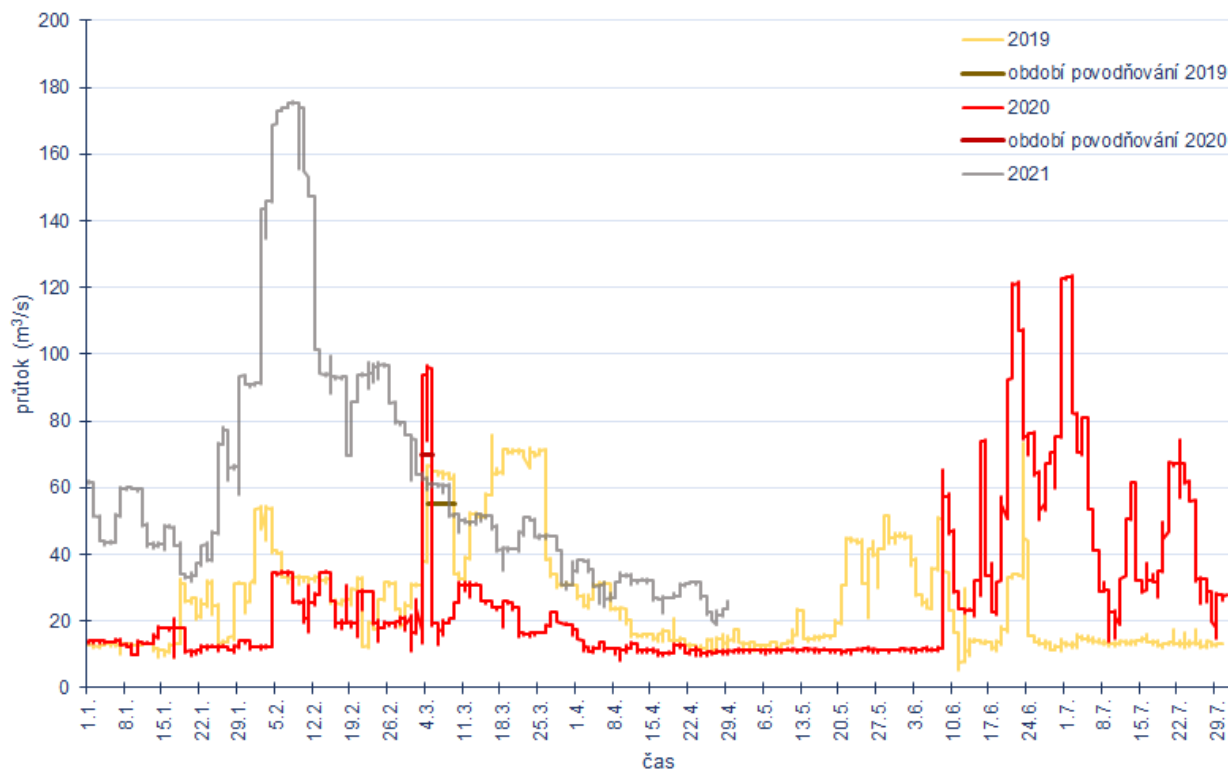
Výsledky

Zhodnocení stavu povrchových vod

Hydrogram na Obr. 2. zobrazuje průběh průtoků za časové období 2019 do konce dubna roku 2021. Zobrazeny jsou průtoky (m^3/s) v hodinových záznamech, kde je patrný detailnější průběh. V následujícím hydrogramu (viz Obr. 3.) je zobrazena necelá první polovina roků 2019–2021 pro porovnání dat ve stejném období. Doba umělého zavlažování lužního lesa je spojena s mimořádnými manipulacemi na VD Nové Mlýny, které jsou zvýrazněny na Obr. 3. V letech 2019 a 2020 se pohybují zimní průtoky kolem hodnoty $15 \text{ m}^3/\text{s}$. V těchto letech došlo k mírnému zvýšení průtoků při jarním tání a následně při umělém povodňování v březnu. Další období, kdy se průtok zvýšil, nastalo v roce 2020 na konci jara a začátkem léta kvůli výraznějším srážkovým epizodám. Díky povodňovým událostem v létě a hlavně na podzim 2020 a tání sněhové pokrývky byl počátek roku 2021 vodnější. Množství povrchové vody podpořilo zavlažení lužního lesa natolik, že nebylo nutné v březnu v roce 2021 využít mimořádné manipulace.



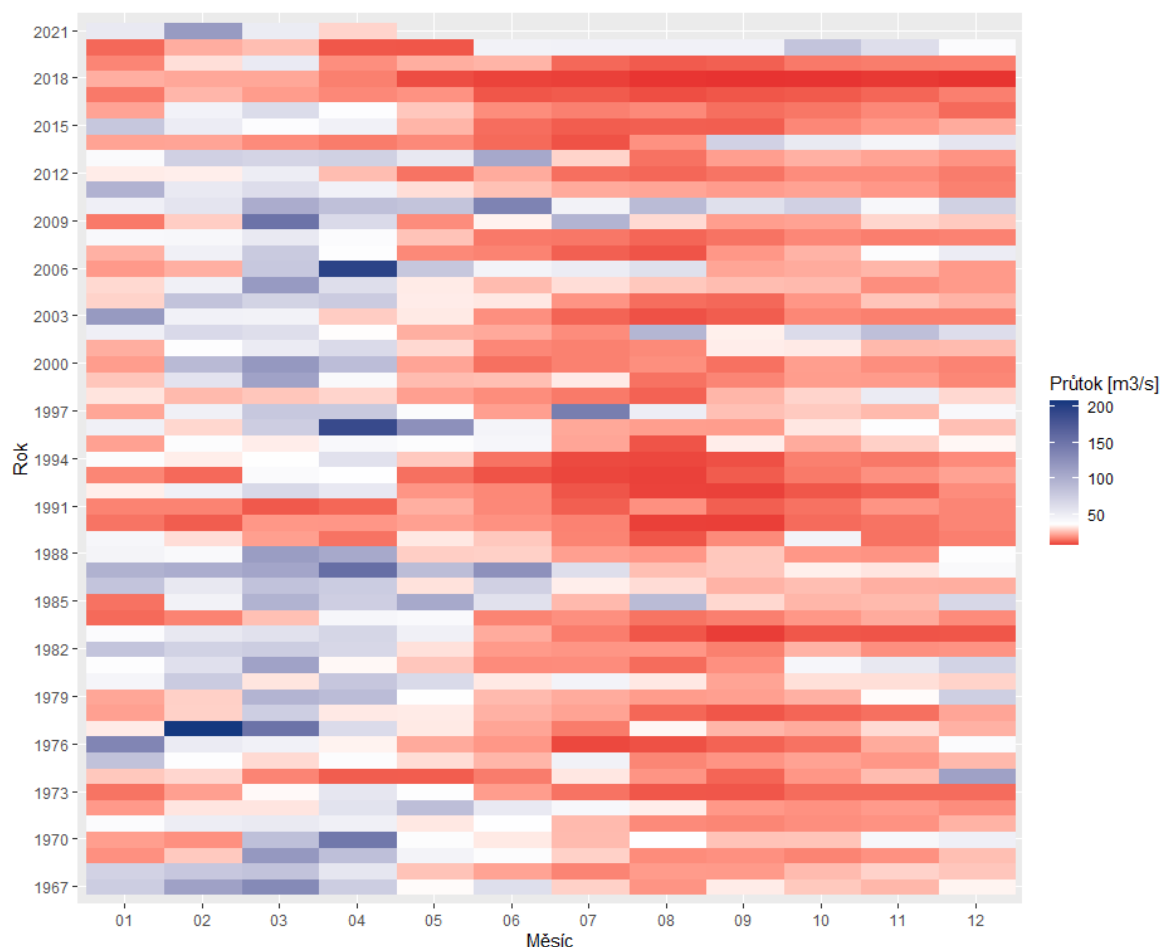
Obr. 2 Průměrné hodinové průtoky ($Q = m^3/s$) ve vodoměrné stanici Ladná v období 1. 1. 2019–30. 4. 2021



Obr. 3 Průměrné hodinové průtoky ($Q = m^3/s$) ve vodoměrné stanici Ladná v období 1. 1.–31. 5. 2019 a 1. 1.–31. 5. 2020 a 1. 1.–30. 4. 2021 vč. umělého zavodnění (povodňování) v období 5.–10. 3. 2019 a 3.–5. 3. 2020

Obrázek 3. názorně ukazuje rozdíl ve vodnosti v první polovině let 2019 a 2020, kterým předcházela suchá epizoda a rokem 2021, kterému předcházelo období bohatší na srážky. Dále jsou zde také vidět umělá zvýšení průtoku, která se v suchých letech snaží nahradit přirozené povodně.

Následující Obr. 4. přibližuje hydrologickou situaci (průměrné měsíční průtoky) od roku 1967 po současnost. Na první pohled jsou patrné vodnější měsíce v zimních a jarních měsících oproti sušší letním měsícům. Z grafu můžeme také vyčíst sušší období např. 1973–1974, 1989–1993(4), 2014–2019(20).



Obr. 4 Heatmap průměrných měsíčních průtoků (m^3/s) ve vodoměrné stanici Břeclav-železniční most (1967–1987) a Ladná v období 1988–30. 4. 2021

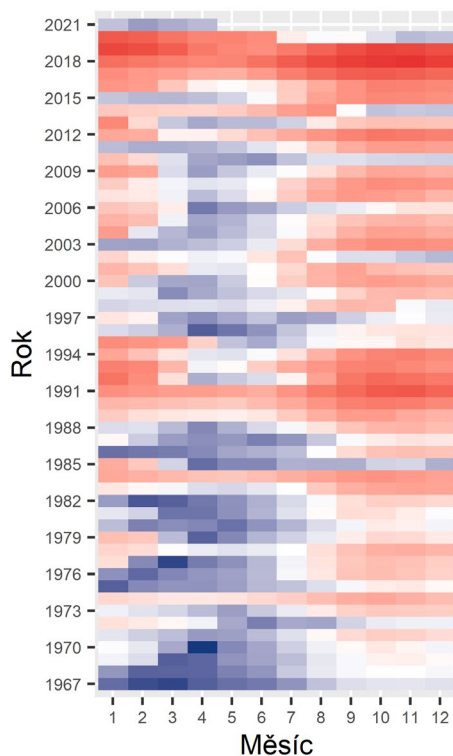
Zhodnocení stavu hladin podzemních vod

Na první pohled je v jarních měsících zřejmý pozvolný vzrůst hladin podzemní vody, který je přirozený v rámci roční periody jejího kolísání. Maxima této pravidelné roční periody jsou na jaře, minima pak na podzim. Na jaře je tento vzrůst způsoben dotací vody ze zimních srážek a postupným rozpouštěním zimních zásob sněhu z krystalinika Vysočiny. Doba dotoku pak odpovídá zpoždění podzemní vody za vodou povrchovou v řekách, kde maxima bývají zaznamenána na konci března a začátku dubna.

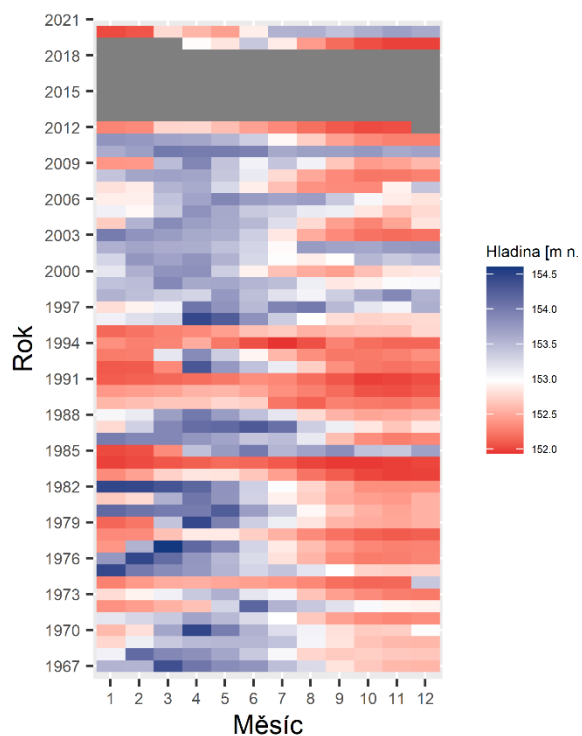
Na následujícím Obr. 5. a), b), c) a d) jsou zobrazeny průměrné měsíční stavy hladiny podzemní vody (m n. m.) od roku 1967 do dubna 2021. Barevná škála je rozdělena tak, aby podprůměrné stavy byly vyznačeny v odstínech červené, průměrná hodnota za celé období má bílou barvu a nadprůměrné stavy jsou v odstínech modré. Ve vrtu VB0362 Pohansko (a) se vyskytovaly nadprůměrné stavy v zimních a jarních měsících především do roku 1988, od té doby narůstá počet měsíců s podprůměrným stavem hladiny podzemních vod a můžeme vypořádat výraznější suchá období, např. 1989–1992, 2. pol. roku 2015 do pol. roku 2020. Z novodobějších hydrologických událostí ovlivnily stav podzemní vody povodně v roce 1997, 2002, 2010 a 2020. Nejnížší průměrné měsíční stavy se v tomto vrtu pohybují od 152,66 m n. m., nejvyšší průměrné hodnoty dosahují 156,08 m n. m. Povrch terénu u tohoto vrtu se nachází v nadmořské výšce 156,54 m.

Vyhodnocení průměrných měsíčních stavů hladiny podzemní vody mělkého vrtu VB0364 Lány (b) ukazuje nadprůměrné stavy hladiny většinou v první polovině roků, následně stav klesá do průměrných či podprůměrných hodnot. Nejnížší průměrné měsíční stavy se v tomto vrtu pohybují od 151,93 m n. m., nejvyšší průměrné měsíční hodnoty dosahují 154,60 m n. m. Nadmořská výška terénu má hodnotu 154,75 m n. m. Suchá období můžeme vidět v letech 1983–1984 (5), 1989–1991 (2), 1994–1995 a 2012.

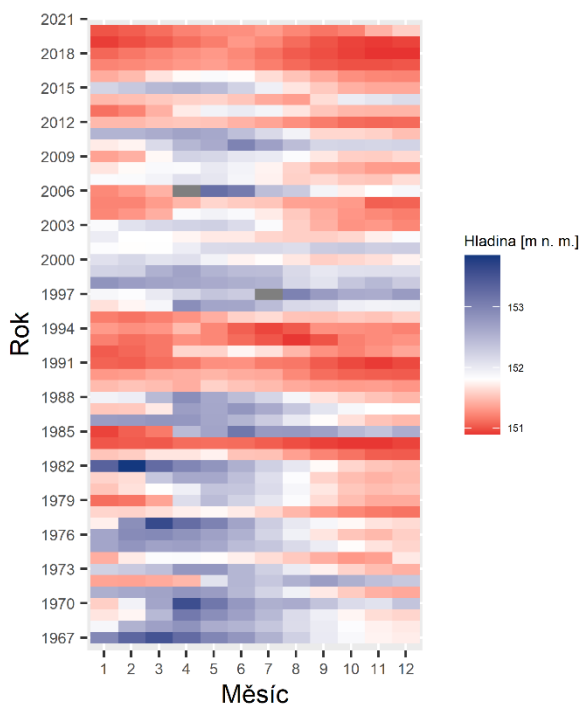
Povodně v roce 1997, 2002, 2010 a 2020 viditelně ovlivnily stav podzemní vody v tomto vrtu podobně jako u předchozího vrtu.



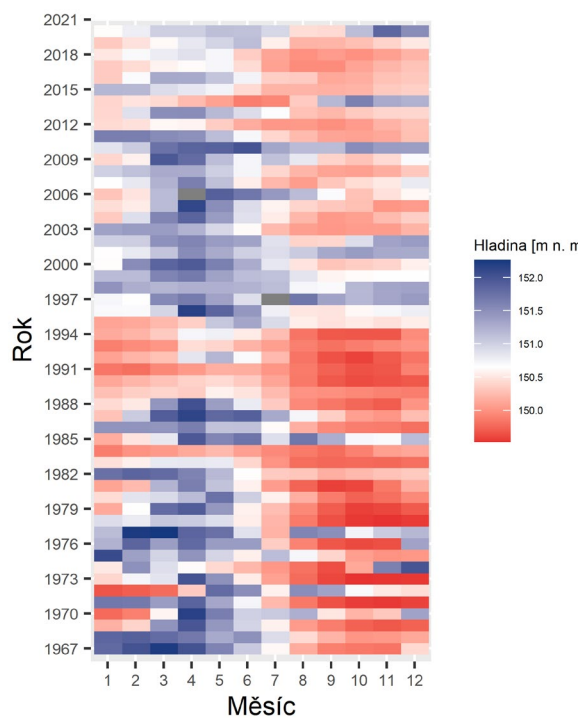
a) VB0362 Pohansko



b) VB0364 Lány (šedě zobrazeno období, kdy ve vrtu nedocházelo k měření hladiny podzemní vody)



c) VB0365 Doubravka



d) VB0366 Ruské domky

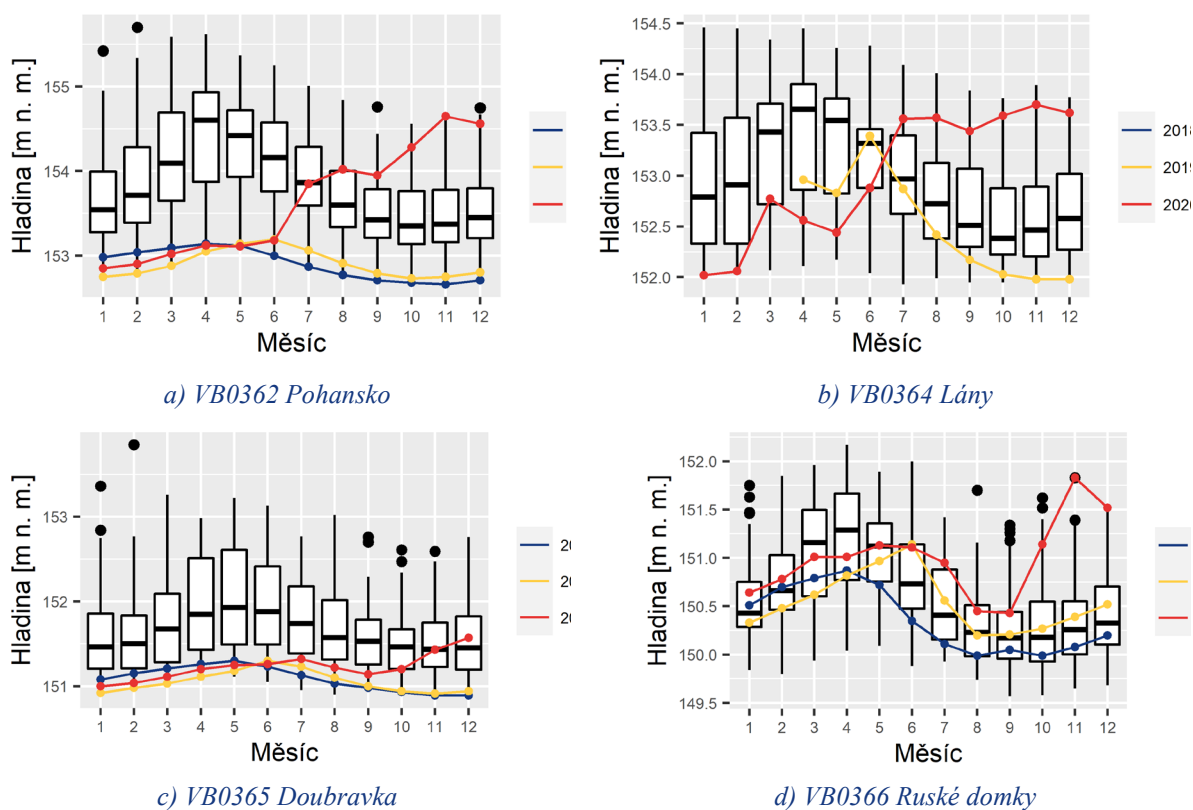
Obr. 5 Heatmap průměrných měsíčních stavů hladiny podzemní vody mělkého vrtu a) VB0362 Pohansko, b) VB0364 Lány, c) VB0365 Doubravka, d) VB0366 Ruské domky od roku 1967 do dubna roku 2021

Vrt VB0365 Doubravka (c) vykazuje dlouhodobější trvání podprůměrných hodnot stavu podzemní vody, především v letech 1989–1995 a 2016–2020. Povodeň v roce 1997 a 2010 pomohla zvýšit stav hladiny i v tomto vrtu. Nejnižší průměrné měsíční stavy se pohybují od 150,89 m n. m., nejvyšší průměrné měsíční hodnoty pak dosahují 153,85 m n. m. Terén je zaměřena na hodnotu 153,81 m n. m.

Poslední vrt VB0366 Ruské domky (d) je ovlivňován přítékající vodou z Kyjovky a Moravy, spolu s vedlejšími meandry a přilehlým rybníčkem. Průměrné měsíční stavy jsou proto odlišné oproti výše popisovaným vrtům. Oproti nim od roku 1995 nevykazuje tak častý pokles stavu k velmi nízkým hodnotám a drží se blíže kolem průměrné hodnoty. Nejnižší průměrné měsíční stavy se v tomto vrtu pohybují od 149,52 m n. m., nejvyšší průměrné hodnoty dosahují 152,26 m. Terén je v nadmořské výšce 152,42 m n. m.

Ve všech zmíněných vrtech můžeme pozorovat výraznější periodu s nízkým stavem podzemní vody po roce 1988, kdy se sešel vliv napouštění VD Nové Mlýny se suššími klimatickými podmínkami v tomto období.

Následující grafy se snaží ukázat průměrné měsíční stavy podzemní vody v posledních třech letech ve srovnání s delším obdobím.

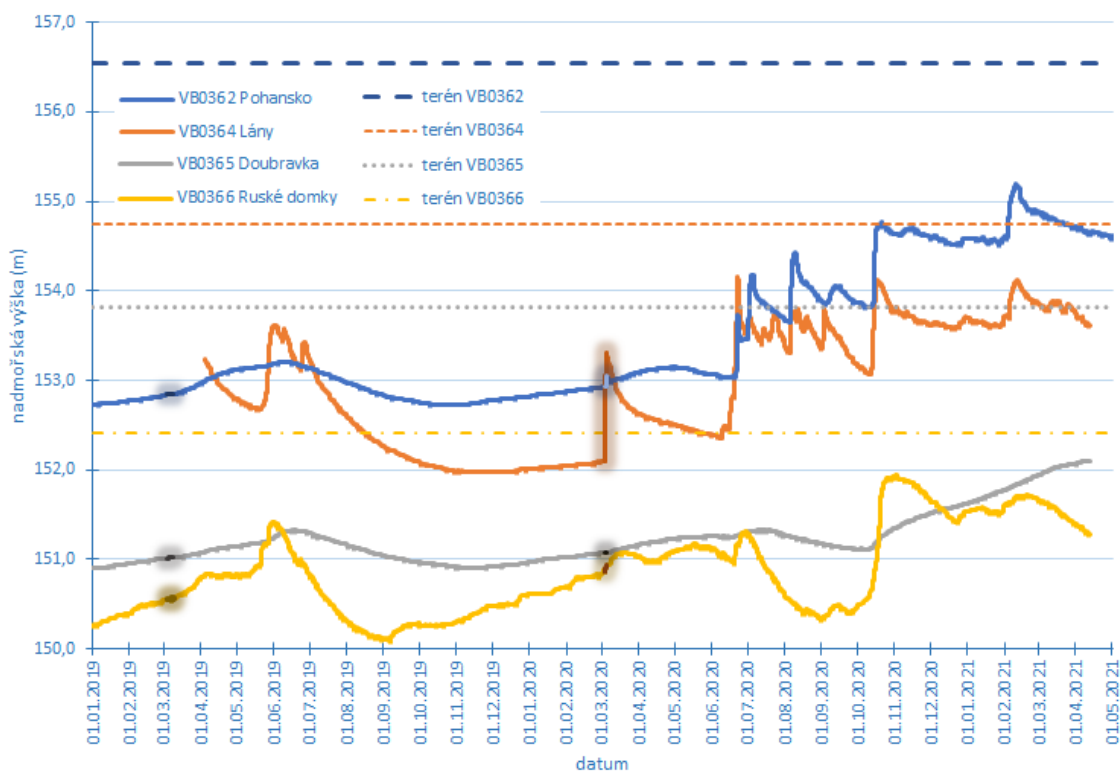


Obr. 6 Krabicové grafy pro mělké vrty a) VB0362 Pohansko, b) VB0364 Lány, c) VB0365 Doubravka, d) VB0366 Ruské domky zobrazující stavy podzemní vody od roku 1981 do roku 2020 vč. průběhu průměrných měsíčních stavů třech posledních roků: 2018, 2019 a 2020

Krabicové grafy viz Obr. 6. zobrazují medián a rozsah měsíčních průměrných stavů hladiny podzemní vody za období 1981–2020. Barevné linie zobrazují průměrné měsíční stavy hl. podzemní vody za poslední tři roky. Hladina podzemní vody ve vrtu VB0362 Pohansko se vzhledem k období 1981–2020 pohybovala v minimálních průměrných hodnotách v letech 2018, 2019 a počátkem červencových dešťů loňského roku se začal stav pohybovat naopak v nadprůměrných hodnotách. Podobný průběh je možné vidět u vrtu VB0365 Doubravka, kde však nedošlo v roce 2020 k tak významnému vzestupu hladiny podzemní vody. Je však patrná změna měsíce, ve kterém bylo dosaženo průměrného měsíčního maxima za daný rok, kdy došlo k posunu z května 2019, přes červen v roce 2019 až po červenec v roce 2020.

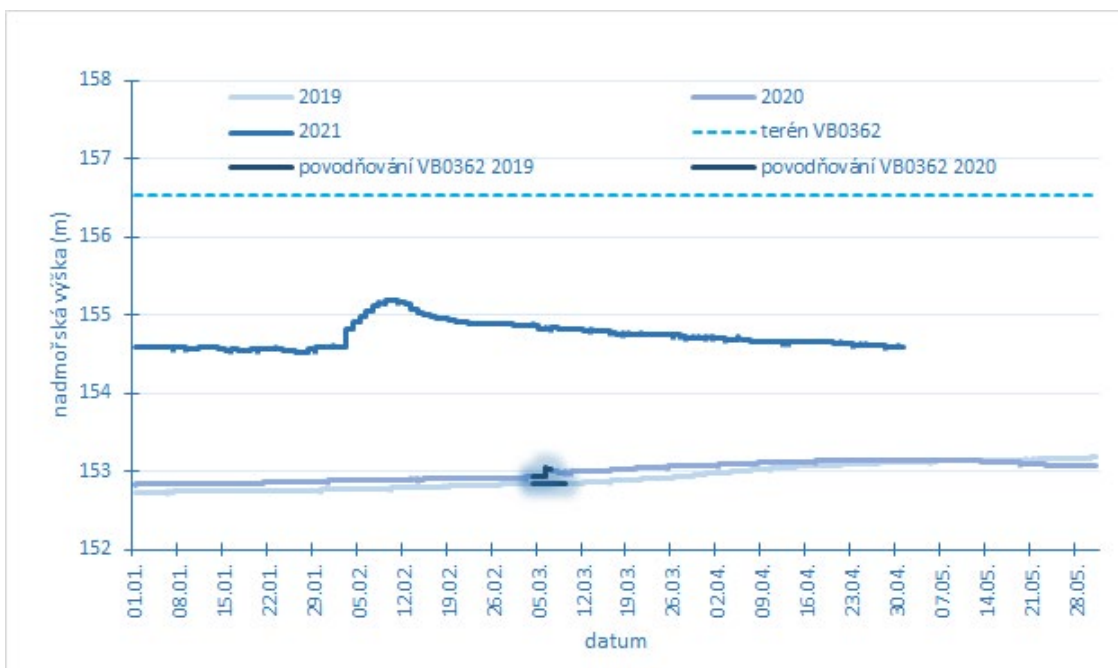
Mělký vrt VB0364 Lány má mnohem dynamičtější průběh hladiny podzemní vody. Příkladem může být navýšení stavu hladiny podzemní vody v březnu roku 2020. Pokud se zaměříme na roční průběh, všechny vrty kopírují dlouhodobý průměrný chod až na druhou polovinu roku 2020 a také vrt Lány, který reaguje na změny rychleji.

Následující popis dokresluje Obr. 7., který zobrazuje změny stavů hladiny podzemní vody od roku 2019 do konce dubna 2021. Všechny vrty vykazují zvýšení stavů hladiny podzemní vody v období vyšších srážkových úhrnů a výskytu povodňových událostí v druhé polovině roku 2020. Stav podzemní vody vychází ze suchého období, které přerušil rok 2020.

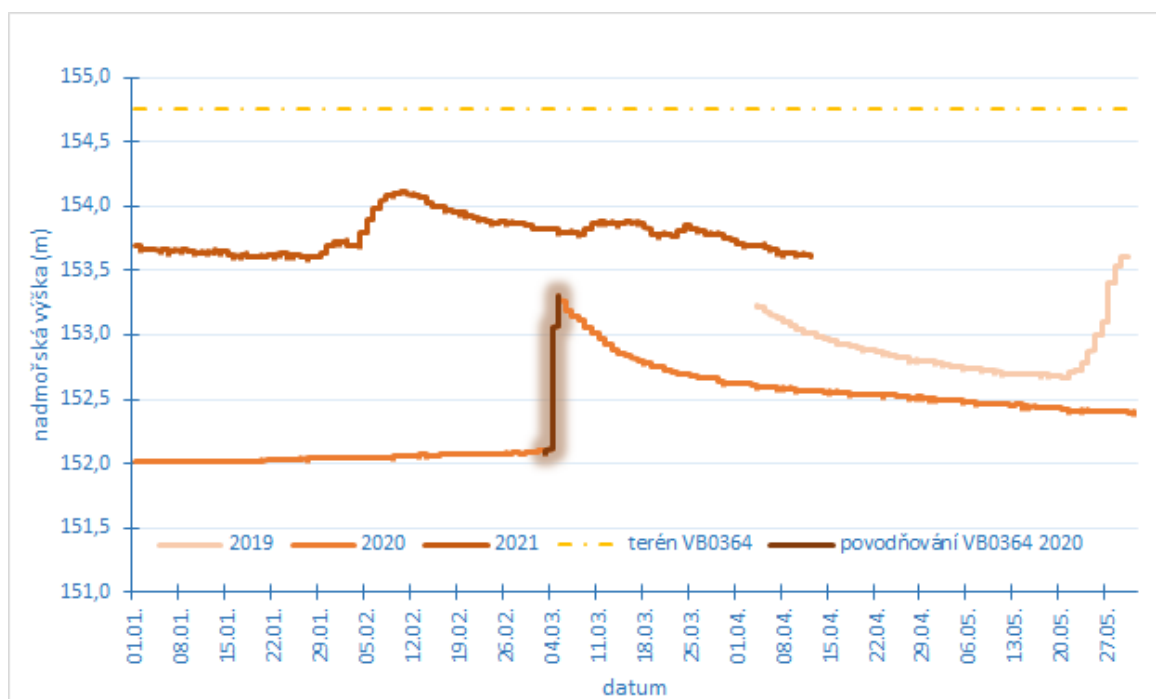


Obr. 7 Stav podzemních vod mělkých vrtů (VB0362 Pohansko, VB0364 Lány, VB0365 Doubravka, VB0366 Ruské domky) v oblasti soutoku Moravy a Dyje 1. 1. 2019–2. 5. 2021 vč. umělého zavodnění (povodňování) v období 5.–10. 3. 2019 a 3.–5. 3. 2020 (ČHMÚ)

S ohledem na období zavlažování lesa je zobrazen stav hladiny podzemní vody v první polovině roku, aby byl zřetelný vliv umělého zavlažování v každém mělkém vrtu zvlášť. Vrt VB0362 Pohansko leží nejdále od zdroje povrchové vody, vliv umělého zavlažování je minimální, jak ukazuje Obr. 8. Na obrázku je zobrazen pomyslný povrch, tudíž hladina podzemní vody byla v letech 2019 a 2020 více jak 3,5 m pod povrchem. V únoru 2021 se hladina podzemní vody zvedla na hodnotu 155,19 m n. m., kdy dosáhla nejvyššího stavu v toto období.

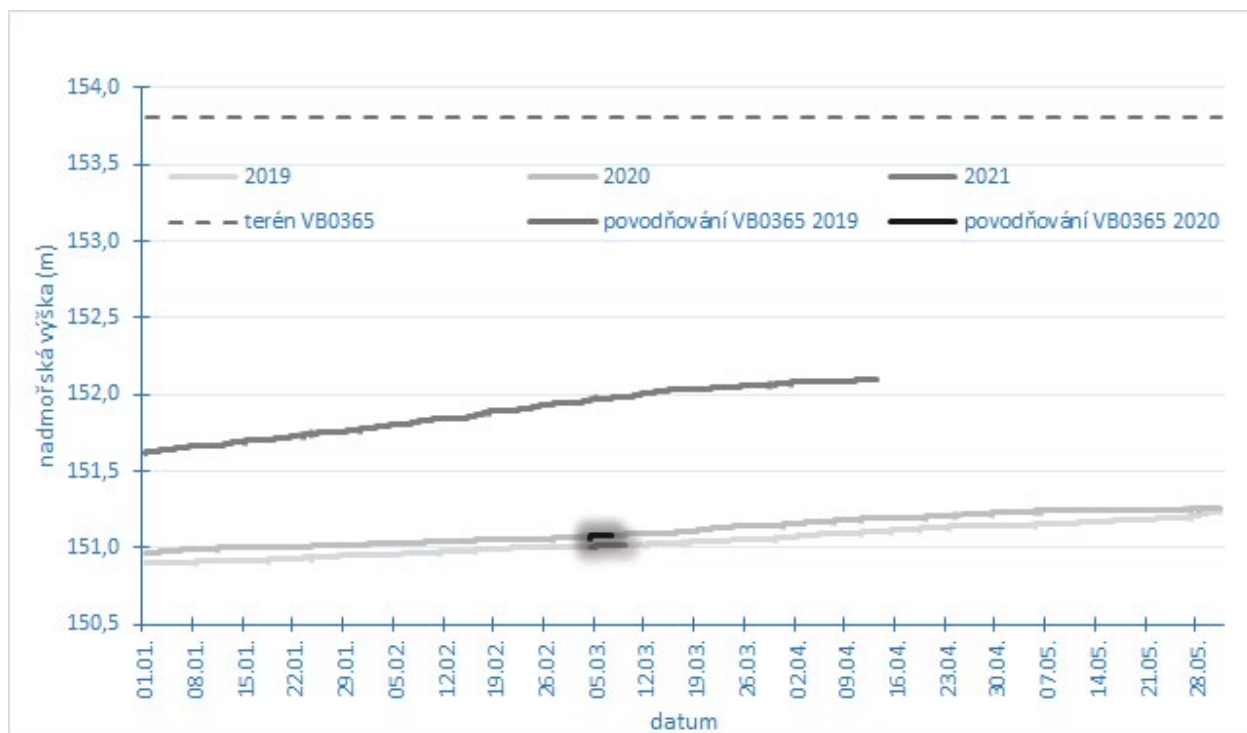


Obr. 8 Průběh hladiny podzemní vody v mělkém vrtu VB0362 Pohansko 1. 1.–31. 5. 2019, 2020, 1. 1.–30.4. 2021 s vyznačením nadmořské výšky povrchu vč. umělého zavodnění (povodňování) v období 4.–9. 3. 2019 a 3.–5. 3. 2020 (ČHMÚ)

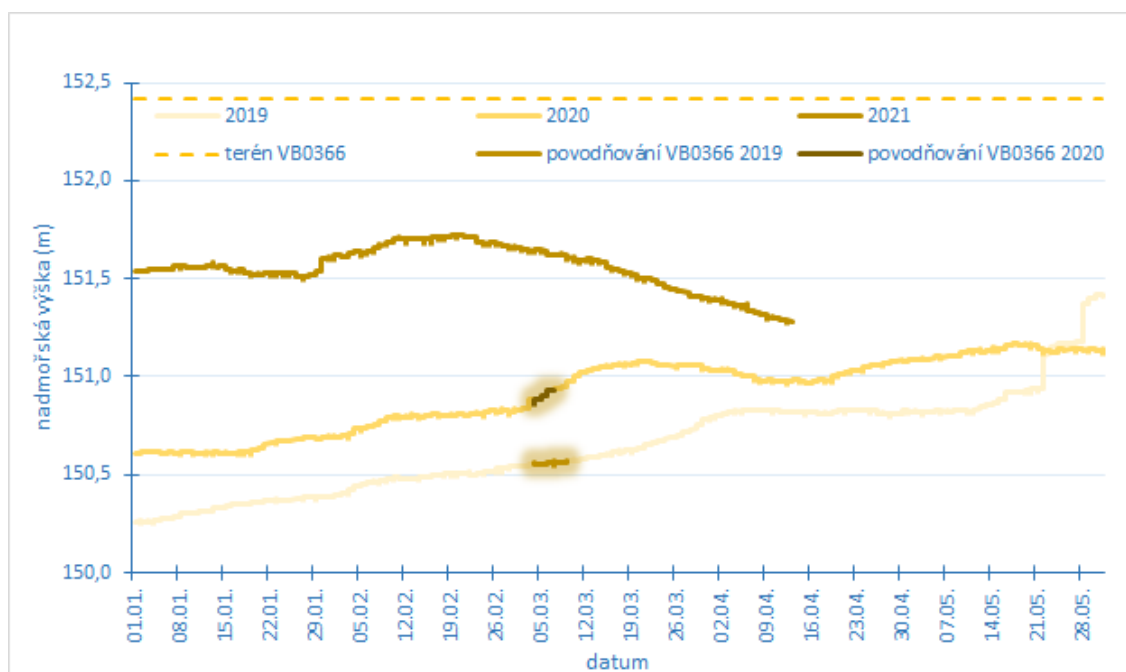


Obr. 9 Průběh hladiny podzemní vody v mělkém vrtu VB0364 Lány 1. 1.–31. 5. 2019, 2020, 1. 1.–30.4. 2021 s vyznačením nadmořské výšky povrchu vč. umělého zavodnění (povodňování) v období 3.–5. 3. 2020 (ČHMÚ)

Obrázek 9. zobrazuje průběh hladiny podzemní vody ve vrtu VB0364 Lány. Hladina podzemní vody byla v první části roku 2020 nižší než v roce 2019. V období povodňování v roce 2020 došlo k nárůstu stavu o více než 1 m, pak postupně tento stav klesal. Podobně jako u vrtu Pohansko je v roce 2021 v únorových dnech vidět nárůst hladiny na 154,12 m a následný postupný pokles. Vrt VB0365 Doubravka má odlišný chod oproti prvním dvěma vrtům viz Obr. 10. Vliv umělého zavlažování není výrazný. Tuto skutečnost nejspíše ovlivňuje i samotná poloha vrtu, v jeho okolí není žádný zdroj povrchové vody (přívodní kanál, mrtvé rameno řeky,...)



Obr. 10 Průběh hladiny podzemní vody v mělkém vrtu VB0365 Doubravka 1. 1.–31. 5. 2019, 2020, 1. 1.–30. 4. 2021 s vyznačením nadmořské výšky povrchu vč. umělého zavodnění (povodňování) v období 4.–9. 3. 2019 a 3.–5. 3. 2020 (ČHMÚ)



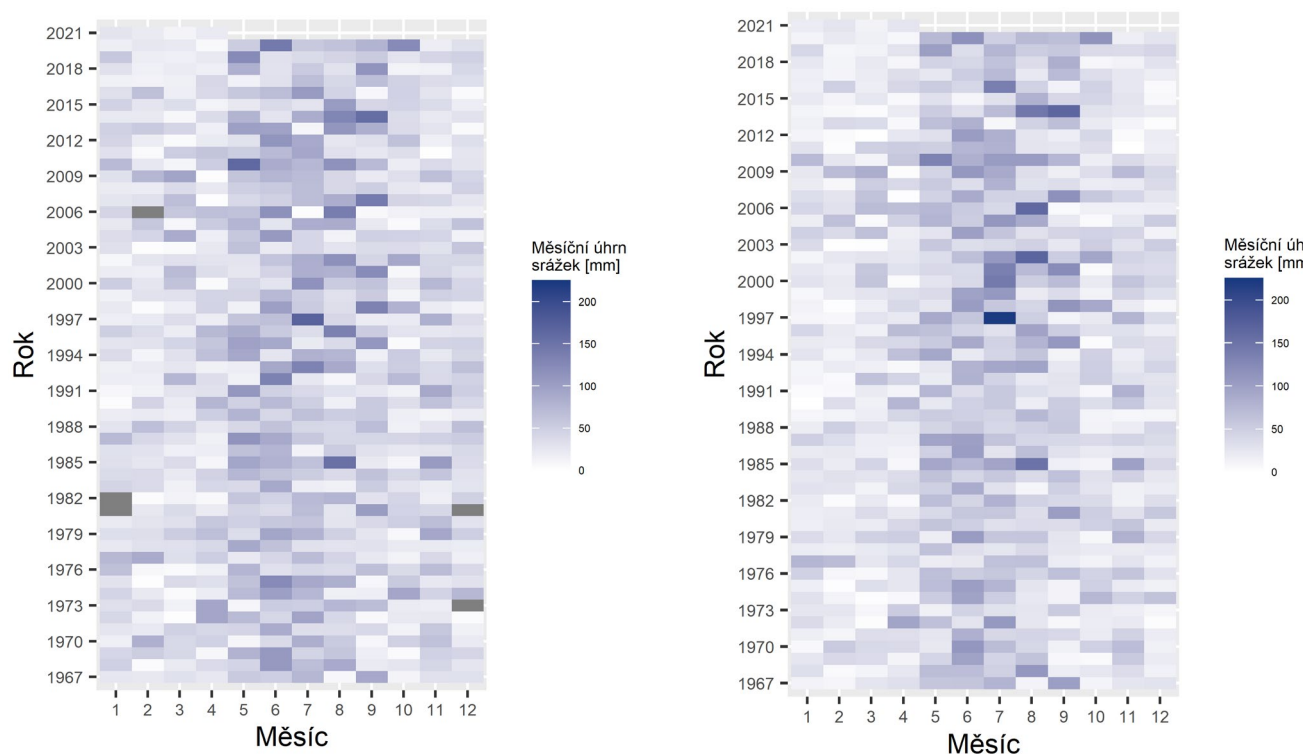
Obr. 11 Průběh hladiny podzemní vody v mělkém vrtu VB0366 Ruské domky 1. 1.–31. 5. 2019, 2020, 1. 1.–30. 4. 2021 s vyznačením nadmořské výšky povrchu vč. umělého zavodnění (povodňování) v období 4.–9. 3. 2019 a 3.–5. 3. 2020 (ČHMÚ)

Ze zkoumaných vrtů je VB0366 Ruské domky (viz Obr. 11) v největší blízkosti soutoku Moravy, Dyje a Kyjovky. Vrt nevykazuje skokové změny nárůstu či poklesu podzemní vody následně po umělém zavodnění, jeho průběh se však od ostatních třech zkoumaných vrtů liší.

Vyhodnocení srážek

Hladiny povrchových vod reagují mimo jiné na srážky, které mohou způsobit krátkodobé zvýšení průtoků. Při intenzivnějších deštích může být vliv větší a může dojít ke vzniku povodňových situací. Naopak v období podprůměrných srážkových úhrnů dochází k postupnému vysychání koryt, tůní a jiných míst k akumulaci vody a vznikají místa s nedostatkem vody povrchové i podzemní.

Heatmapy byly sestaveny z měsíčních průměrných úhrnů srážek za období 1967–duben 2021 viz Obr. 12. Za toto období není patrná výrazná změna v měsíčních průměrných úhrnech. Od roku 1990 jsou patrné některé měsíce s vysoce nadprůměrnými úhrny srážek, ve stanici Lanžhot tyto extrémní průměrné měsíční úhrny dosáhly hodnot kolem 160 mm. Ve stanici Lednice je výrazný nadprůměrný měsíční úhrn přes 200 mm, který se vyskytl v červenci roku 1997. Jinak se nedá říci, že by na uvedených stanicích ve sledovaném období došlo k významnějšímu nárůstu či poklesu srážkových úhrnů, nebo k výrazné změně distribuce srážek během roku.



a) srážkoměrná stanice Lanžhot

b) klimatologická stanice Lednice

Obr. 12 Heatmap průměrných měsíčních úhrnů srážek (mm) a) srážkoměrné stanice Lanžhot, b) klimatologické stanice Lednice v období 1967 do dubna 2021

Výsledky z terénního měření

Následující věty jsou věnovány shrnutí poznatků z terénního měření. Když porovnáme poslední dvě povodňování, během kterých byla terénní šetření provedena, tak průtok v Dyji byl v době terénního měření v roce 2019 nižší, a to 63–66 m³/s, než v roce 2020, kdy bylo vypouštěno kolem 85 m³/s. Viditelný rozdíl byl u mostku přes kanál v blízkosti lokality Pohansko, který vede vodu do obory Soutok. Při první návštěvě v roce 2019 nebyl objem vody dostatečně velký na to, aby se vylil z koryta a dostal se tak do okolních luk. Ačkoliv byla voda propustkem v mostku zpomalována a zadržována, i přesto zůstávala v korytě. Názorně tuto situaci dokresluje Obr. 17. Naopak v následujícím roce se voda dostala z koryta do luk, Obr. 18. Tento rok už nebylo možné suchou nohou kanál přejít. Z obrázků je patrný rozdíl, který jsme chtěli podložit i hydrometrickým měřením. V roce 2019 měření neproběhlo měřicí technikou, ale orientačně byl odhadnut průtok na 200 l/s. V roce 2020 byl naměřen v korytě průtok přibližně 1,3 m³/s. Měření nebylo příliš kvalitní, protože bylo ovlivněno nerovnoměrným prouděním, zanesením koryta a rozlívem do luk, avšak pro základní orientaci je měření dostačující.

Další hydrometrické měření proběhlo u stavidla Obr. 22., kde byly podmínky pro měření mnohem vhodnější. Zde byl změřen průtok $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ dne 5. 3. 2020.

Při terénním měření byla zdokumentována některá místa pomocí fotografií. Byly vybrány fotografie z míst, které jsme navštívili opakovaně v roce 2019, 2020 i 2021 a rozdíl mezi stavem povrchové vody se značně lišil.



Obr. 13 Suchá oblast slepých ramen Dyje v oboře Soutok mezi oblastí Černého jezera a Bornovou jámou (ČHMÚ, 8. 3. 2019)



Obr. 14 V oboře Soutok zavodněná ramena mezi oblastí Černého jezera a Bornovou jámou (ČHMÚ, 28. 2. 2021)



Obr. 15 Vysychající nádrž u záměčku Pohansko (ČHMÚ, 8. 3. 2019)



Obr. 16 Plná nádrž u záměčku Pohansko (ČHMÚ, 28. 2. 2021)



Obr. 17 Kanál přivádějící vodu z Dyje v blízkosti Pohanska (ČHMÚ, 8. 3. 2019)



Obr. 18 Kanál přivádějící vodu z Dyje v blízkosti Pohanska (ČHMÚ, 4. 3. 2020)



Obr. 19 Kanál přivádějící vodu z Dyje v blízkosti Pohanska (ČHMÚ, 1. 3. 2021)



Obr. 20 Manipulační objekt pouštějící vodu z Dyje do obory Soutok (ČHMÚ, 8. 3. 2019)



Obr. 21 Stavidlo obory Soutok (ČHMÚ, 8. 3. 2019)



Obr. 22 Stavidlo obory Soutok (ČHMÚ, 4. 3. 2020)

Závěr

Hydrologická situace v lužním lese je jedním z hlavních témat této oblasti. Jedna z důležitých změn, která postihla tuto cennou oblast, je výstavba Novomlýnských nádrží. Ty zamezují výskytu přirozených povodní, resp. regulací ovlivňují průtoky v řece Dyji. Do obory Soutok je možné vypustit vodu z řeky Dyje za mimořádné manipulace. Tento objem je však velmi omezený a závislý na funkčnosti soustavy umělých kanálů a stavidel v oblasti.

Do obory se může voda dostat pouze při určité velikosti průtoku v řece Dyji. V roce 2019 byl průtok v řece Dyji během povodňování nižší, kolem $64 \text{ m}^3/\text{s}$, což nestačilo na výrazné změny ve stavu hladiny podzemních vod i přesto, že trvalo povodňování 5 dní. Následující rok bylo možné upouštět průměrně $88 \text{ m}^3/\text{s}$. Doba trvání byla kratší, pouze 3 dny, ale výsledek byl oproti roku 2019 patrnější. Terénní měření však potvrzuje, že se z řeky do obory dostane pouze velmi malá část z celkového objemu vody, který proteče řekou Dyjí. Umělé povodňování je jistě velmi důležité, ale v současné podobě pravděpodobně není pro lužní les dostačující, s ohledem na situaci z roku 2020, kdy došlo k výraznému navýšení stavu podzemní vody z letních či podzimních povodňových událostí, které bylo zřetelné i na jaře roku 2021. Je totiž otázkou, zda „umělé“ zvýšení hladiny podzemní vody v řádech centimetrů, decimetrů, v maximálním případě 1 m, je pro vegetaci dostatečné – jestli na ni svými kořeny dosáhne, když je vzdálenost od povrchu např. 3 m (vrt Pohansko). Přívod většího množství vody do obory a lužního lesa by mohl podpořit nový jez na Dyji, který se má v dohledné době budovat.

Viditelný vliv na stav podzemních vod v mělkých vrtech má vzdálenost vrtů od povrchových toků či nádrží. Příkladem může být vrt Ruské domky, který je v blízkosti nádrže a nachází se pod tokem Kyjovka. Opakem je vrt Doubravka, kde jsou změny pomalé. Vrt není umístěn v blízkosti žádného povrchového zdroje vody.

Z heatmap je zřejmý vliv nejen suchých období, kdy docházelo ke snížení stavu hladiny podzemní vody na podprůměrné hodnoty, ale také druhého extrému, a to povodňových událostí, které pomohly zvýšit hladinu podzemních vod. V každém z vrtů je velikost vlivu těchto událostí trochu jiná, ale ve všech

vrtech můžeme vyzorovat vliv výstavby Novomlýnských nádrží, který je patrný od roku 1988. Hodnoty nadprůměrných (vyšších) stavů hladiny se od té doby nevyskytují tak často a v takové intenzitě, jak tomu bylo dříve, naopak došlo k poklesu stavu hladiny podzemní vody. Vrt VB0366 Ruské domky je ovlivněn blízkostí soutoku Dyje, Moravy a Kyjovky, spolu s přítomností blízkého rybníčku a hojného počtu blízkých meandrů či slepých ramen řek a proto je chod podzemní vody odlišný od ostatních tří vrtů.

Opačným jevem jsou běžné povodně, které dokáží zvýšit hladinu podzemní vody i po několik měsíců v roce.

Z krabicových grafů je zřejmé, že hladina podzemní vody je v období 2019 – léto 2020 oproti dlouhodobému stavu výrazně nižší, a proto je snaha o její zvýšení pro zachování lužního lesa velmi důležitá.

Zdroje

Veselý D (2020) Čtyři podoby povodňování na soutoku Moravy a Dyje. In: *Veronica*, r. 34., číslo 1, s. 16–21.

Kvalita vody v povodí jihočeské Blanice

Kateřina FRAINDOVÁ, Milada MATOUŠKOVÁ, Zdeněk KLIMENT, Vojtěch VLACH

Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Česká republika, email: katerina.fraindova@natur.cuni.cz, milada.matouskova@natur.cuni.cz, zdenek.kliment@natur.cuni.cz, vojtech.vlach@natur.cuni.cz

Abstract

Changes of physicochemical parameters in the context of long-term trends and different rainfall-runoff conditions were examined with a special focus on various catchment characteristics (catchment area, hydromorphic soils, degree of nature protection, land use, subsurface drainage and other anthropogenic influences). The study area is situated in the upper part of the Blanice River catchment with more than 77% of the area belonging to a Protected Landscape Area. The catchment is unique for the most abundant population of the critically endangered freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*) in Central Europe. The Mann-Kendall test revealed a decrease of nitrate nitrogen (N-NO₃⁻), total nitrogen (TN) and phosphate phosphorus (P-PO₄³⁻) in the catchment outlet since 2003. The Principal component analysis (PCA) divided 9 study catchments into 3 main groups (natural, partly anthropogenically influenced, subsurface drainage). Water from the catchments with subsurface drainage was characterized by higher concentrations of ammonia nitrogen (N-NH₄⁺), total phosphorus (TP), iron (Fe), fluorine (F⁻), chemical oxygen demand (COD_{Mn}), while the natural catchments exhibited higher concentrations of dissolved oxygen, pH and magnesium to calcium (Mg:Ca) ratio. Higher concentrations of base cations (Ca, Mg, Na, K), nitrates, sulphates, and chlorine (Cl⁻), as well as higher values of conductivity were detected in the partly drained catchments. Changes of physicochemical parameters during different runoff conditions revealed a higher release of aluminium (Al), COD_{Mn}, dissolved organic carbon (DOC) and TP during heavy precipitation event, which could have a negative effect on a vulnerable ecosystems including freshwater pearl mussel.

Introduction

The surface water quality in headwaters is important both for the local aquatic ecosystem, which is often represented by various fauna and flora, and for ecosystem goods and services (e.g. drinking water extraction). Unfortunately, studies focused on the biogeochemical processes in headwaters are however relatively rare mostly due to deficient of the data. In general, headwater areas are valuable as there is often small direct anthropogenic impact and is possible to find areas of some degree of protection and endangered species there. Areas of conservation and conservation programs have positive impact for biodiversity and water quality (Helin, et al. 2013). However, such ecosystem is very sensitive to any kind of disturbance. Acidification of European headwaters in 1970s/1980s, which was caused by acidic precipitation, is one of the examples (Kolář, et al. 2015, Oulehle, et al. 2016). The acidification of precipitation has significantly affected the composition of soils. As a result, increased soil acidity reduces the microorganism's activity, causes calcium leaching and has negative effect on both plant resistance and consequently water quality (Oulehle, et al. 2021). Since the early 1990s, water quality in Czechia has improved due to changes in industrial and municipal practices (Langhammer, 2010, Chalupova, et al. 2012). Recently, climate change appeared to have gradually increasing effect on water resources in headwaters (Soulsby, et al. 2001, Bates, et al. 2008).

Rising air temperature results in the concentration increase in natural organic matter (NOM) (Evans, et al. 2005, Oulehle, Hruška, 2009) and in an increase in liquid and a decrease in solid precipitation (Hynčica, Huth, 2019), and an increase in winter runoff (Kliment, et al. 2011, Blahušáková, et al. 2020). A decrease in snow cover and earlier onset of snowmelt leads to a higher probability of spring floods (Middelkoop, et al. 2001) and worse availability of water in summer (Hynčica, Huth, 2019, Blahušáková, et al. 2020), which affects negatively not only the quantity, but also the quality of water.

Especially during storm rainfalls after a long period of drought, there is an increase in organic matter in the stream water (Ockenden, et al. 2016, Broder, et al. 2017).

Although land cover has obvious impact on water quality and it is possible to observe some general correlations (Gove, et al. 2001), in general, the relationship is not uniform (Baker, 2006, Selle, et al. 2013). While Kändler, et al. (2017) detected a relatively tight correlation between water chemical composition and the land use in the upper Nisa catchment in Czechia and Germany, Staponites, et al. (2019) found out that the spatial position and terrain of the land can govern the conveyance of reactive or unstable water quality parameters, whereas the proportions of land use are dominant factors for predicting more stable chemical data in headwater catchments in South Bohemia.

Besides NOM, nitrogen (N) and phosphorus (P) are responsible for a large proportion of the surface water pollution across the globe and in some areas is registered an increase (Torrent, et al. 2007, Whitehead, Crossman 2012). One of the main sources of soil nutrient loss and increased leaching N and P into the surface waters is agriculture drainage system (Moloney, et al. 2020). Nevertheless Kvítek, et al. (2009) concluded that the proportion of drained land in the catchment after grassing had no marked influence on nitrate nitrogen concentration in surface waters, while the proportion of ploughed land in the catchment played the most important role in nitrate pollution. Later study (Fučík, et al. 2015) observed a positive impact in the nitrate-nitrogen leaching decrease after grassing in recharge area of the drainage system, but with lag time approximately one year. Cattle and sheep grazing could cause water quality deteriorating, especially by increased values of undissolved substances, nutrients (inorganic and organic forms of phosphorus and nitrogen) and pathogens flowing into the stream water (Hubbard, et al. 2004; Torrent, et al. 2007). The annual N, P, K excretion depends on the total annual intake and total annual retention of the animal. Important factors influencing the nutrient load into surface waters are treatment of livestock production waste and management of pastures, number of livestock units and access of livestock to water sources. Therefore, farming practices and adopted measures within a catchment area have a fundamental role (Fučík, et al. 2014).

The study area, upper Blanice River catchment has very low population density around 2 inhabitants per square kilometer according to Czech Statistical Office (2020) with many natural areas characterized by different degrees of protection (Wanner, et al. 2012). The area is also important for freshwater pearl mussel protection (*Margaritifera margaritifera*), which is on the IUCN Red List (Preston, et al. 2007) and needs specific habitat conditions including very clean oligotrophic water (Simon, et al. 2015). The upper Blanice River catchment is one of the most important localities of this critically endangered bivalve mollusc in Central Europe with preservation of a high genetic diversity (Absolon, Hruška, 1999, Machordom, et al. 2003, Bílý, Simon, 2007; Simon, et al. 2015). In the Blanice River catchment, water chemistry has been monitored since 1988 (Benda, 1991). Water quality has been monitored together with the implementation of the Freshwater Pearl Mussel Rescue Program since 1999 (Simon, et al. 2017).

This study assesses the evolution and current condition of water quality in the Blanice River headwaters which represents an ecologically unique area. Different types of evaluation were chosen regarding to the character of the data.

The present study aims in particular at:

- 1/ Trend assessment of selected physicochemical parameters
- 2/ Evaluating the current state of physicochemical parameters in small subcatchments with different degrees of protection, land use and anthropogenic impact
- 3/ Calculating the influence of different rainfall-runoff conditions on water chemistry

Methods

Study sites

The upper part of the Blanice River catchment (85.5 km²) is located in Southern Bohemia (Fig.1) in the Šumava Mts. and its foothills. Altitudes range from 743 to 1236 m a. s. l., the average annual air temperature varies around 6.4 °C with an annual rainfall amounts of about 850 mm. Geology is

dominated by high-grade metamorphic rocks (granulite) and sediments. Soils are generally Cryptopodzols (41.8 %) or Cambisols (32.2 %), with hydromorphic soils cover 31.6 % of the entire catchment. From the historical point of view, this area has registered extensive land use changes (Hintnaus, 2008), especially with a decrease in farmland area and an increase in forested area, which reflects historical trends in the land management as well as the impact of social and political changes on the environment in the region (Measom, 2019). According to the Consolidated Layer of Ecosystems (NCA CR, 2013; Hönigová, Chobot, 2014), the catchment is covered mainly by forest (69 %) concentrated primarily in the upper part of the catchment with a mixture of Norway spruce (*Picea abies*), European beech (*Fagus sylvatica*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*). The rest of the catchment consists mainly of meadows (19%) and wetlands (7%).

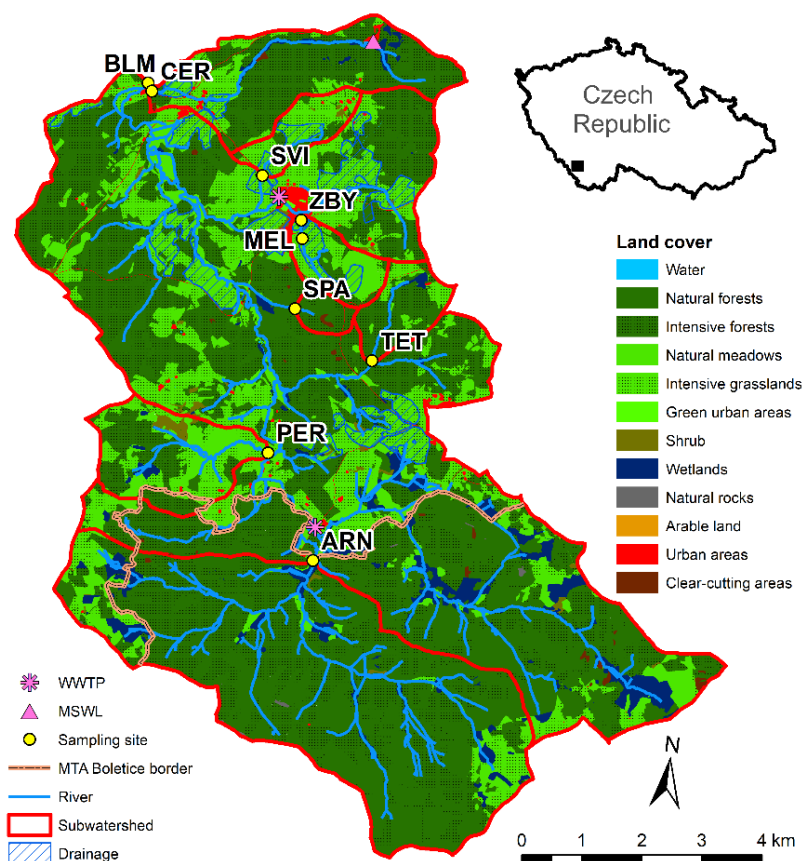


Fig. 1 Location of sampling sites. Source: CGS (2019), VUV (2019), NCA CR (2013), VUMOP (2019), adjusted. Reference system – S-JTSK. WWTP = Wastewater treatment plant, MSWL = Municipal solid waste landfill.

Nearly 80 % of the area belongs to the Šumava Protected Landscape Area, which was declared as a UNESCO biosphere reserve in 1990. There are 5 protected areas: National Nature Monument (NNM) Blanice, NNM Prameniště Blanice, Nature Reserve (NR) Pod Farským vrchem, Nature Monument (NM) Vyšný-Křišťánov and NM Pod Sviňovicemi. In 2005, almost the entire area was declared as a part of the Natura 2000 protected areas system, both Bird Areas and Special Areas of Conservation – Šumava and Boletice.

Despite the near-natural character of the landscape, some anthropogenic activities which directly affects water quality can be found in the river catchment. The most important anthropogenic factors influencing the water quality in the catchment are: 1/ subsurface drainage systems in the central and lower parts of the catchment (Table 1) and ditching in Tetřívčiči (TET) site created during the main wave of building drainage measures in this area in the second half of the 20th century 2/ settlement (municipality of Zbytiny is the biggest village with population of 322 inhabitants in 2020, another village is Křišťánov with 93 inhabitants in 2020), 3/ agriculture, mainly cattle and sheep pastures 4/ municipal solid waste landfill Libínské sedlo.

There were also some measures, which should contribute to water quality improvement in the upper Blanice catchment. The wastewater treatment plant (WWTP) with two low-loaded stabilization ponds was built for the Zbytiny municipality in 2008 projected for 450 population equivalents (PE), with a designed discharge of Q_{24} 67.5 m³ per day (Wanner, et al. 2012). 450 EO refers to 27 kg BOD₅, 5.4 kg N and 0.675 kg P per day, after treatment efficiency measured by Wanner, et al. (2012) it is 0.54 kg BOD₅, 1.24 kg N and 0.03 kg P per day. Outlet load is therefore 8 mg.l⁻¹ for BSK₅, 18.4 mg.l⁻¹ for N and 0.5 mg.l⁻¹ for P.

Tab. 1 Basic characteristics of sampling sites. Source: NCA CR (2013), VUMOP (2019). *In Tetřivčí brook basin is present ditching 7.36 km.km⁻². (Kalkus, 2012).

Profile	Abbrev.	Area	Drainage	Urban areas	Intensive grasslands	Natural meadows	Intensive forests	Natural forests	Wetlands
number		[km ²]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	ARN	20.55	0	0.02	5.11	4.78	47.98	36.56	4.72
2	PER	3.72	0	0.24	30.01	20.49	39.14	3.37	2.56
3	TET	1.63	0.00*	0.53	20.72	2.5	65.18	7.87	2.98
4	SPA	0.55	0	1.25	0	0	60.66	37.77	0.2
5	MEL		100	0	51.6	31.46	11.04	3.05	2.09
6	ZBY	1.52	29.76	3.52	38.75	28.55	23.67	4.62	0.48
7	SVI	1.4	19.49	1.52	72.08	4.42	19.15	0.58	0
8	CER	5.71	4.28	2.07	20.96	1.78	65.39	5.43	3.8
9	BLM	85.49	0.45	0.95	19.2	8.13	46.47	19.97	4.02

WWTP Křišťanov was built as a part of Freshwater Pearl Mussel Rescue Program in the upper part of the catchment in 2016 for 60 EO. WWTP Křišťanov was constructed with membrane filter technology, reliable and highly efficient in contrast to the sludge activation method, where there is a risk of accidents. Membrane technology does not physically allow sludge to overflow and is very effective at phosphorus (95%) and nitrogen (80%) removing. Another step is the ground filter (biological treatment) and seepage in the floodplain (Beleco 2016). Restoration of the Sviňovický brook, which is a right tributary of the Blanice river, was conducted in 2006. However, even after restoration, increased values of COD_{Mn}, conductivity and nitrate nitrogen were observed (Kliment, et al. 2008).

Švanyga et al. (2013) presented the concentration of total phosphorus (P) in the river main stream, as well as eutrophication and erosion rates of some tributaries as fundamental problems causing water quality degradation. On the contrary, concentration of Ca, COD_{Cr} and dissolved O₂ did not represent a problem in the river catchment.

The menace to water quality is vegetation stress, especially forest disturbances, and improper forest management. Improper forest management led to increased phenols, phosphorus and ammonia contents in the past and it still represents one of the main threats to water quality (Simon, et al. 2017), as well as the use of toxic xenobiotics – e.g. RoundUp (Švanyga, et al. 2013).

Data sources

Our study comprises water quality data from three different sources.

Long term data from Povodí Vltavy, State Enterprise was obtained for the Blanický mlýn (BLM) site including standard water quality indicators (pH, EC – conductivity, dissolved O₂, chemical oxygen demand – COD_{Cr}, total organic carbon – TOC, total nitrogen – TN, N–NH₄⁺, N–NO₂⁻, N–NO₃⁻, total phosphorus – TP, P–PO₄³⁻) at monthly steps for the 2003–2019 period (193 observations), while TOC and TN were measured only during the 2007–2019 period (150 observations).

Daily discharge data was provided by the Czech Hydrometeorological Institute (<http://chmi.cz>).

For the Spálenecký brook site (SPA), which is a small right tributary of the Blanice River in the central part of the catchment, the Czech Geological Survey (CGS, 2016) provided monthly data (discharge, pH,

EC, Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Cl⁻, F⁻, N-NO₃⁻, SO₄²⁻, TOC) for the 1994–2006 period (154 observations). The SPA site was one of the forested catchments from GEOMON network till 2006 (Oulehle, et al. 2017).

The last data source was obtained from the field monitoring and water sampling. For a detailed evaluation of the recent water quality state in the whole catchment, surface water sampling was done in 9 sites (Fig.1, Table 1) in 2018–2019 with focus on different seasons and runoff conditions. Overall, 8 measurements and water sampling were done on the same date (except MEL site – only 3 sampling, parameter Ca – 6 sampling). Parameters analyzed in the laboratory were Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, TP, Si, N-NH₄⁺, Cl⁻, F⁻, N-NO₃⁻, SO₄²⁻, Zn, COD_{Mn} and DOC in selected sites (ARN, TET, SPA, BLM). At the time of sampling, electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), pH and temperature were measured using the Hach-Lange HQ40-D Multimeter. The discharge was measured using the Flow Tracker (SONTEK) device. Water samples were collected and transported in the cool (<10°C) and dark box for further analysis. Cations and anions were measured in the laboratories of the Geological Institutes and Laboratory of Environmental Chemistry and Soil Analysis within 24 hours after collection. Cations were measured by the ICP-OES method with Agilent 5110 and anions were measured with the Dionex ICS-2000 HPLC ion chromatography system. The degree of pollution based on COD_{Mn} was determined in Charles University's Institute for Environmental Studies by the so-called Kubel method based on the oxidation of organic substances by potassium permanganate in an acidic environment. Samples for dissolved organic carbon (DOC) analyses were filtered by a 0.45 µm membrane filter and measured by the differential method using the Formacs TOC / TN analyzer (Skalar).

Additional 10-minutes rainfall, water levels and EC data measured by an automatic water quality and rain gauge station of the Department of Physical Geography and Geoecology, Charles University was used (CUNI, 2020).

The land cover data was obtained from the Consolidated Layer of Ecosystems (NCA CR, 2013, Hönigová, Chobot, 2014). This dataset contains a detailed land cover information divided into 41 classes. For our study purposes, some classes were merged into generalized classes. Forest clear cutting areas were identified by 2015 orthophoto image (CUZK, 2021).

Hydromorphic soils data was obtained from the Czech Geological Survey (CGS, 2019), subsurface drainage data originated from the Research Institute for Soil and Water Conservation (VUMOP, 2019) and landscape protection data was from the State Administration of Land Surveying and Cadastre (CUZK, 2020). Number of livestock were obtained from The Ministry of Agriculture of the Czech Republic (eAgri, 2021).

Data analyses

Significant trends in long term monthly and annual data series (2003–2019) for the BLM site were identified using the Mann-Kendall (MK) trend test (Mann, 1945; Kendall, 1975). Significance of the trend was tested at the level $\alpha = 0.05$. Additional analyses of continual (10-minutes data) EC changes during WWTP construction in Zbytiny (before and after) was done for sites above and under WWTP. The outlet load was calculated, same as for livestock in the catchments. A comparison of mean, median and relative standard deviation values was conducted in site SPA for two periods (1994–2006 and 2018–2019).

For 9 sites, a short-term monitoring period (2018–2019) was evaluated. Sampling was done on the same date during stable hydrometeorological conditions for further analyses and comparison. As many water chemical variables are correlated and could reflect different sampling site characteristics, appropriate multidimensional statistical method was applied. Principal component analysis (PCA), which explains the relationships on different spatial planes and explicably shows these planes by means of the axes (Davis, 1973) was used for median values of the 20 selected parameters (pH, EC, diss. O₂, temperature, Al, Ca, Fe, K, Mg, Mg:Ca ratio, Na, TP, Si, N-NH₄⁺, F⁻, Cl⁻, N-NO₃⁻, SO₄²⁻, Zn, COD_{Mn}) for 9 sites. Second analysis comprises also land use, subsurface drainage system, main anthropogenic activities and state of the land protection in the catchment. Before analyses, the data were standardized to a unit scale by subtracting the site mean for the whole time series and dividing by the site standard deviation. PCA were performed with the XLSTAT 2019 software.

Results

Long-term changes of water quality in the catchment (outlet profile)

MK-trend analysis of water quality indicators evidences predominance of insignificant trends (p -value > 0.05) for the BLM site (main catchment). A significant decreasing trend was observed for N-NO_3^- during seven months (November, January, February, March, June and October) and also in the annual data series (MK-Stat = -4.12 ; p -value < 0.05). Mean annual N-NO_3^- concentration decreased from $1\,175\ \mu\text{g.l}^{-1}$ in 2004 to $587\ \mu\text{g.l}^{-1}$ in 2018. The other nitrogen compounds also showed some significant trends. N-NO_2^- decreased in July (MK-Stat = -2.45 ; p -value < 0.05) and in annual series (MK-Stat = -1.98 ; p -value < 0.05). TN decreased in February and July. On the contrary, N-NH_4^+ increased in spring (April, May), however about half of the measured N-NH_4^+ concentrations were below the detection limit ($0.02\ \text{mg.l}^{-1}$). Even if TP didn't reveal any trend, P-PO_4^{3-} decreased during the year (MK-Stat = -1.98 ; p -value < 0.05). The last trend was observed for dissolved O_2 , which decreased in October (MK-Stat = -2.8 ; p -value < 0.05).

Analyses of conductivity changes during WWTP Zbytiny construction in 2008 shows strong decrease of mean EC under the WWTP. While above Zbytiny village was EC values before and after WWTP construction almost the same (around $70\ \mu\text{S.cm}^{-1}$), under the Zbytiny village and also under WWTP EC values have changed from $175\ \mu\text{S.cm}^{-1}$ before WWTP construction to $71\ \mu\text{S.cm}^{-1}$ after WWTP construction.

In the SPA site, mean values of pH increased (from 6.37 in 1994–2006 to 6.78 in 2018–19), which corresponds with the overall trend and recovery from acidification in Central Europe. Together with this change, decreases in SO_4^{2-} , Na, Al and Fe concentrations were detected. However, some of the base cation (Ca, Mg, K) and N-NO_3^- concentrations increased (mean concentrations of N-NO_3^- increased from $95.07\ \mu\text{g.l}^{-1}$ to $167.57\ \mu\text{g.l}^{-1}$).

Current state of water quality

Principal component analysis was carried out to group sites with similar natural conditions and to determine the most important physicochemical parameters affecting the water quality. The two main components explained 68.39 % of the data set variability (Fig. 2a). Analysis of factor loadings showed that Ca, K, TP, F^- , Cl^- , N-NO_3^- , Fe and N-NH_4^+ were the major factors affecting the water quality (factor loading value > 0.8). The sites could be divided into 3 subgroups: (A) with less anthropogenic influence, near the spring area and with the highest degree and proportion of the protection area (ARN, SPA, PER, TET), characterized by higher concentrations of diss. O_2 , pH, Mg:Ca ratio; (B) sites with greater anthropogenic influence, partially drained (ZBY, SVI, CER), with higher concentrations of base cations (Ca, Mg, Na, K), higher concentrations of nitrates and sulphates, higher Cl^- values, especially in the CER site, and higher EC. (C) subsurface drainage to the Zbytinský brook (MEL), characterized by higher values of ammonia nitrogen, TP, Fe, F, COD_{Mn} . BLM (outlet) is situated in the center of the graph nearest to the group A, as water from the whole river catchment is mixed, which indicates lower influence of water chemistry parameters.

Tab. 2 Main physicochemical characteristics, mean values for 2018–2019 (8 seasonal samples).

Profile	Cond.	Diss. O_2	Al	Fe	Zn	TP	Cl^-	F^-	N-NO_3^-	SO_4^{2-}	DOC	COD_{Mn}
	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	mg.l^{-1}	$\mu\text{g.l}^{-1}$	$\mu\text{g.l}^{-1}$	$\mu\text{g.l}^{-1}$	$\mu\text{g.l}^{-1}$	mg.l^{-1}	mg.l^{-1}	$\mu\text{g.l}^{-1}$	mg.l^{-1}	mg.l^{-1}	mg.l^{-1}
1 ARN	66.10	8.91	232	404.00	6	60	1.08	0.10	86	10.39	17.16	15.68
2 PER	56.80	8.99	169	342.00	15	24	1.63	0.10	472	7.55	NM	8.64
3 TET	80.80	8.96	198	364.00	10	25	2.82	0.27	1106	11.40	13.44	12.24
4 SPA	56.30	7.91	296	524.00	8	32	1.20	0.25	183	9.89	12.97	12.48
5 MEL	138.30	4.68	200	4510.00	7	101	2.54	0.10	23	14.42	NM	14.72
6 ZBY	114.80	8.37	294	732.00	7	49	5.14	0.25	623	20.27	NM	11.36
7 SVI	145.70	8.28	417	699.00	10	42	3.49	0.10	1656	16.93	NM	7.84
8 CER	172.30	8.32	280	360.00	7	100	23.96	0.22	1127	13.83	NM	5.84
9 BLM	94.70	9.09	260	486.00	6	60	4.54	0.22	616	11.57	14.40	12.40

Water quality could be considered as unpolluted or slightly polluted in the catchment, main physicochemical characteristics could be found in Table 2. However, COD_{Mn} and TOC concentrations were considerably higher, demonstrating the organic pollution, which may be caused by the occurrence of peatlands in the upper parts of the river catchment where the highest concentrations also occurred (site 1: COD_{Mn} 15.68 mg.l^{-1} , TOC 17.16 mg.l^{-1}). The subsurface drainage to the Zbytinský brook (MEL) had a great influence on the increased rate of matter flow, where the values of EC, COD_{Mn} , Fe, TP and dissolved O_2 were considerably higher (resp. lower for diss. O_2 : 4.68 mg.l^{-1}). Besides the MEL site, SVI and ZBY sites are the most affected by the subsurface drainage (30%, resp. 20% of the catchment area is drained). In comparison to other sites, in SVI and ZBY sites were higher concentrations of SO_4^{2-} (16.93 mg.l^{-1} and 20.27 mg.l^{-1} resp.), N-NO_3^- (1 656 $\mu\text{g.l}^{-1}$ and 623 $\mu\text{g.l}^{-1}$ resp.), TP (42 $\mu\text{g.l}^{-1}$ and 49 $\mu\text{g.l}^{-1}$) and EC (145.7 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ and 114.8 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ resp.). Specifically, different conditions were visible in the CER site. This site is influenced by the municipal solid waste landfill Libínské sedlo in the upper part of the catchment. Apparently, there were the highest concentrations of Cl^- (23.96 mg.l^{-1}), higher concentrations of EC (172.3 $\mu\text{S.cm}^{-1}$), base cations (29.06 mg.l^{-1}) and N-NO_3^- (1 126.74 $\mu\text{g.l}^{-1}$). Regarding the upper part of the investigated catchment with no subsurface drainage and low anthropogenic influence, the TET site showed some dissimilarities from the others. There were slightly higher concentrations of N-NO_3^- (1 106.42 $\mu\text{g.l}^{-1}$), Ca (7.29 mg.l^{-1}), Na (4.79 mg.l^{-1}), Si (9.91 mg.l^{-1}), and EC (80.8 $\mu\text{S.cm}^{-1}$).

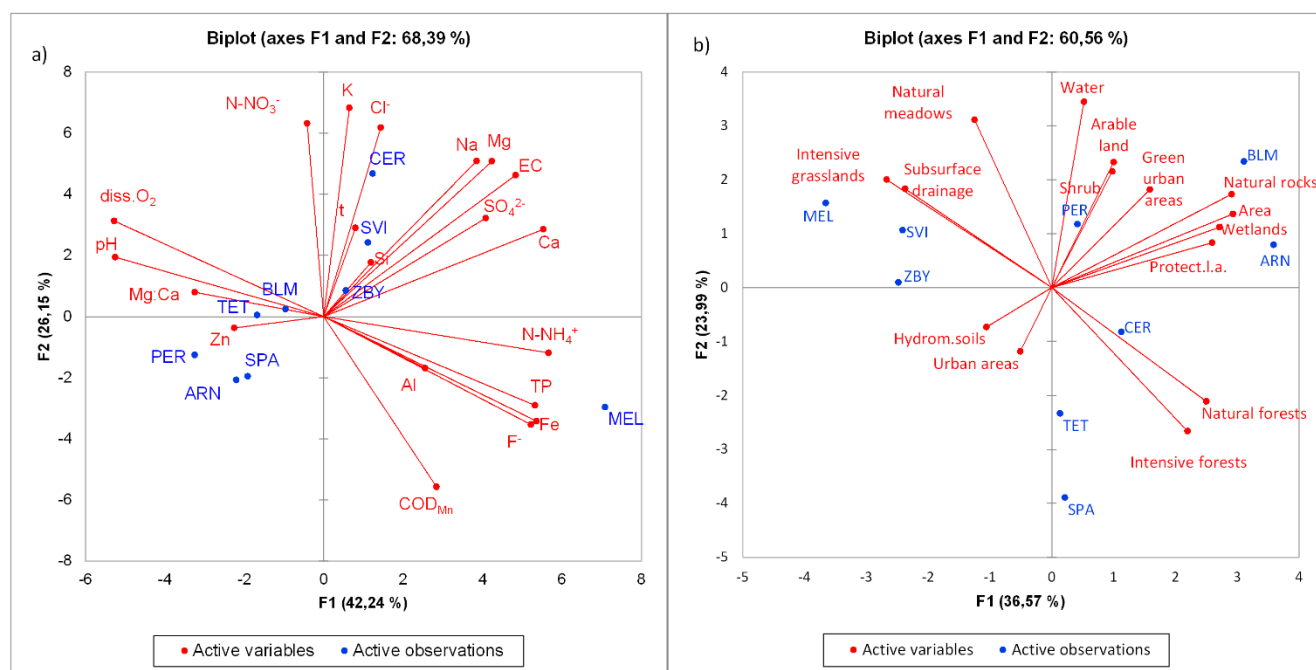


Fig. 2 Principal component analysis of selected physicochemical parameters and their median concentration level in the studied sites (left) and catchment characteristics (right). Sites are represented as filled blue circles and the variables as filled red circles with lines. 2018–2019 seasonal data (8 measurements).

Water Chemistry and catchment characteristics

Firstly, PCA with different catchment characteristics was done in 9 sites (Fig. 2b) to illustrate main differences between catchments. First two components, which had eigenvalue greater than 1, explain 60.56 % of the data set variability. PCA showed that upper part of the catchment, where ARN and PER sites were situated were characterized by larger area with wetlands and protected landscape area. MEL, SVI and ZBY sites were significantly influenced by subsurface drainage and were characterized by great area of intensive grassland. Remaining SPA, TET and CER sites are characterized by great area of forest cover.

Secondly, the values of 20 selected parameters and 15 catchment characteristics (Area, Hydromorphic soils, Subsurface drainage system, Land protection, Urban areas, Green urban areas, Arable land, Intensive grasslands, Natural meadows, Intensive forests, Natural forests, Shrub, Wetlands, Water, Natural rocks) were analyzed using PCA together. The first two principal components explained 54.55 % of the data set variability. Focusing on catchment characteristics, the most influencing factor was subsurface drainage (factor loading value >0.92) followed by intensive grasslands (factor loading value = 0.83). Results of water chemistry showed that in the upper parts of the catchment there was a higher diss.O_2 concentration. Conversely, the lower concentrations of Si, SO_4^{2-} , Mg, Na, Ca, and lower temperature were detected. As in the previous chapter (3.2), there were higher concentrations of N-NH_4^+ , TP, Fe, F and Al in catchments with subsurface drainage and with larger area of intensive grassland. Urban areas (represented by transport units, discontinuous urban fabric, industrial and commercial units, dump and construction units) were mostly correlated with higher concentration of N-NO_3^- , TP, Cl^- , Mg, Ca, EC and higher temperature.

Important source of water pollution could be cattle and sheep grazing in the catchment. Intensive grasslands cover almost 20 % of the whole catchment, while there are significant differences between river basins (from 0 % to 72 %, more in Table 1). Since 2004, number of cattle fluctuated between 0.2–0.3 cows per ha and number of sheep fluctuated between 0.05–0.1 per ha according to eAgri (2021). In 2018–2019 there was 0.22 cows/ha of intensive grasslands and 0.06 sheep/ha of intensive grasslands, which is under the limit according to Act No. 399/2004, where the limit for permanent grassland is 0.5–1.25 cows per ha. Nutrient input for intensive grasslands in the catchments is approximately 48.25 g $\text{N.day}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, 19.08 g $\text{P.day}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ and 61.26 g $\text{K.day}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, which is mostly consumed by plants, but during rainfall-runoff events are flushed into the river water.

Extreme rainfall-runoff conditions

With regard to runoff conditions, there was an obvious increase in Al, COD_{Mn} , DOC and TP in all studied sites during a rainfall-runoff event (Table 3). The largest increases were registered for Al concentrations, where the Al concentrations were more than three times higher during the rainfall-runoff event than under normal conditions in all sites.

Tab. 3 Increased concentrations of selected water quality parameters during rainfall-runoff event (13.6.2018). Increased values are highlighted by three shades of orange according to their increased levels (no color for 0–3 times higher; light for > 3 times higher; medium for > 5 times higher; dark for > 10 times higher), NM = Not measured.

Profile		Al [$\mu\text{g.l}^{-1}$]		COD_{Mn} [mg.l^{-1}]		DOC [mg.l^{-1}]		TP [$\mu\text{g.l}^{-1}$]	
		Median	Event	Median	Event	Median	Event	Median	Event
1	ARN	191.0	940.0	12.2	38.1	14.3	25.2	40.0	90.0
2	PER	85.0	440.0	5.4	25.0	NM	NM	15.0	30.0
3	TET	82.5	940.0	6.9	31.2	7.5	26.1	15.0	80.0
4	SPA	149.0	750.0	7.2	32.6	8.3	23.2	15.0	50.0
6	ZBY	127.0	950.0	6.2	27.2	NM	NM	33.0	130.0
7	SVI	250.0	840.0	4.2	17.0	NM	NM	33.5	80.0
8	CER	82.0	900.0	4.9	12.3	NM	NM	25.0	100.0
9	BLM	139.0	1130.0	8.2	35.8	9.7	27.5	35.5	110.0

In 4 sites the Al concentrations were more than five times higher and in two sites (TET and CER) were ten times higher than under normal conditions. The concentrations of Al reached almost 1000 $\mu\text{g.l}^{-1}$ during the increased discharge in these two catchments. Apart from CER, the concentrations of COD_{Mn} were more than three times higher in all sites. Higher concentrations were also observed for DOC, but this parameter was measured only at 4 sites. A significant increase in TP concentrations was also registered. The highest increase was detected at the TET site (more than five times higher), followed by CER, ZBY, SPA and BLM sites (more than three times higher).

Discussion

Long-term (2003–2019) N–NO₃⁻ concentrations decreased significantly (from 1 175 µg.l⁻¹ in 2004 to 587 µg.l⁻¹ in 2018) in the outlet (BLM site). Bílý and Simon (2007) registered the concentration of nitrates reduction by approximately 50% over the 15 years between 1990–2005 in 3 sites of the Blanice River catchment previously and explained it by the elimination of intensive agriculture because of the protective conditions of the national park reserve and by an overall reduction in the intensity of operations of mountain farms. Our findings have different explanation, as land use in the catchment have been relatively stable since 2003. N–NO₃⁻ concentration reduction since 2003 could be caused mainly by the construction of WWTP Zbytiny in 2009 and WWTP Křišťanov in 2016. Additional analyses of EC changes during the construction time of WWTP confirmed effectiveness of the water treatment. EC values of river water under the village decreased near the values as were measured above the village. WWTP nutrient removal efficiency have to be approximately 96 % for phosphorus, 77 % for nitrogen and 99.6 % for ammonia (Pešková, 2015). Wanner, et al. (2012) observed treatment efficiency > 90 % for organic pollution and only 60 % removal efficiency for total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the WWTP effluent between November 2008 and November 2010. Thought, the two stabilisation ponds located behind the wastewater treatment plant greatly improved the total treatment efficiency up to 77 % (TN) and 96 % (TP). However, when comparing the 1994–2006 and 2018–2019 periods in the SPA site, N–NO₃⁻ mean concentrations have increased from mean values 95 µg.l⁻¹ in 1994–2006 to 168 µg.l⁻¹ in 2018–2019 (median values: 34 µg.l⁻¹ (1994–2006), 105 µg.l⁻¹ (2018–2019)). The N–NO₃⁻ increase in the SPA site, which is a catchment with no agriculture area and settlement, could be a result of forestry activities (Reynolds, Edwards, 1995; Hughes, Quinn, 2019) as more than 60 % of the catchment is covered by intensive forest and forest clear-cutting was registered near spring area in the immediate vicinity of the brook channel between 2008 and 2011 according to orthophoto images (CUZK, 2021). Climate change is considered as another factor that may cause more N–NO₃⁻ leakage as a result of hydrological episodes (runoff after heavy rain) and increased decomposition and mineralisation of organic matter (Kaste, et al. 2020) or still relatively high N deposition in upland forests, which might still exceed long-term sustainable levels (Hůnová, et al., 2014). However, this result could be also influenced by the number and frequency of observations. Values of P–PO₄³⁻ registered an annual decrease in the BLM site. Together with a decrease in N–NO₃⁻, it could be a result of water quality improving measures in the Blanice River catchment such as construction of WWTPs. A significant decreasing trend (MK-Stat -2.8) of dissolved O₂ has been detected in the BLM outlet profile in October, which could reflect increasing air and water temperature or more NOM in water (Oulehle, Hruška, 2009). Moreover, this could have a negative effect on biota in the river.

Values of pH increased and SO₄²⁻ concentrations decreased in SPA site, which is in correspondence with the overall trend and recovery from acidification in Central Europe (Oulehle, Hruška, 2009; Oulehle, et al. 2013, 2017; Kaste, et al. 2020). Some of the base cations concentrations increased as well (Ca, Mg, K). Although higher concentrations of base cations are mainly associated with higher SO₄²⁻ buffering the effect of SO₄²⁻ on pH (Mattsson, 2010), the increased values in this site could be associated with other factors. One of them is forest clear-cutting which was registered in the upper parts of this catchment. Changes in forest cover considerably alters the flow of base cations through forest ecosystem because forests also take up base cations (Skeffington, et al. 2016).

While the presence of land and water protection should improve water quality (Helin, et al. 2013), protected areas cannot assure the water quality improvement in streams automatically (Mancini, et al. 2005; Pešić, et al. 2020). In our study, analyses of water chemistry characteristics in small catchments revealed that the degree and area of land protection are supposed to have a positive impact on water quality. Small catchments with less than 50% of the total area belonging to Protected Landscape Area and Bird Area had similar water quality parameters. Nevertheless, there are still higher concentrations of COD_{Mn} in the upper parts of the catchment caused by peat bogs. The influence of peatland on water quality was assessed as negative, while the intensity of the effect is related to the area and volume in the catchment (Kocum, et al. 2016). Although the runoff from peat bogs decreases during dry periods and the quality of river water notes an improvement (Ferda, et al. 1971; Hruška, et al. 1996, 1999; Oulehle, Janský, 2003), during summer rainfall periods and spring snowmelt, there is a decline in water quality as peat bog complexes are fully saturated and water flows over the stream bed (Kocum, et al. 2016).

Cattle and sheep grazing is present by 0–72 % of the whole catchments area (Table 1). Catchments with concentrated livestock populations have been shown to discharge as much as 5 to 10 times more nutrients (especially N and P) than catchments in cropland or forestry (Hubbard, et al. 2004). Although, there is only 0.2–0.3 cows per ha and 0.05–0.1 sheep per ha, catchment with 72 % of grazing area had the highest mean concentration of N–NO₃⁻ (1 656 µg.l⁻¹), which is 9–19 times higher than in catchments with <6 % of intensive grassland. Not only area of grazing land but also the unrestricted access of livestock to water sources could be most probably cause of the surface water deteriorating, which was already pointed out by Fučík, et al. (2014). On the contrary, mean TP concentration was below the whole catchment mean values (only 42 µg.l⁻¹, mean TP concentration for whole catchment is 55 µg.l⁻¹). However, it could be caused by the application of compounds rich in P-sorptive Al, Fe, and, to a lesser extent, Ca (Mcdowell, et al. 2014) which increase soil P retention. These compounds are higher in catchments with grazing, especially Al (417 µg.l⁻¹, mean Al concentration for whole catchment is 261 µg.l⁻¹).

Another important factor related to stream water quality in this catchment is subsurface drainage and forest ditching. Higher specific discharge and higher concentrations of SO₄²⁻, N–NO₃⁻, base cations, Fe, TP, and EC were measured in the catchment with subsurface drainage. This is connected to increased aeration of soil profile and then subsequently mineralization of organic matter and reduced denitrification in previously waterlogged soils (Kulhavý, Fučík 2015). Even if the concentrations of COD_{Mn} were higher in most of the sites in the catchment, the restored brook SVI had lower concentrations (7.84 mg.l⁻¹). In contrary to earlier study (Kliment, et al. 2008), the water quality in this site indicated an improvement. Phosphorus loss along agricultural drainage ditches represents one of the biggest risks for river water quality (Moloney, et al. 2020). Švanyga, et al. (2013) presented the total phosphorus (P) concentration in the upper Blanice river together with eutrophication as a significant problem. Our results indicated that higher TP concentrations came from the drainage system and represent a problem mainly during precipitation events. The subsurface drainage and ditching in the forested catchment TET could be considered as one of the reasons causing water quality degradation. Despite more than 70 % forest cover in TET catchment, there are slightly higher concentrations of N–NO₃⁻ (1 106.42 µg.l⁻¹), Ca (7.29 mg.l⁻¹), Na (4.79 mg.l⁻¹), Si (9.91 mg.l⁻¹), and EC (80.8 µS.cm⁻¹), which could be connected with ditching (ditching density is 7.36 km.km⁻² there, Kalkus, 2012) as Åström, et al. (2001) registered similarly an increase of the concentrations of Mn, Ca, Mg, suspended material and alkalinity in a boreal forested catchment with ditching in Finland.

As a positive effect could be considered significantly higher runoff during a dry period in drained catchments as previously observed Královec, et al. (2016) in TET catchment and is in agreement with earlier studies indicating that ditching has an overall levelling effect on discharge such that peak runoffs commonly are slightly reduced, while during low-flow periods there is an increase in discharge (Seuna, 1982; Prevost, et al., 1999; Åström, et al. 2001).

Even as a freshwater pearl mussel (*M. margaritifera*) locality (Absolon, Hruška, 1999, Simon, et al. 2015), it should be considered that only some of the study localities are suitable as their habitat in terms of water quality. The most frequently exceeded limits were for conductivity, Ca, TP, N–NO₃⁻ and Mg:Ca ratio in the lower parts of the upper Blanice catchment. Concentrations of TP, as well as concentrations of N–NO₃⁻ and EC exceeded the critical upper limits for the survival of *M. margaritifera* in more than half of the sites (according to limits in Absolon, Hruška 1999). Most suitable site for freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*) according to water chemistry was site near the freshwater pearl mussel breeding program (PER), and in the smallest forest subcatchment (SPA). Water physicochemical parameters are however only a part of ecological requirements of freshwater pearl mussel. Other factors are especially substratum quality, hydromorphological characteristics, content of fine sediment, host fish abundance or presence of predators (Stoeckl, et al. 2020) and were not included in this study.

Climate changes (Soulsby, et al. 2001; Evans, et al. 2005; Bates, et al. 2008; Oulehle, Hruška, 2009) and changes in rainfall-runoff regime (Blahušíaková, et al. 2020) affect surface water quality significantly. Moreover, heavy precipitation events are one of the risky situations in drinking water quality degradation (Delpa, et al., 2009). Although total aluminium concentrations decreased significantly after 1990s (Oulehle, et al. 2013, 2017), results of our study show that heavy precipitation event cause higher release of Al compounds into the river water – up to more than 1 000 µg.l⁻¹ and up

to more than 10 times higher than median values, which could affect freshwater pearl mussel population negatively (Taskinen, et al.2011). During the rainfall-runoff event, increased concentrations of COD_{Mn}, DOC and TP were also registered.

Conclusion

The upper Blanice catchment is an important, partly specially protected area due to its high biological diversity and protection of freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*) population, which is on the IUCN Red List.

Results showed that in long-term perspective there was registered an improvement in water quality in decreasing trends of N and P compounds in the main stream during 2003–2019 period, which could be explained by the higher efficiency of water treatment in WWTPs. Nevertheless, most water pollution in the Blanice catchment is currently directly linked to anthropogenic activities like subsurface drainage (higher TP, Fe, EC), municipal solid waste landfill (higher Cl⁻, base cations, N–NH₄⁺) and grazing cattle and sheep (higher N–NO₃⁻). As natural sources of water pollution are considered peatlands in the upper parts of the catchment (higher concentrations of COD_{Mn}, TP, lower pH together with higher concentrations of Al and Fe). Water quality in terms of freshwater pearl mussel requirements was still at most of the sites insufficient. The most frequently exceeded limits were for conductivity, Ca, TP, N–NO₃⁻ and Mg:Ca ratio. Heavy precipitation event caused higher releases of Al, COD_{Mn}, DOC and TP, which could also affect freshwater pearl mussel population negatively.

Overall, the results of this study emphasise, that even in near-natural catchment with a significant area of landscape protection, previous and current interventions are reflected very sensitively through water quality changes.

Thus, future studies focused on changes in water quality parameters during different rainfall-runoff events and with connection to various landscape characteristics and anthropogenic activities are needed to comprehend the main sources of the compounds and to develop appropriate strategies to protect water quality in this vulnerable ecosystem.

Acknowledgements

This research was realized under the framework of the Charles University Grant Agency (project "Changes of biogeochemistry of watercourses in headwater areas", No. 1408618) and project TAČR "Prediction, Evaluation and Research for Understanding National sensitivity and impacts of drought and climate change for Czechia (PERUN)" No. SS02030040.

References

- Absolon K, Hruška J (1999) Záchranný program perlorodky říční (*Margaritifera margaritifera* Linnaeus, 1758) v České republice (Action plan for freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera* Linnaeus, 1758) in the Czech Republic). NCA CR, Prague, 1–27 (in Czech).
- Act No. 399/2004 page 7879. Decree No. 399/2004 Coll. Decree amending Decree of the Ministry of Agriculture No. 274/1998 Coll., On the storage and use of fertilizers, as amended.
- Åström M, Aaltonen EK, Koivusaari J (2001) Effect of ditching operations on stream-water chemistry in a boreal forested catchment, *The Science of the Total Environment*, 279 (1–3), 117–129.
- Baker A (2006) Land Use and Water Quality. In: Anderson MG, McDonnell JJ (Eds.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2925–2930.
- Bates BC, Kundzewicz ZW, Wu S, Palutikof JP (Eds.) (2008) *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Beleco (2016) <http://www.beleco.cz/odborna-cinnost/ochrana-perlorodky-ricni/ochrana-populace-perlorodky-ricni-pred-komunalnim-znecistenim.html>. Accessed 10 May 2021.

Benda F, et al. (1991) Chemismus povrchových odtokových vod modelového území "Horní Blanice" se zřetelem na podmínky platné pro biotop původní populace perlorodky říční. Final report of the project SPZV VI-5-2/02 – ÚKE ČSAV České Budějovice. In: Švanyga J, Simon O, Mináriková T, Spisar O, Bílý M (2013) Záchranný program Perlorodka říční (*Margaritifera margaritifera*) v České republice, NCA CR, Prague, 151 pp. (in Czech).

Bílý M, Simon O (2007) Water Quality Issues in the Protection of Oligotrophic Streams with the Occurrence of Pearl Mussel (*Margaritifera margaritifera*) in the Czech Republic, *Acta Universitatis Carolinae Environmentalica*, **21**, pp. 21–30.

Blahušiaková A, Matoušková M, Jenicek M, Ledvinka O, Kliment Z, Podolinská J, Snopková Z (2020) Snow and climate trends and their impact on seasonal runoff and hydrological drought types in selected mountain catchments in Central Europe, *Hydrological Sciences Journal*, **65** (12), 2083–2096.

Broder T, Knorr KH, Biester H (2017) Changes in dissolved organic matter quality in a peatland and forest headwater stream as a function of seasonality and hydrologic conditions, *Hydrology and Earth System Sciences*, **21**, 2035–2051.

CGS (2016) GEOMON network data. Czech geological Survey, Prague.

CGS (2019) Map of soil types. https://mapy.geology.cz/arcgis/services/Pudy/pudni_typy50/MapServer/WmsServer, https://mapy.geology.cz/arcgis/services/Pudy/pudni_mapa50_rastr/MapServer/WmsServer. Accessed: 20 Nov. 2019.

Chalupova D, Havlikova P, Jansky B (2012) Water quality of selected fluvial lakes in the context of the Elbe River pollution and anthropogenic activities in the floodplain, *Environmental Monitoring and Assessment*, **184**, 6283–6295.

CUNI (2020) Hydro-Meteorological Monitoring Network. Charles University, Prague.

CUZK (2020) WMS view service – ZABAGED®.

<http://ags.cuzk.cz/arcgis/services/ZABAGED/MapServer/WmsServer?>. Accessed 18 March 2020.

CUZK (2021) Orthophoto of the Czech Republic. <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec>. Accessed 10 May 2021.

Czech Statistical Office (2020) www.czso.cz. Accessed 20 February 2020.

Davis JC (1973) *Statistics and Data Analysis in Geology*, Wiley, New York.

Delpla I, Jung AV, Baures E, Clement M, Thomas O (2009) Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production, *Environment International*, **35**, 1225–1233.

eAgri (2021) Livestock database. Department of Animal Commodities and Central Animal Register, The Ministry of Agriculture of the Czech Republic.

Evans CD, Monteith DT, Cooper DM (2005) Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts, *Environmental Pollution*, **137** (1), 55–71.

Ferda J, Hladný J, Bubeníčková L, Pešek L (1971) Odtokový režim a chemismus vod v povodí Horní Otavy se zaměřením na výskyt rašelinišť. *Sborník prací HMÚ*, **17**, HMÚ, Prague, 22–126 (in Czech).

Fučík P, Novák P, Žížala D (2014) A combined statistical approach for evaluation of the effects of land use, agricultural and urban activities on stream water chemistry in small tile-drained catchments of south Bohemia, Czech Republic, *Environmental Earth Sciences* **72**, 2195–2216.

Fučík P, Zajíček A, Duffková R, Kvítek T (2015) Water Quality of Agricultural Drainage Systems in the Czech Republic — Options for Its Improvement. In: Lee TS (Ed.), *Research and Practices in Water Quality*. 239–262.

- Gove NE, Edwards RT, Conquest LL (2001) Effects of Scale on Land Use and Water Quality Relationships: A Longitudinal Basin-Wide Perspective, *Journal of the American Water Resources Association*, **37** (6), 1721–1734.
- Helin J, Hyytiäinen K, Korpela EL, Kuussaari M (2013) Model for quantifying the synergies between farmland biodiversity conservation and water protection at catchment scale, *Journal of Environmental Management*, **131**, 307–317.
- Hintnaus I (2008) Změny ve vývoji krajiny v pramenné oblasti Blanice, BSc thesis, Faculty of Science, Charles University, Prague, 59 pp. (in Czech).
- Hönigová I, Chobot K (2014) Jemné předivo české krajiny v GIS: konsolidovaná vrstva ekosystémů, *Ochrana přírody*, **4**, 26–30 (in Czech).
- Hruška J, Johnson CE, Krám P (1996) Role of Organic Solutes in the Chemistry Of Acid-Impacted Bog Waters of the Western Czech Republic, *Water Resources Research*, **32** (9), 2841–2851.
- Hruška J, Kohler S, Bishop K (1999) Buffering processes in a boreal dissolved organic carbon – rich stream during experimental acidification, *Environmental Pollution*, **106** (1), 55–65.
- Hubbard RK, Newton GL, Hill GM (2004) Water quality and the grazing animal, *Journal of Animal Science*, **82** (13), E255–E263.
- Hughes AO, Quinn JM (2019) The effect of forestry management activities on stream water quality within a headwater plantation Pinus radiata forest, *Forest Ecology and Management*, **439**, 41–54.
- Hůnová I, Maznová J, Kurfürst P (2014) Trends in atmospheric deposition fluxes of sulphur and nitrogen in Czech forests, *Environmental Pollution*, **184**, 668–675.
- Hynčica M, Huth R (2019) Long-term changes in precipitation phase in Czechia, *Geografie*, **124** (1), 41–55.
- Kalkus J (2012) Vliv odvodňovacích příkopů na hydrologický režim lesního povodí [Impact of drainage channels on runoff regime in forest catchment], master thesis, Faculty of Science, Charles University in Prague, 94 pp. (in Czech).
- Kändler M, Blechinger K, Seidler Ch, Pavlů V, Šanda M, Dostál T, Krása J, Vitvar T, Štich M (2017) Impact of land use on water quality in the upper Nisa catchment in the Czech Republic and in Germany, *Science of The Total Environment*, **586**, 1316–1325.
- Kaste Ø, Austnes K, de Wit HA (2020) Streamwater responses to reduced nitrogen deposition at four small upland catchments in Norway, *Ambio*, **49**, 1759–1770.
- Kendall MG (1975) Rank Correlation Methods, Griffin, London, UK.
- Kliment Z, Matoušková M, Šobr M, Potůčková M, Hujšlová J (2008) Fluvial dynamics and selected methods of ecohydrological monitoring of restored Sviňovický brook channel, *AUC Geographica*, **1–2**, 125–144.
- Kliment Z, Matoušková M, Ledvinka O, Královec V (2011) Evaluation of trends in hydro-climatic long-term data series for selected mountains catchments. In: Středová H, Rožnovský J, Litschmann T (Eds.), *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí. Skalní mlýn*, 2.–4.2. ISBN 978-80-86690-87-2 (in Czech with English summary).
- Kocum J, Oulehle F, Janský B, Bůzek F, Hruška J, Vlček L (2016) Geochemical evidence for peat bog contribution to the streamflow generation process: case study of the Vltava River headwaters, Czech Republic, *Hydrological Sciences Journal*, **61** (14), 2579–2589.
- Kolář T, Čermák P, Oulehle F, Trnka M, Štěpánek P, Cudlín P, Hruška J, Büntgen U, Rybníček M (2015) Pollution control enhanced spruce growth in the “Black Triangle” near the Czech-Polish border, *Science of the Total Environment*, **538**, 703–711.

- Královec V, Kliment Z, Matoušková M (2016) Evaluation of runoff response on the basis of a comparative paired research in mountain catchments with the different land use: case study of the Blanice River, Czechia, *Geografie* **121/2**, 209–234.
- Kulhavý Z, Fučík P (2015) Adaptation Options for Land Drainage Systems Towards Sustainable Agriculture and the Environment: A Czech Perspective, *Polish Journal of Environmental Studies*, **24** (3), 1085–1102.
- Kvítek T, Žlábek P, Bystřický V, Fučík P, Lexa M, Gergel J, Novák P, Ondr P (2009) Changes of nitrate concentrations in surface waters influenced by land use in the crystalline complex of the Czech Republic, *Physics and Chemistry of the Earth*, **34**, 541–551.
- Langhammer J (2010) Water quality changes in the Elbe River Basin, Czech Republic, in the context of the post-socialist economic transition, *GeoJournal*, **75**, 185–198.
- Machordom A, Araujo R, Erpenbeck D, Ramos M (2003) Phylogeography and conservation genetics of endangered European Margaritiferidae (Bivalvia: Unionoidea), *Biological Journal of the Linnean Society*, **78** (2), 235–252.
- Mancini L, Formichetti P, Anselmo A, Tancioni L, Marchini S, Sorace A (2005) Biological quality of running waters in protected areas: the influence of size and land use, *Biodiversity and Conservation*, **14**, 351–364.
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, **13** (3), 245–259.
- Mattsson T (2010) Export of organic matter, sulphate and base cations from boreal headwater catchments downstream to the coast: Impacts of land use and climate, Ph.D. Thesis, Monographs of the Boreal Environment Research, 36 (49). Edita Prima Ltd., Helsinki. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-92-7159-7>.
- Measom KJ (2019) An HGIS Approach to Land-Use/Land-Cover Change in the Blanice Watershed, Czech Republic, Electronic Theses and Dissertations, University of Denver, Denver. 80 pp. <https://digitalcommons.du.edu/etd/1602>.
- Mcdowell R, Norris M (2014) The Use of Alum to Decrease Phosphorus Losses in Runoff from Grassland Soils, *Journal of Environmental Quality*, **43** (5):1635.
- Middelkoop H, Daamen K, Gellens D, Grabs W, Kwadijk JCJ, Lang H, Parmet BWAH, Schädler B, Schulla J, Wilke K (2001) Impact of climate change on hydro- logical regimes and water resources management in the Rhine basin, *Climatic Change*, **49**, 105–128.
- Moloney T, Fenton O, Daly K (2020) Ranking connectivity risk for phosphorus loss along agricultural drainage ditches, *Science of The Total Environment*, 703 (134556). 11 pp.
- NCA CR (2013) Consolidated layer of ecosystems [ESRI shapefile], Detailed Land use/ Land Cover Data in 41 Classes Over the Entire Territory of the Czech Republic. Version 2013. Nature Conservation Agency of the Czech Republic, Prague.
- Ockenden MC, Deasy CE, Benskin CMWH, Beven KJ, Burke S, et al. (2016) Changing climate and nutrient transfers: Evidence from high temporal resolution concentration-flow dynamics in headwater catchments, *Science of the Total Environment*, **548–549**, 325–339.
- Oulehle F, Janský B (2003) Limnologie a hydrochemismus v NPR Rejvíz. In: Janský B, Šobr M (Eds.), Jezera České republiky (Současný stav geografického výzkumu). Charles University, Prague, 93–108 (in Czech).
- Oulehle F, Hruška J (2009) Rising trends of dissolved organic matter in drinking-water reservoirs as a result of recovery from acidification in the Ore Mts., Czech Republic, *Environmental Pollution*, **157** (12), 3433–3439.
- Oulehle F, Chuman T, Majer V, Hruška J (2013) Chemical recovery of acidified Bohemian lakes between 1984 and 2012: the role of acid deposition and bark beetle induced forest disturbance, *Biogeochemistry* **116**, 83–101.

Oulehle F, Kopáček J, Chuman T, Černovous V, Hůnová I, Hruška J, Krám P, Lachmanová Z, Navrátil T, Štěpánek P, Tesař M, Evans ChD (2016) Predicting sulphur and nitrogen deposition using a simple statistical method, *Atmospheric Environment*, **140**, 456–468.

Oulehle F, Chuman T, Hruška J, Krám P, McDowell WH, Myška O, Navrátil T, Tesař M (2017) Recovery from acidification alters concentrations and fluxes of solutes from Czech catchments, *Biogeochemistry*, **132**, 251–272.

Oulehle F, Fischer M, Hruška J, Chuman T, Krám P, Navrátil T, Tesař M, Trnka M (2021) The GEOMON network of Czech catchments provides long-term insights into altered forest biogeochemistry: From acid atmospheric deposition to climate change, Hydrological Processes, Accepted Author Manuscript e14204.

Pešić AM, Brankov J, Milijašević J, Joksimović D (2020) Water quality assessment and populations' perceptions in the National park Djerdap (Serbia): key factors affecting the environment, *Environment, Development and Sustainability*, **22**, 2365–2383.

Pešková H (2015) Vyhodnocení vlivů Změny č. 1 územního plánu Zbytiny na životní prostředí Kapitola A Vyhodnocení vlivů územního plánu na udržitelný rozvoj. DHW s.r.o., Český Krumlov, 63 pp. (in Czech).

Preston SJ, Keys A, Roberts D (2007) Culturing freshwater pearl mussel *Margaritifera margaritifera*: a breakthrough in the conservation of an endangered species, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **17** (5), 539–549.

Prevost M, Plamondon AP, Belleau P (1999) Effects of drainage of a forested peatland on water quality and quantity, *Journal of Hydrology*, **214** (1–4), 130–143.

Reynolds B, Edwards AC (1995) Factors influencing dissolved nitrogen concentrations and loadings in upland streams of the UK, *Agricultural Water Management*, **27** (3–4), 181–202.

Selle B, Schwientek M, Lischeid G (2013) Understanding processes governing water quality in catchments using principal component scores, *Journal of Hydrology*, **486**, 31–38.

Seuna P (1982) Influence of forestry draining on runoff and sediment discharge in the Ylijoki basin, north Finland, *Aqua Fennica*, **12**, 3–16.

Simon OP, Vaničková I, Bílý M, Douda K, Patzenhauerová H, Hruška J, Peltánová A (2015) The status of freshwater pearl mussel in the Czech Republic: Several successfully rejuvenated populations but the absence of natural reproduction, *Limnologica*, **50**, 11–20.

Simon OP, Tichá K, Rambousková K, Bílý M, Černá M, Dort B, Horáčková J, Hruška J, Kladivová V, Švanyga J, Vydrová A (2018) Metodika podpory perlorodky říční (*Margaritifera margaritifera*), VÚV TGM, Prague, 283 pp. ISBN 978-80-87402-63-4 (in Czech).

Skeffington RA, Cosby BJ, Whitehead PG (2016) Long-term predictions of ecosystem acidification and recovery, *Science of the Total Environment*, **568**, 381–390.

Soulsby C, Malcolm R, Gibbins C, Dilks C (2001) Seasonality, water quality trends and biological responses in four streams in the Cairngorm Mountains, Scotland, *European Journal of Applied Research*, **5** (3), 433–450.

Staponites LR, Barták V, Bílý M, Simon OP (2019) Performance of landscape composition metrics for predicting water quality in headwater catchments, *Scientific Reports*, **9** (14405).

Stoeckl K, Denic M, Geist J (2020) Conservation status of two endangered freshwater mussel species in Bavaria, Germany: Habitat quality, threats, and implications for conservation management, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **30**, 647–661.

Švanyga J, Simon O, Mináriková T, Spisar O, Bílý M (2013) Záchraný program Perlorodky říční (*Margaritifera margaritifera*) v České republice, NCA CR, Prague, 151 pp. (in Czech).

Taskinen J, Berg P, Saarinen-Valta M, Väilä S, Mäenpää E, Myllynen K, Pakkala J (2011) Effect of pH, iron and aluminum on survival of early life history stages of the endangered freshwater pearl mussel, *Margaritifera margaritifera*, *Toxicological & Environmental Chemistry*, **93** (9), 1764–1777.

Torrent J, Barberis E, Gil-Sotres F (2007) Agriculture as a source of phosphorus for eutrophication in southern Europe, *Soil Use and Management*, **23**, 25–35.

VUMOP (2019) Information system of amelioration. <https://meliorace.vumop.cz/?core=app>. Accessed 20 Nov.2019.

VUV (2019) DIBAVOD. Water Management Geodatabase. VUV TGM, Prague. <<http://www.dibavod.cz/>>

Wanner F, Simon O, Kladivová V (2012) Decrease in the trophic status of a second-order oligotrophic stream (Zbytinský Potok) by a new wastewater treatment plant with two low-loaded stabilisation ponds, *Silva Gabreta*, **18** (1), 23–34.

Whitehead PG, Crossman J (2012) Macronutrient cycles and climate change: Key science areas and an international perspective, *Science of the Total Environment*, **434**, 13–17.

Stabilní izotopy vodíku a kyslíku v hydrologické praxi

Martin ŠANDA

ČVUT v Praze, F. stavební, email: martin.sanda@fsv.cvut.cz

Úvod

Rozvoj moderních analytických metod a pokles jejich ceny (pořizovací i provozní), jakož i snížení náročnosti obsluhy umožňuje v posledních dekádách řadu dříve rutinně neprováděných analýz v mnoha oborech vědy a praxe včetně hydrologie. Kromě stanovování obsahu látek v substanci (např. obsah iontů či organických látek ve vodě) lze nyní běžně analyzovat i obsah různých izotopů. Izotopové metody ve forenzní praxi se v posledních 10–20 let rozšířily do řady odvětví, nejen experimentální hydrologie nebo sledování vývoje klimatu, ale i kriminalistiky, nebo kontroly potravinářských výrobků. Tyto metody dnes běžně používají i kontrolní orgány v ČR. Sledování stabilních izotopů vyskytujících se v molekule vody (izotopy kyslíku a vodíku) ve srážkách, odtoku v řekách a v podzemní vodě, patří v mnoha zemích k rutinní praxi již po 2 dekadách (např. Rakousko, Německo, Švýcarsko). Další evropské země potřebu sledování těchto základních izotopů ve vodě též pochopily a své sítě sběru srážek a povrchových vod pro izotopové složení nyní budují (např. Slovinsko, Španělsko, Moldávie, Finsko, Estonsko, Francie, Portugalsko, Rumunsko, Maďarsko). V ČR se státní správa snaží získávat potřebné informace o vodách kvantitativními a kvalitativními metodami, které tvoří vítaný a nutný základ pro izotopovou nadstavbu. Zároveň tyto organizace mají potřebný personál hydrometeorologických stanic a provádí sběr vzorků povrchových a podzemních vod a potřebné laboratorní zázemí. Dodatečné investice do přístrojového vybavení jsou tak relativně malou položkou v celém procesu. V ČR jsou doposud jedinými pravidelnými stanicemi izotopového složení srážek ve vědecké síti GNIP (MAAE) Praha a Jizerské hory (obě spolupřevzvané autorem) (IAEA, 2020). Experimentálně na krátkodobém grantovém základě se kromě ČVUT v Praze zabývá sběrem nebo i analýzou stabilních izotopů např. ČGS, VÚMOP v.v.i. nebo AV ČR, ÚH.

Tento příspěvek přináší ukázkou z vinařské praxe v regionu jižní Moravy k získání přehledu izotopového složení možné závlahové vody mající vliv na izotopové složení hroznů révy vinné, jež je rutinně kontrolována pro regionální původ vín. S postupně se oteplicím klimatem jižní Moravy totiž stále více vinohradníků přistupuje k zavlažování vinohradů. Obecným jevem jak pro srážky, tak vodu povrchovou a v menší míře i půdní a podzemní je sezónní variabilita. Koncentrace stabilních izotopů O a H vod analogicky kopíruje průběh teplot během roku. Jelikož je voda půdní a zvláště pak voda podzemní smíšená ze srážek ze všech ročních období, často mnoha let i desetiletí, má blízkou izotopovou koncentraci té dlouhodobě průměrné ve srážkách (Šanda et al., 2019). Izotopová sezónní rozkolísanost povrchových toků je tak menší než je ve srážkách a izotopová minima a maxima jsou zpravidla posunutá za srážkovými v čase. Vzájemný poměr izotopů O a H je ve srážce téměř konstantní lze jej proložit, tzv. lokální meteorickou čarou vody, nepatrně odlišnou od empiricky stanovené globální meteorické čáry vody (Craig, 1961). Pokud se voda začne volně vypařovat (z půdního povrchu, řeky, nádrže nebo i z plodů) výsledné body se dostávají pod tuto čáru.

Srážky dopadající na zemský povrch jsou ve smyslu infiltrace do půdního profilu v letním období podstatně redukovány výparem z holé půdy, případně transpirací vegetačního krytu vinohradů. Část vody se zachytí na listech a odpaří se zpět do ovzduší. Oproti tomu v zimním období má srážka větší šanci infiltrovat do půdního prostředí a to i hlouběji, jelikož nižší teploty ovzduší omezují výpar z půdního povrchu a rostliny ve vegetačním klidu bez listů neodebírají vodu kořenovým systémem. Ideálním jevem pro nasycení půdy a doplnění podzemní vody je dlouhodobé tání mocné sněhové pokrývky, které je v naší zemi (a jihomoravském regionu zvláště) stále vzácnější. Izotopové složení srážek dlouhodobě sleduje roční průběh teplot (zimní izotopově lehčí a v létě izotopově těžší). Letní

nevýhodná situace pro hlubší infiltraci vody způsobuje, že podzemní voda pro danou oblast má mírně izotopově lehčí složení než je dlouhodobý izotopový průměr srážek pro daný region.

Procesy proudění vody v půdě lze schématicky rozdělit na dva. Prvním je gravitační, prostý pohyb vody vertikálně směrem dolů vyvolaný srážkou, závlahou, (případně táním sněhu nebo záplavou) a uplatňuje se významně, pokud je půda plně nebo vysoce nasycená vodou (Hillel, 2005). K tomu v případě jižní Moravy dochází jen při významných srážkách u půdního povrchu, nebo při cílené, povětšinou kapkové závlaze. Druhým procesem pohybu vody v půdním prostředí je pohyb kapilární. Ten je všesměrný, voda se může pohybovat i do stran, nebo vzlínat k zemskému povrchu. Hnací silou v tomto případě je rozdíl vlhkostí resp. jim odpovídajících kapilárních podtlaků. Vztah objemové půdní vlhkosti a kapilárního tlaku definuje tzv. retenční čára půdní vlhkosti (van Genuchten, 1980). Půdní prostředí si lze představit jako svazek kapilár řádově různých průměrů. Čím jsou půdní částice a tedy i póry (kapiláry) užší, tím je voda držena větší silou a je méně dostupná pro rostlinu. Dalším faktorem významně ovlivňujícím množství pohybující se vody je tzv. hydraulická vodivost (často uváděná jako propustnost). Ta je závislá na zrnitostním složení a uspořádání částic a aktuální vlhkosti půdy (v prostředí jihomoravských vinohradů se jedná převážně o černozemě s převažující hlinitou frakcí (25% písek, 65% hlína (silt), 10% jíl, vzorek z vinohradu ZD Sedlec). Maximální hodnotu dosahuje při plném nasycení půdy vodou a s ubývajícím vlhkostí podstatně klesá (lineární pokles vlhkosti způsobuje řádový pokles hydraulické vodivosti). V praxi to znamená, že pokud není půda plně nebo velmi nasycená, je proudění vody z krátkodobého hlediska téměř zanedbatelné a z dlouhodobého jen méně významné oproti proudění nasycenému. Jeho relativní význam narůstá v dlouhodobě nenasyčených půdách, čemuž odpovídají nezavlažované vinohrady.

Transport jednotlivých izotopových variant vodních molekul je kombinací samotného proudění vody v půdě (advekce), nerovnoměrného pohybu vody u stěn půdních zrn a uprostřed pórů (disperze) a nahodilého pohybu molekul (difuze). Zachytávání na půdních zrnech (adsorpce) a rozpad těchto izotopů (degradace) neprobíhá.

Metodika

V současnosti ani zpětně není možné použít žádná státem pořizovaná izotopově hydrologická data z České republiky a s omezenou platností lze právě využít data zahraniční. V blízkém zahraničí této studie je to stanice Vídeň (MAAE), Zistersdorf, Ottenstein im Waldviertel pro stanice srážkové a např. Drasenhofen pro podzemní vodu nebo Angern an der March pro vodu v řece Moravě (H₂O Fachdatenbank, 2020 a Wasserisotopenkarte Oesterreichs 2020). Z důvodu chybějících dat stabilních izotopů kyslíku a vodíku v povrchových tocích, srážkách a půdní vodě nejen v tomto regionu ČR bylo přistupeno k odběrné kampani během vegetačního období 2020, kdy jsou pravidelně sbírány srážky v oblasti Mikulova, voda z řek a nádrží v jihomoravském regionu a v lokalitě Sedlec u Mikulova voda půdní a voda podzemní.

Kapková závlaha je na vinohradech ZD Sedlec prováděna v pětidenním cyklu, kdy je voda odkapávána z výšky 1 m nad půdním povrchem a po 24 hodin voda skapává na stejná místa půdy. Vodu přirozeně rozptyluje proudění vzduchu, přesto ovlivňuje jen úzký pás (maximálně 1 m šířky) podél řádku keřů révy vinné (obr. 1), kdy u podnoží révy vzniká nasycené proudění vody s rychlým vertikálním pohybem vody ke kořenům a částečným přísávaním vody do stran. Z výše uvedeného je zřejmé, že množství vody je aplikováno selektivně na zlomek plochy, než na jakou dopadá dešť a tak se tato voda dostává velmi efektivně ke kořenovému systému, který promývá a částečně i podtéká. To má zásadní vliv i na izotopové složení půdní vody. Ve zbývajících čtyřech dnech závlahového klidu, kdy se zavlažují jiné sektory, má tak rostlina příležitost čerpat vodu v místě kořenového systému a snižovat tak půdní vlhkost a tím do tohoto místa přísávat vodu hlubší, mělkí i případně vodu dříve kapilárně odsátou do stran. Tvar oblasti závlahou zvlhčené půdy v kořenové zóně ve vertikálním řezu napříč řádkem lze přirovnat k tvaru hroznu. K závlaze se přirozeně přičítá i vliv deště, mísí se tak dva jevy, jak z hlediska množství vody, tak i izotopového složení. Závlaha je prováděna jen ve vegetačním období (zpravidla od června do srpna), kdy je izotopové složení říční vody téměř nejtěžší. Tím se pak může do prostředí ve velkém množství dostávat izotopově jiná voda než je ta, kterou půdní profil obsahuje z předchozího zimního a jarního, případně víceletého období. Letní vypadlé srážky bývají izotopově ještě těžší, než je

závlahová voda, záleží však na množství a možnosti takových srážek dosáhnout kořenového systému a zároveň musí být půdní voda v dostupné vlhkosti pro rostlinu. Aplikace závlahy je prostorově a časově omezená s cílem maximální efektivity, v půdě vzniká lokálně nasycené proudění s výbornou dostupností vody pro rostlinu. Srážka je prostorově neomezená a časově i množstevně nahodilá, redukována výparem z celé plochy půdního povrchu.



Obr. 1 Kapková závlaha vinohradu ZD Sedlec, keře 1 m, řádky 3 m vzdáleny

Voda aplikovaná formou kapkové závlahy (obr.1) způsobuje změnu izotopového složení půdní vody, jelikož se jedná o komplexní proces proudění vody v půdě s transportem látky, která je v tomto případě přímo v molekule vody. Z praktického hlediska v této studii rozlišujeme půdní vodu na mobilní (blíže k nasycení) a méně mobilní nebo nemobilní (ve stavu nižšího nasycení), kdy používáme orientační hydrolimity: polní vodní kapacity (zbývající kapilární voda, poté, kdy odeče voda gravitační – vlhkost odpovídající kapilárnímu podtlaku -0.3 atm.), bod vadnutí (kapilární podtlak -15 atm.) a bod snížené dostupnosti (50% využitelné vodní kapacity, jako polovina rozmezí mezi polní vodní kapacitou a bodem vadnutí (Litschmann et al, 2018)).

Mobilní půdní voda je pro izotopovou analýzu získávána odsáváním přímo v terénu přes porézní keramiku do plastové trubice (obr. 2). Ta je v půdním profilu zatěsněna jílem k zamezení stékání povrchové vody a svrchu opatřena gumovou zátkou. Vzduch je odsát ruční vakuovou pumpičkou a následující den je odčerpána voda filtrovaná z půdy do keramického kalíšku. Aplikovaný podtlak je zhruba -0.6 atm vůči tlaku atmosferickému. Takto lze akumulovat vodu vyskytující se ve větších pórech, tj. vodu nejpohyblivější, nelze však sbírat půdní vodu, pokud hodnota kapilárního tlaku klesne pod hodnotu -0.6 atm (běžný limit sacího čerpadla), tj. tato metoda je úspěšná u zavlažovaných vinic a téměř neúspěšná u nezavlažovaných, odběr lze provádět opakovaně. Celková půdní voda je získávána extrakcí vody z vyvrtaného půdního vzorku promísením s izotopově známou vodou, odstředěním a měřením směsi s dopočtem. Její použití půdní vlhkost neomezuje, jedná se však o destruktivní a jednorázové měření v daném místě půdního profilu.



Obr. 2 Demonstrační foto podtlakových sběračů půdní pórové vody z půdy v hloubce 30 a 90 cm půdního profilu černozemě (ZD Sedlec) – plastová trubice opatřená keramickým porézním kalíškem. Reálná instalace je provedena ručním vrtáním v linii řádku mezi keři révy.

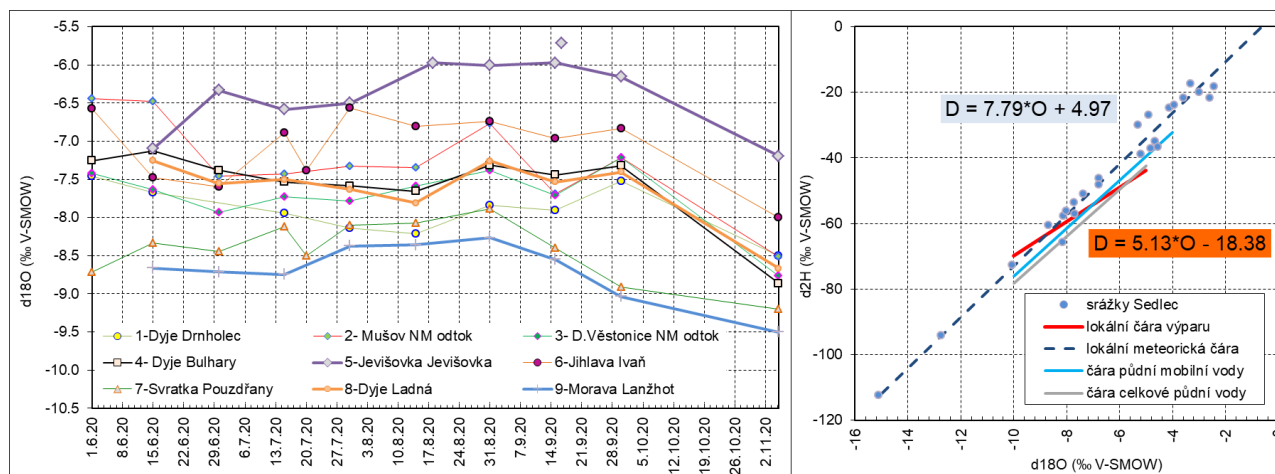


Obr. 3 Kořeny révy vinné pouze vždy zavlažované (8 sezón) ZD Sedlec, hloubka kořenové zóny 10–70 cm). Mřížka cca 10x10 cm (vlevo). Kořeny révy vinné nezavlažované ZD Sedlec, hloubka jemné kořenové zóny 10–40 cm), hluboké kořeny dosahují až do viditelné hloubky zde 170 cm, kde nekončí (vpravo).

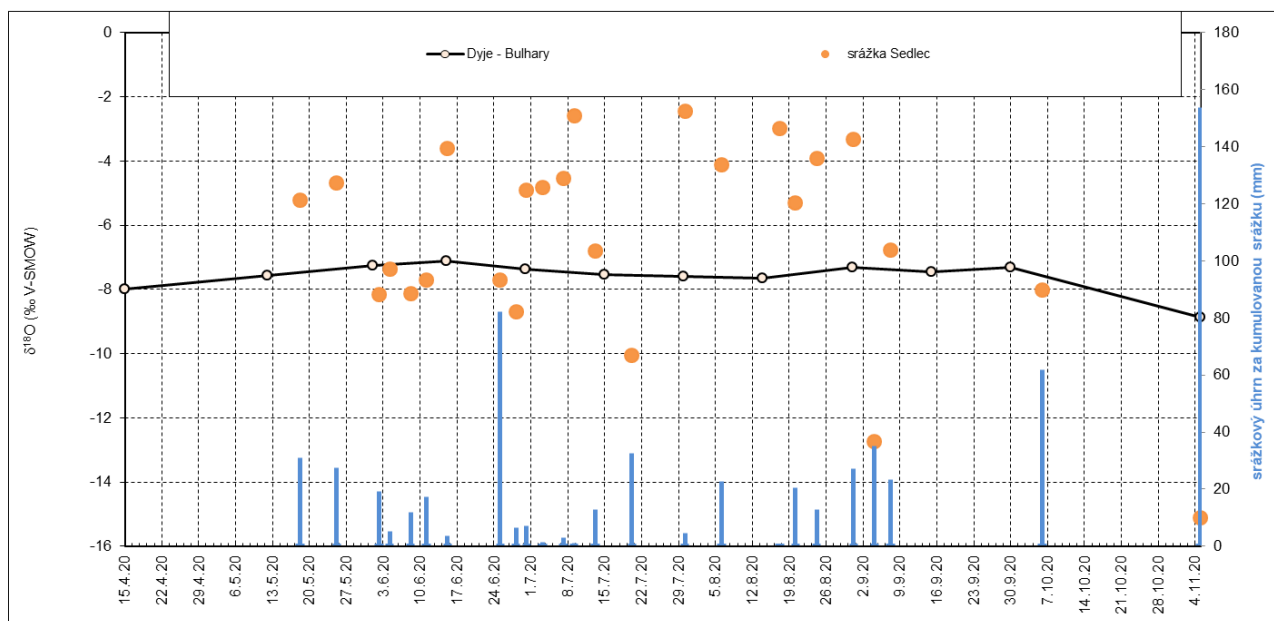
Výsledky

Na obrázcích 4–7 prezentovaná měření byla provedena formou laserové spektroskopie (Penna et al., 2010) na ČVUT v Praze, F. stavební s typickou směrodatnou odchylkou $\delta^2\text{H} \pm 1\text{‰}$ V-SMOW, $\delta^{18}\text{O} \pm 0.1\text{‰}$ V-SMOW s výjimkou kumulované chyby přípravy a měření celkové půdní vody $\delta^{18}\text{O} \pm 0.5\text{‰}$ V-SMOW.

Voda odtékající z horských poloh (Morava pramenící v Jeseníkách s přítokem Bečvy z Beskyd) je izotopově lehčí než např. voda odtékající Jevišovkou (regionální tok pramenící v teplém klimatu jižní Moravy). Na řece Dyji je znatelný vliv v soustavě Novomlýnských nádrží, jež svou rozlehlostí a především malou mocností vodního sloupce podporuje procesy výparu a tím i izotopové zahuštění vody. Vodou izotopově lehčí je Svatka, přitékající z chladnějších poloh Vysočiny. Řeka Jihlava, též pramenící v prostředí Vysočiny však přináší do soustavy vodu poměrně izotopově těžkou, jelikož její tok v komplexu VD Dalešice a VD Mohelno slouží pro provoz JE Dukovany. Zde se voda využívá k chlazení a je intenzivně vypařována v chladicích věžích. Zbytková voda vytékající do VD Mohelno je potom podstatně zahuštěna o těžší izotopy O a H (Skryjský potok 21.7.2020: $\delta^{18}\text{O} = -2.32\text{‰}$ a $\delta^2\text{H} = -23.0\text{‰}$) a tak Jihlava tvoří po Jevišovce druhou izotopově nejtěžší vodu v regionu jižní Moravy (obr. 4 vlevo). V budoucnu při očekávaném nedostatku vody se můžeme setkat i s úvahou zavlažovat vodou z Dunaje, izotopově velmi lehkou z velehor Alp (roční průměry mezi $\delta^{18}\text{O} = -12.0\text{‰}$ až -10.5‰) (Rank et al., 2014). Ze vzájemného porovnání koncentrace molekul s těžšími izotopy O a H mezi sebou pak můžeme určit i velikost odpaření v daných podmínkách teploty a relativní vlhkosti prostředí.



Obr. 4 Průběh $\delta^{18}\text{O}$ v povrchových tocích v regionu jižní Moravy ve vegetačním období 2020 (vlevo). Průběh $\delta^2\text{H}$ a $\delta^{18}\text{O}$ v řekách (formou lokální čáry výparu), půdní vodě a ve srážkách (ZD Sedlec u Mikulova) (únor až listopad 2020) (vpravo)

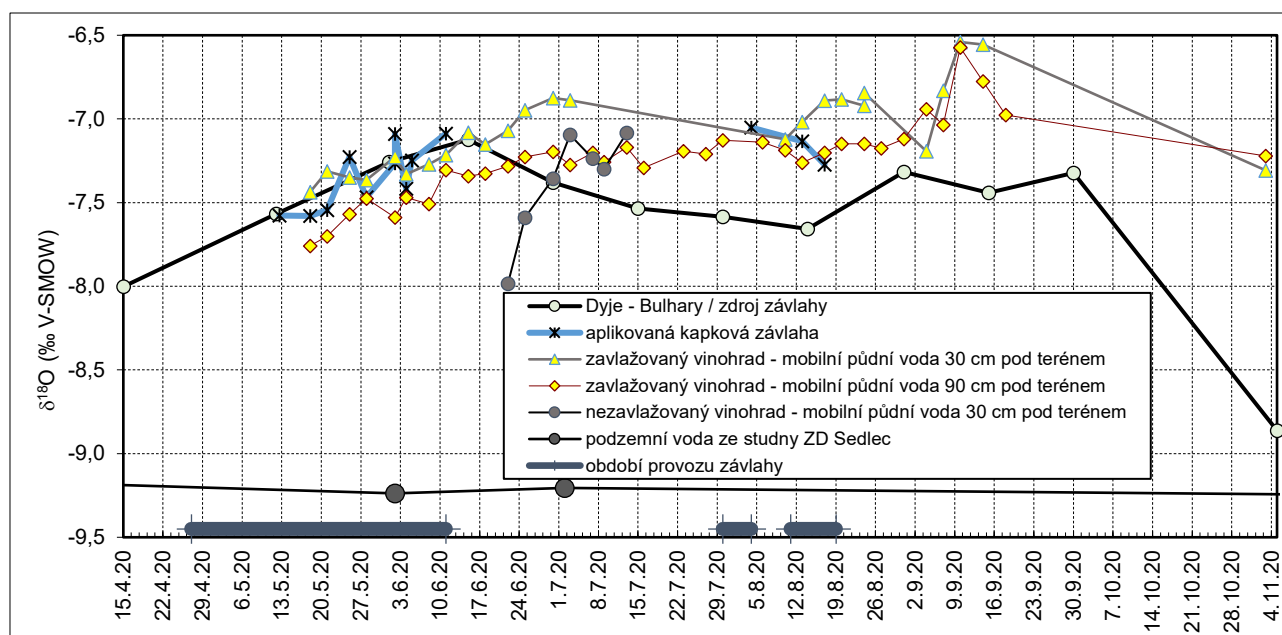


Obr. 5 Průběh $\delta^{18}\text{O}$ v Dyji a ve srážkách na vinohradu ZD Sedlec. Srážkové úhrny z meteostanice Sedlec u Mikulova.

Celkem bylo v roce 2020 v ZD Sedlec aplikováno závlahou z profilu Dyje-Bulhary s otevřeným vodojemem v trase mezi profilem na řece a zavlažovanou lokalitou 344 litrů vody/keř révy vinné. Denní množství během závlahového cyklu odpovídá 28.7 litrů vody/keř. Pokud uvažíme přístup, že je zavlažován pás 0.5 m od kapkové linie na obě strany (obr. 1), při vzdálenosti keřů 1 m se jedná o plochu $1 \text{ m}^2 / \text{keř}$. Za období 29.4.20–19.8.20 bylo aplikováno v pásu závlahy 344 mm vody (převážně v období do 11.6.20), intenzita v závlahovém dni je 28.7 mm/den. Za období 29.4.20–8.9.20 napadlo na lokalitě 409.8 mm, resp. od 8.9.20 k období sklizně 13.10.20, resp. 20.10.20 na zavlažované i nezavlažované lokalitě napadlo dalších 94.5 mm, resp. 182.4 mm, což celkově za období 29.4.20–20.10.20 tvoří 344 mm závlahy a 592.2 mm srážky (srážková data ze stanice Sedlec u Mikulova, závlahová data agronom ZD Sedlec, ing. Z. Zvonek). V roce 2020 z důvodu zmenšené závlahy, která vlivem sucha v dubnu začala dříve než obvykle s izotopově lehčí jarní vodou a následně zvýšené srážkové aktivity frontálních izotopově lehčích dešťů (především červen 2020), kdy byla závlaha prakticky ukončena, je vrchní část půdních profilů bez i se závlahou během vegetačního období 2020 víceméně izotopově shodná (obr. 7 vpravo).

Podzemní voda v lokalitě ZD Sedlec u Mikulova (neovlivněná spojitostí s tokem Dyje) má $\delta^{18}\text{O} = -9.2\text{‰}$ po celou dobu sledovaného vegetačního období, zatímco jediná dlouhodobě dostupná hodnota izotopového váženého průměru srážek v širším regionu je ze stanice Vídeň (2009–2018) s $\delta^{18}\text{O} = -8.94\text{‰}$ (IAEA, 2020). Takovou hlubší půdní a podzemní vodu z části odebírají nezavlažované vinohrady, kde mají rostliny vyvinuté velmi hluboké kořeny (obr. 3).

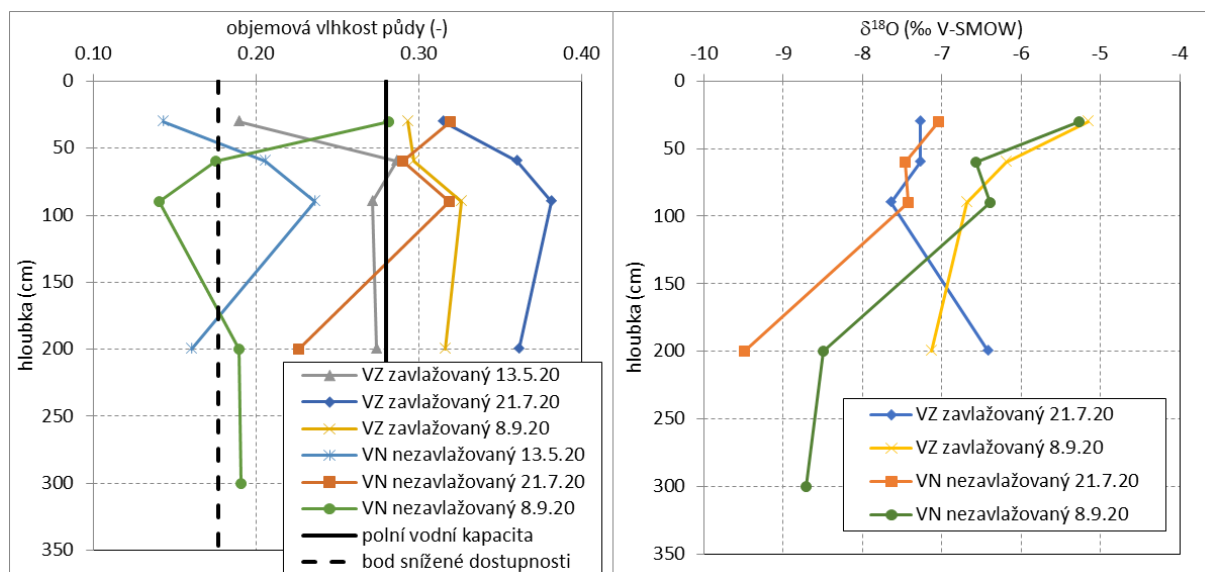
Je zřejmé, že $\delta^{18}\text{O}$ v mobilní půdní vodě (nejlépe využitelné pro rostliny) následují hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ v závlaze a to přímo v 30 cm a s určitým zpožděním v 90 cm hloubky půdního profilu (obr. 6). Srážky v období 30.7.20–31.8.20 jsou výrazně izotopově těžké ($\delta^{18}\text{O} = -6.8\text{‰}$ až -2.4‰), mají však na změnu izotopového složení mobilní půdní vody mizivý vliv. Pouze v období počátku září 2020 došlo k mírnému nárůstu izotopové hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ v mobilní půdní vodě vlivem deště na předtím zavlažovaném vinohradu. Výrazně redukovaný vliv srážky na mobilní půdní vodu dobře ilustruje i čtyřtýdenní kumulativní vzorek srážky po skončení vegetační sezóny od 7.10.20–4.11.20 o úhrnu 153.9 mm, $\delta^{18}\text{O} = -15.1\text{‰}$, (vážený průměr srážek předtím: 18.5.2020 – 6.10.20: $\delta^{18}\text{O} = -7.1\text{‰}$) tj. pokles o $\delta^{18}\text{O} = 8\text{‰}$. Oproti tomu je pokles izotopového složení u Dyje-Bulhary z 30.9.20 $\delta^{18}\text{O} = -7.32\text{‰}$ k 5.11.20 $\delta^{18}\text{O} = -8.86\text{‰}$ o $\delta^{18}\text{O} = 1.54\text{‰}$ a u mobilní půdní vody ve 30 cm hloubce (10.9.20 $\delta^{18}\text{O} = -6.57\text{‰}$, 3.11.20 $\delta^{18}\text{O} = -7.31\text{‰}$, tj. pokles jen $\delta^{18}\text{O} = 0.74\text{‰}$).



Obr. 6 Průběh $\delta^{18}\text{O}$ v závlahovém zdroji (Dyje/Bulhary), kapkové závlaze přímo na vinohradu (za vloženým vodojemem) v půdní mobilní vodě (vinohrady ZD Sedlec u Mikulova) a podzemní vodě.

Maximální objemová vlhkost půdy se na vinohradech ZD Sedlec pohybuje kolem 40% (odhad dle tzv. pedotransferových funkcí na základě zrnitostního složení, polní vodní kapacita=28%, bod snížené dostupnosti 18% a bod vadnutí 7.5%, (Schaap et al., 1998)), (obr. 7 vlevo). Např. při plném nasycení je ve 2 m půdního profilu až 800 mm vody. To odpovídá více jak dlouhodobému ročnímu srážkovému úhrnu v oblasti. Ve skutečnosti je dlouhodobá vodní zásoba v půdě nižší, v průměru zhruba poloviční (obr. 7 vlevo), avšak sledované půdní profily jsou ještě hlubší. Nezavlažované keře révy tak mají možnost odebírat vodu přítomnou v mělkém kořenovém systému (zhruba do 40 cm hloubky (obr. 3), která je aktuálnější, např. za poslední půlrok s vlivem aktuálních srážek a pak vodu hlubší pomocí vyvinutých hlubokých kořenů, jež odpovídá dlouhodobému izotopovému průměru vody ze srážek. V případě suššího vegetačního období tak rostlina odebírá více vody z hlubších poloh, v případě srážkově vydatné letní činnosti může být podíl aktuální vody blíže povrchu vyšší. Pokud je použita kapková závlaha na nové výsadbě, rostlina vůbec hluboké kořeny nevytvorí a odebírá tak vodu pouze z hloubek cca 10–70 cm (obr. 3 vlevo), pokud byla rostlina dříve nezavlažována, její hlubší kořeny postupně ztrácejí funkci.

V mělkém půdním profilu obou typů vinohradů je pozorovatelné těžknutí celkové půdní vody vlivem letních srážek v červenci a srpnu. V hloubce 30 cm je tento rozdíl mezi 21.7.20 a 8.9.20 cca $\delta^{18}\text{O} = 2\%$. V hloubce 90 cm jen cca $\delta^{18}\text{O} = 1\%$. Patrný rozdíl $\delta^{18}\text{O}$ na zavlažovaném a nezavlažovaném vinohradu je vidět hloubce 200 cm (až $\delta^{18}\text{O} = 3\%$, obr. 7 vpravo). Závlaha je izotopově těžší, zřejmě i z přechodných vegetačních sezón zatímco v nezavlažovaném profilu se izotopové hodnoty přibližují hodnotě lehčího dlouhodobého průměru v podzemní vodě.



Obr. 7 Průběh objemové vlhkosti půdy a $\delta^{18}\text{O}$ v celkové půdní vodě na vinohradech ZD Sedlec. (izotopové hodnoty z 13.5.20 nedoměřeny z důvodu pandemických opatření)

Závěr

Dostupná závlaha z místních toků nemusí splňovat kritéria izotopové shody s vodou srážkovou jako primárním zdrojem vody a tak jejich kombinací může vznikat širší rozmezí výsledných izotopových hodnot produktů. S tímto faktem je nutné počítat při posuzování autentičnosti regionální zemědělské produkce.

Závěrem lze konstatovat, že převážně nenasycené půdní profily vinohradů ZD Sedlec a to i v případě závlahy mají velkou objemovou kapacitu pro vodu a tím vytváří dlouhodobou zásobu včetně daleko méně proměnlivého izotopového složení vody než je ve srážkách. V případě závlahy, vytvářející dočasně nasycené podmínky je půdní profil promyt takovou vodou i hlouběji pod kořenový systém. U nezavlažovaného vinohradu časová proměnlivost $\delta^{18}\text{O}$ blíže půdnímu povrchu reflektuje aktuální izotopové složení srážek výrazně redukovane, v hlubších polohách proměnlivost dále $\delta^{18}\text{O}$ klesá, izotopové složení se blíží podzemní vodě.

Poděkování

Autor děkuje pracovníkům Vinařství Ludwig s.r.o a ZD Sedlec u Mikulova za financování výzkumu a terénním sběr vzorků vody odkrytí půdních profilů a spolupráci při odběru půdních vzorků.

Zdroje

Craig, H. (1961) Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, **133**, 1702–1703. <http://dx.doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>.

H2O Fachdatenbank, Teil der WISA Familie. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Cit. 8.2.2020 na adrese <https://wasser.umweltbundesamt.at/h2odb/fivestep/abfrageQdPublic.xhtml>.

Hillel, D. (2005) *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Academic Press. ISBN 978-0-12-348530-4.

IAEA (2020) Global Network of Isotopes in Precipitation. Cit. 8.2.2020 na adrese http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_isohis.html.

Litschmann, T., Rožnovský, J., Salaš, P. (2018) Teplotní a vlhkostní režim písčitých půd z hlediska zásobování rostlin vlhkou v období 2009–2015. Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds): *Hospodaření s vodou v krajině Třeboň 21. – 22. 6. 2018*, ISBN 978-80-87361-83-2.

Penna, D.; Stenni, B.; Šanda, M.; Wrede, S.; Bogaard, T.A.; Gobbi, A.; Borga, M.; Fischer, B.M.C., Bonazza, M, Bogaard, TA; Charova, Z. (2010). On the reproducibility and repeatability of laser absorption spectroscopy measurements for d2H and d18O isotopic analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2010, **14** (1), 1551–1566. ISSN 1027-5606.

Rank, D., Wyhlidal, S., Schott, K., Jung, M., Heiss, G., Tudor, M. (2014). A 50 Years' Isotope Record of the Danube River Water and Its Relevance for Hydrological, Climatological and Environmental Research. *Acta zool. bulg., Suppl.* **7**, 2014: 109–115.

Schaap, M.G., Leij F.J. and van Genuchten M.Th. (1998). Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **62**:847–855.

Šanda, M.; Vitvar, T.; Jankovec, J. (2019). Seasonal subsurface water contributions to baseflow in the mountainous Uhlířská catchment (Czech Republic) *Journal of Hydrology and Hydromechanics.*, **67** (1), 41–48. ISSN 0042-790X.10.2478/johh-2018-0018.

van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* **44**:892–898.

Wasserisotopenkarte Oesterreichs (2020). Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Cit. 8.2.2020 na adrese <https://secure.umweltbundesamt.at/webgis-portal/isotopen/map.xhtml>.

Aktualizace rozvodnic základních ploch povodí 4. řádu s využitím DMR5G jako klíčového podkladu při odvozování hydrologických údajů

Radovan TYL, Jana MATULOVÁ

Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 17, Praha 4, Česká republika, email: radovan.tyl@chmi.cz, jana.matulova@chmi.cz

Úvod

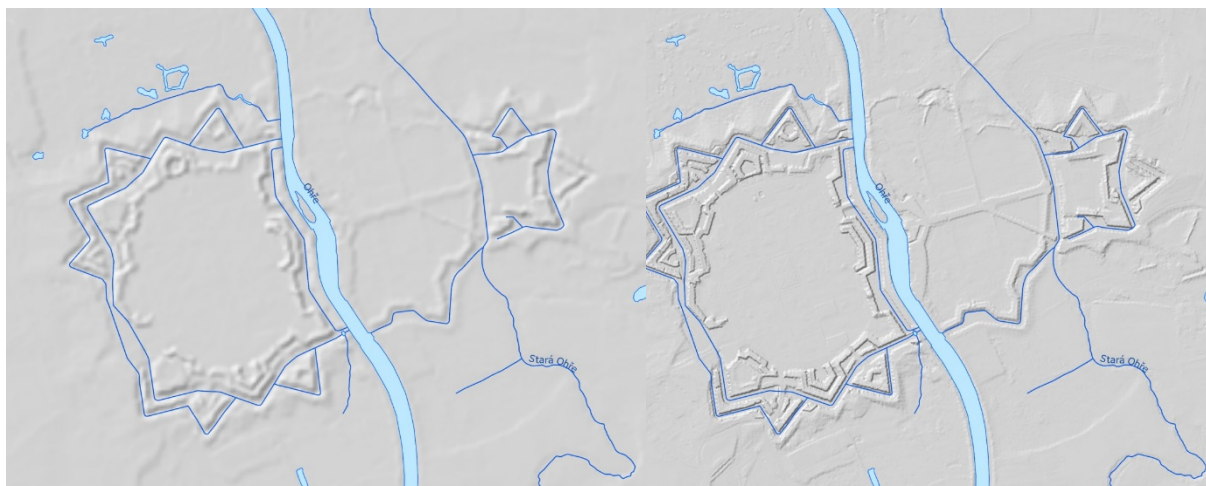
Plocha povodí patří podle normy ČSN 75 1400 mezi standardní hydrologické údaje a je nezbytnou vstupní hodnotou při odvozování dalších standardních i nestandardních hydrologických údajů. Současně je velikost plochy povodí veličina, ke které se vztahuje celá řada dalších hydrologických ukazatelů snadno pak mezi sebou porovnatelných, např. specifický odtok či úhrn srážek. Proto je co nejpřesnější stanovení plochy povodí s využitím nejpodrobnějších podkladů jeden ze základních požadavků v hydrologické praxi.

Digitální model reliéfu 5. generace (DMR5G) byl Zeměměřickým úřadem (ZÚ) dokončen na celém území ČR k 30. 6. 2016. Zcela zásadně zpřesňuje informace o reliéfu povrchu oproti digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR4G), viz *Obr. 1*. Aktualizace vodních toků z digitálního mapového díla Základní báze geografických dat (ZABAGED) s využitím leteckého laserového skenování byla na celém území ČR dokončena v červnu 2019. Využití výškopisu DMR5G a zpřesněného polohopisu vodstva včetně určené topologie vodních toků slouží jako podklad pro aktualizované vymezení rozvodnic základních hydrologických ploch povodí 4. řádu.

Rozvodnice jsou, stejně jako v minulosti, aktualizovány s ohledem na odtokové poměry při menších průtocích, nikoli na povodňové situace, kdy mohou být odtokové poměry (a tudíž i rozvodnice) výrazně odlišné.

Projekt aktualizace rozvodnic nad DMR5G je financován v rámci institucionální podpory dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace a je řešen od roku 2018, započal tedy již před dokončením zpřesnění vodních toků ZABAGED. Projekt končí v příštím roce, tedy v prosinci 2022.

Současně jsou při aktualizaci rozvodnic s využitím DMR5G zohledňovány a zapracovávány výsledky harmonizace vodních toků řešené v rámci projektu Rozvoj ISVS Voda pod patronací ministerstva zemědělství (MZe), kde je Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) zapojen jako organizace odpovědná za územní identifikaci rozvodnic dle vyhlášky 252/2013 Sb. a na které má výsledek změn ve vrstvách vodních toků zásadní vliv. V rámci projektu probíhá v současné době sjednocení datových sad páteřních vodních toků ZABAGED, CEVT (Centrální evidence vodních toků), případně Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD).



Obr. 1 Ilustrativní porovnání podrobnosti DMR4G a DMR5G formou stínovaného reliéfu v lokalitě pevnosti Terezín

Podkladová data

Aktualizace rozvodnic probíhá nad jednotnými podkladovými daty napříč všemi sedmi pobočkami ČHMÚ. To umožňuje využití serverového řešení ArcGIS Enterprise, kde jsou podkladová data uložena a sdílena. Více je použítá technologie popsána v následující kapitole.

Primárním zdrojem pro aktualizaci rozvodnic povodí 4. řádu je samozřejmě digitální model reliéfu 5. generace Zeměměřického úřadu s rozlišením rastru 2x2 m. Dalšími nezbytnými podklady jsou informace o strukturálním a geometrickém uspořádání vodních toků. Geometrie vodních toků je přebírána z dat státního mapového díla ZABAGED, struktura páteřních vodních toků je určena také datovou sadou vodních toků ZABAGED s tím, že v rozporuplných oblastech mezi datovou sadou podniků Povodí a Lesů ČR CEVT a ZABAGED je struktura toků navrhována, připomínkována a odsouhlasována právě v rámci projektu Harmonizace páteřních vodních toků ISVS Voda. Odsouhlasené změny jsou následně ve zhruba půlročních cyklech zapracovány do datové sady vodních toků ZABAGED.

Nezbytnými podklady jsou další vrstvy ZABAGED, například vodní plochy, propustky nebo bodová vrstva s názvem „Uzlový bod říční sítě“, kde jsou v atributech obsažené informace o křížení, soutocích, pramenech či pseudouzlech vodních toků. Využívány jsou mapové kompozice ZÚ s ortofoto snímky a základní mapou ČR v měřítku 1:10 000. Současně se využívají data poskytovaná v rámci projektu Harmonizace vodních toků ISVS Voda – jsou to zahraniční vodní toky zprostředkované od ZÚ, datová sada hlavních odvodňovacích zařízení od Státního pozemkového úřadu (SPÚ, tzv. linie HOZ) a vodní toky CEVT MZe.

Páteřním vodním tokem se rozumí hlavní vodní tok v povodí 4. řádu. Páteřní tok je určen vlastním identifikátorem v datové sadě vodních toků ZABAGED.

Na území hlavního města Prahy jsou k aktualizaci rozvodnic dále využívána data o dešťové kanalizační síti a přilehlých odvodňovacích plochách Pražské vodohospodářské správy (PVS) a data o podrobných vodních tocích, které spravuje Odbor ochrany prostředí magistrátu hlavního města.

Technologické řešení

Jako technologie pro aktualizaci rozvodnic byla využita platforma ESRI se všemi jejími využitelnými komponentami a vazbami *data-báze-desktopová aplikace-server*. Jedná se o technologii, která se na hydrologii v ČHMÚ dlouhodobě využívá (nejen) při odvozování hydrologických posudků (základních hydrologických údajů).

Editovaná data jsou uložena v relační databázi Oracle s nadstavbou SDE s multiuživatelským přístupem. Podkladová data jsou sdílána prostřednictvím gisového serveru, editace a aktualizace rozvodnic probíhá pomocí desktopového 64bitového klienta ArcGIS Pro verze Advanced.

Sdílená geodatabáze

V Oracle SDE databázi jsou uložena a prostřednictvím Portálu ArcGIS serveru sdílána veškerá potřebná podkladová data, tedy samotný digitální model reliéfu 5. generace, vodní toky ZABAGED, vodní toky podniků Povodí, data hlavních melioračních zařízení apod. Využívání podkladových dat prostřednictvím SDE databáze a serveru ArcGIS Enterprise zajišťuje aktuálnost a jednotnost dat napříč jednotlivými zpracovateli. Zároveň jsou využívány letecké snímky a základní mapa ČR poskytované jako služby ArcGIS serveru ČUZK.

V Oracle SDE databázi je také uložena samotná editovaná vrstva rozvodnic povodí 4. řádu. Databáze umožňuje nad daty v ní uloženými sdílenou editaci, tedy přístup a úpravu najednou všem uživatelům, kteří mají nastavená editační práva. Odpadá potřeba vrstvu rozvodnic rozdělovat na sedm částí s ohledem na územní působnost poboček a po aktualizaci ji zase spojovat dohromady. Editace probíhá nad jednou, celistvou vrstvou. Nad datovou sadou rozvodnic v databázi SDE jsou zároveň nastavena topologická pravidla.

Samotná editace/aktualizace rozvodnic probíhá prostřednictvím 64bitové desktopové aplikace ArcGIS Pro úrovně Advanced na odděleních hydrologie sedmi poboček ČHMÚ, a také v centru na oddělení povrchových vod (OPV). Verze Advanced umožňuje topologickou kontrolu editovaných dat přímo v Oracle databázi.

Nezbytným podkladem při editaci rozvodnic je digitální model reliéfu 5. generace a z něj generované dynamické vrstevnice a stínovaný reliéf. Pro editaci bylo stanoveno referenční měřítko 1:1 000 vzhledem k podrobnosti terénu a současně tak, aby vyhovovalo pro další zpracování odvozených hydrologických údajů. Testováno bylo i vygenerování vrstevnic jako feature layer, tedy trvalá vrstva ve dvou úrovních: základní (s krokem 1 m) a zesílená (krok 10 m), ovšem jak se ukázalo, z časových a hardwarově kapacitních důvodů nebylo možné takto vyrobit vrstevnice pro celé území ČR (samotný ZÚ nemá stále vrstevnice z DMR5G dokončené).

Pro jednotný postup a práci aktualizace datové sady rozvodnic povodí 4. řádu napříč pobočkami byl vytvořen pracovní návod, který byl zveřejněn jako závazný v prostředí řízených dokumentů ČHMÚ.

1x za 14 dní probíhá zálohování rozpracované datové sady rozvodnic z databáze SDE a zároveň aktualizace stavu harmonizace páteřních vodních toků projektu ISVS Voda.

Veškerá data jsou převedena a používána v souřadnicovém systému *WGS 1984 UTM 33N*.

Využití rastrových analýz

Jak už bylo zmíněno, při aktualizaci rozvodnic se využívá dynamicky generovaných vrstevnic a stínovaného reliéfu přímo z DMR5G. Odpadá tak nutnost ukládat další objemná data (samotný DMR5G má ve formátu souborové geodatabáze velikost cca 106 GB), obě vrstvy se generují „on the fly“ přímo v desktopovém klientu. Parametry pro generování vrstevnic jsou dané jednotně pracovním postupem. Na Obr. 2 jsou znázorněné dynamické vrstevnice s výškovým krokem 1 m společně se stínovaným reliéfem a základní mapou ČR.



Obr. 2 Vrstevnice a stínovaný reliéf dynamicky generované z DMR5G nad podkladovou základní mapou ČR

Automatické generování rozvodnic

Hydrologické rastrové analýzy (nástroje) využívají vybraného digitálního modelu reliéfu pro výpočet a stanovení hydrologických prvků povodí – mj. říční sítě a rozvodnic. Některé rovinnaté oblasti ČR jsou náročné na určení korektního vedení rozvodnice, proto bylo v oddělení povrchových vod vyvinuto a do ArcGIS Pro zakomponováno rozšíření v podobě toolboxu s názvem *HydroDEM*, které umožňuje s využitím rastrových analýz a při definování okrajových podmínek (parametrů a vrstev) nechat vygenerovat automatickou rozvodnici. Ta je však odvozena čistě nad digitálním modelem reliéfu a nezohledňuje antropogenní zásahy do vodních toků, jako jsou například umělé náhony, mimoúrovňová křížení, podzemní úseky či propustky, které odvádí vodu pod vyvýšenými silnicemi. Proto slouží automaticky vygenerovaná rozvodnice jako pomocný nástroj při samotné aktualizaci.

Pilotní povodí – nové plochy a vrstevnice

Porovnání ploch pilotních povodí

V rámci zpracování metodických postupů aktualizace rozvodnic byla vytipována pilotní povodí s cílem:

- otestovat technologii – zprovoznění, nastavení a ověření funkčnosti sdílené databáze, nahrání a sdílení podkladových dat, nastavení práv uživatelům
- zpracovat jednotný pracovní postup – zpracování uživatelského manuálu s cílem sjednotit pracovní postupy a podklady na jednotlivých pobočkách ČHMÚ
- vyhodnocení – zjistit rozdíly v plochách povodí před a po aktualizaci rozvodnic, vytipovat oblasti s největšími změnami, nastavení referenční měřítkové úrovně
- odhad vlivu aktualizace ploch povodí na odvození hydrologických údajů

Cílem porovnání pilotních povodí bylo stanovit taková povodí, kde budou zastoupeny nížinné i horské oblasti území a ucelená problematika možné hierarchie vodních toků (mimoúrovňová křížení, náhony, odbočení, vodní díla, vodoměrné stanice). Jako pilotní povodí bylo vybráno povodí horního Labe po

soutok s Čistou a celé povodí Rusavy. Na těchto povodích byly opraveny rozvodnice podle výše uvedených podkladů a byly vyhodnoceny výsledky zejména s ohledem na změnu velikosti plochy povodí (dílní, celkové). Porovnání vybraných ploch povodí před a po aktualizaci přibližuje tabulka 1.

Zmíněné postupy vedly ke stanovení jednotného procesu editace rozvodnic, ať už se to týká použitých podkladů, použití a nastavení programového vybavení nebo stanovení vhodné měřítkové úrovně, kdy ještě nedochází ke zkreslení datových vstupů, zejména DMR5G. Na základě těchto získaných poznatků byl sepsán manuál, který mají pracovníci ČHMÚ k dispozici při aktualizaci.

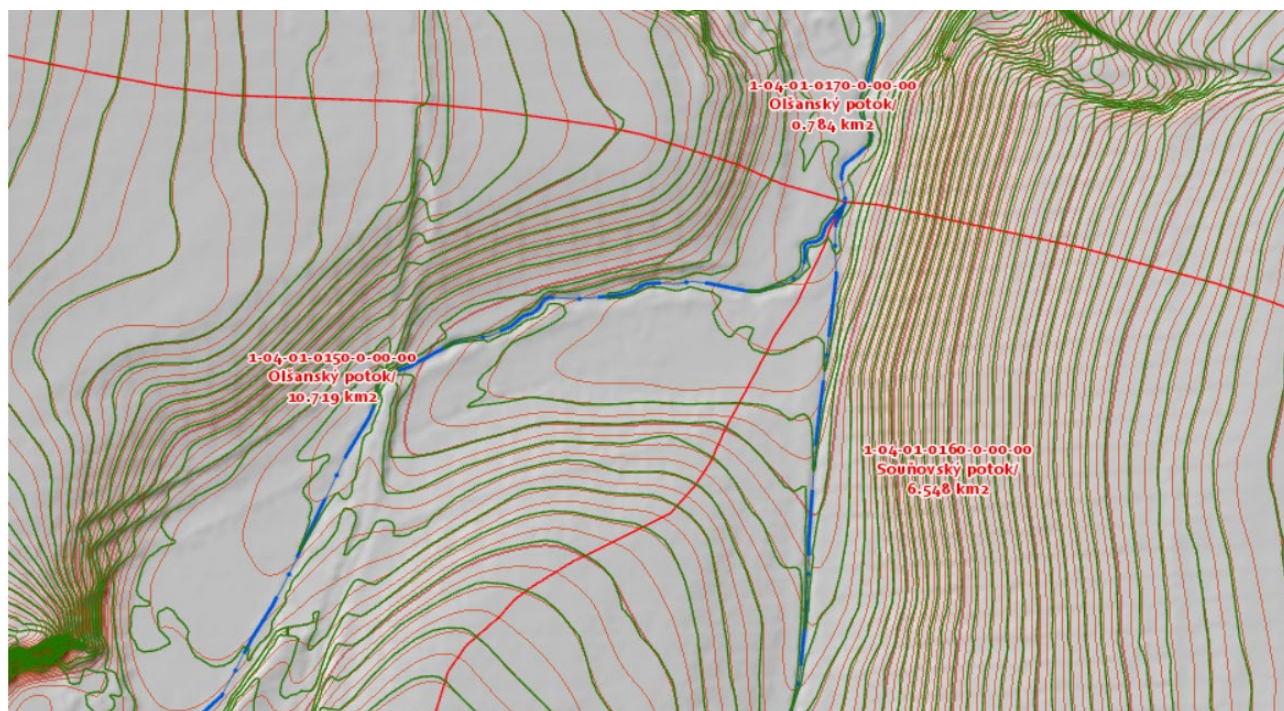
Tabulka 1 – Porovnání ploch ve vybraných závěrových profilech

Profil	ČHP	Původní plocha [km ²]	Aktualizovaná plocha [km ²]	Procentuální změna [%]
Labe po Čistou	1-01-01-0250-0-00-00	213,86	213,63	-0,11
Jesenický potok	1-08-04-0300-0-00-00	19,53	21,55	+ 10,3
Hloučela – VS Soběsuky	4-12-01-0530-0-00-70	81,65	81,08	- 0,70
Rusava ústí	4-12-02-1380-0-00-00	151,06	153,26	+ 1,46

Vrstevnice jako základní orografický podklad

Garantem vrstevnic odvozených v přesnosti a podrobnosti DMR5G je Zeměměřický úřad. V době zpracování metodických postupů nebyla k dispozici vrstva oficiálních vrstevnic pro celou Českou republiku, byly proto porovnány vrstevnice a odvozené rozvodnice na dvou vybraných povodích, kde již vrstevnice od ZÚ byly dostupné.

Pro povodí Klejnárky a Vlkavy byly aktualizovány rozvodnice dle nastaveného metodického postupu (tedy s využitím dynamicky generovaných vrstevnic), které byly následně porovnány nad vrstevnicemi oficiálně odvozenými z DMR5G v ZÚ. V obou podkladech vrstevnic nebyly zjištěny významnější rozdíly, které by měly vliv na průběh odvozené rozvodnice. Rozdíl mezi oběma vrstevnicemi je pouze v míře zhlazení linie. Naopak dynamicky generované vrstevnice umožňují překreslování s ohledem na změnu měřítka v mapě a tudíž zobrazení větší podrobnosti dynamických vrstevnic při práci ve větších měřítkových úrovních. Podle Tippnera (2017) jsou vrstevnice na straně ZÚ upravovány zejména v místech, kde nelze dodržet topologickou čistotu ve vazbě na vodní plochy. Rozdíly mezi dynamickými vrstevnicemi používanými k editaci a vrstevnicemi poskytnutými ZÚ je patrný na obrázku 3.

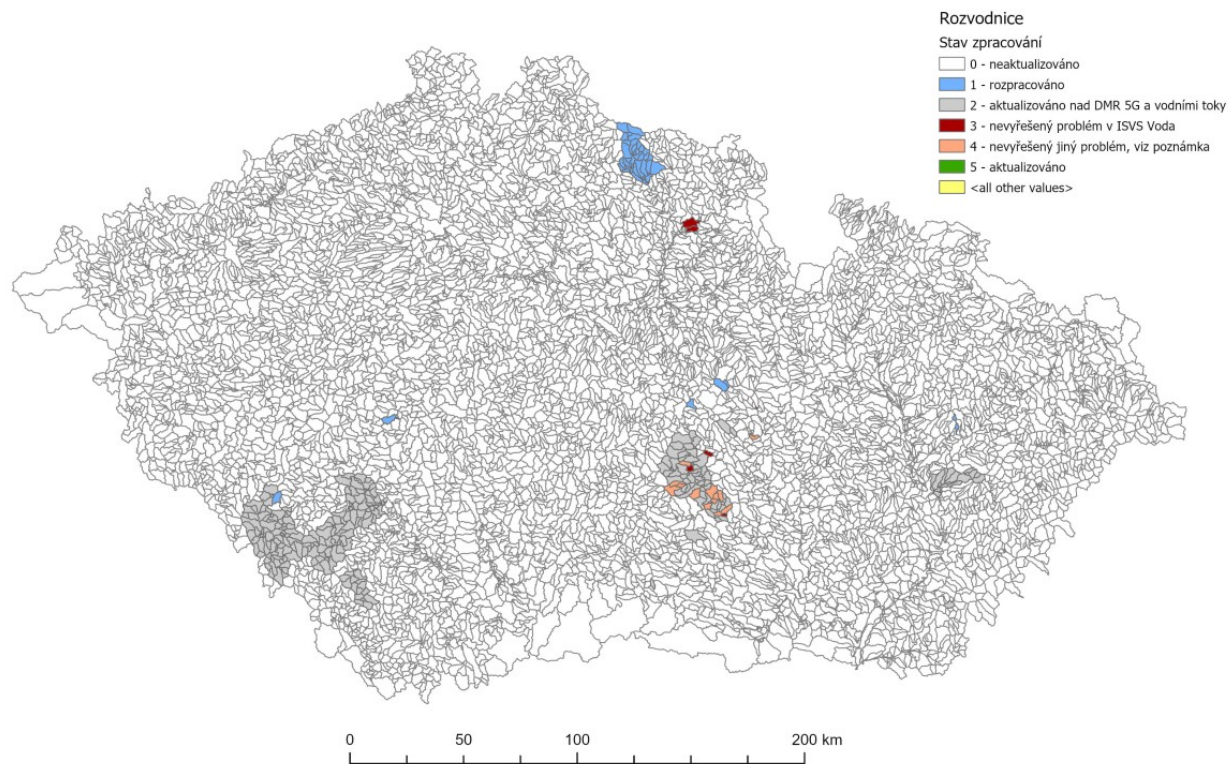


Obr. 3 Porovnání dynamických vrstevnic (hnědá) a vrstevnic poskytnutých ZÚ (zelená)

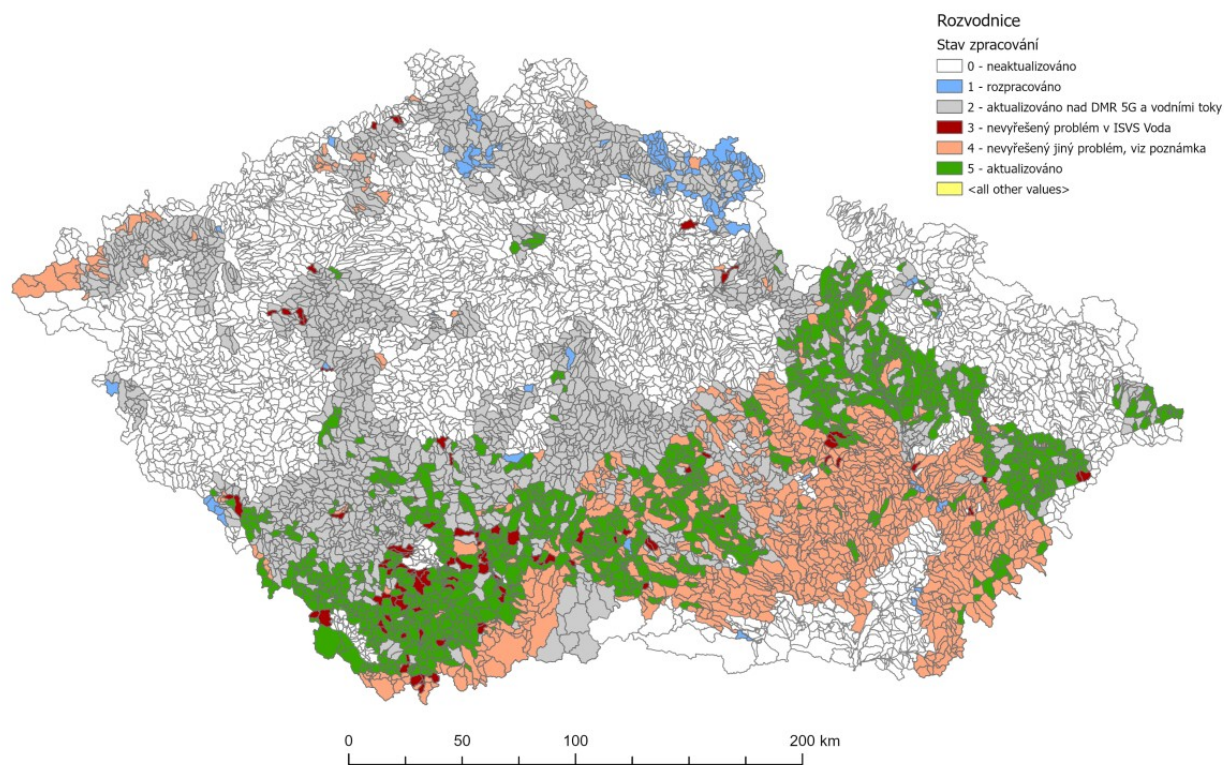
Klasifikace aktualizace rozvodnic

V průběhu aktualizace jsou dílčí povodí kategorizována do pěti skupin podle míry dokončení a se zohledněním výsledků Harmonizace vodních toků projektu ISVS Voda. Klasifikace je patrná z legendy obrázku 4. Komplikace při aktualizaci se objevují v problematických územích, jako jsou povrchové doly s dynamickými změnami struktur vodních toků, převody vody, zaústění přirozených vodních toků do náhonů, mimoúrovňové křížení vodních toků apod. Taková místa je nutné konzultovat s ostatními organizacemi a dílem řešit v rámci projektu ISVS Voda.

Pro přehlednost byla vytvořena mapová aplikace s informací o stavu zpracování rozvodnic. Data v aplikaci jsou zobrazována přímo z Oracle databáze. Zároveň je možné v mapové aplikaci zobrazit stav odsouhlasování jednotlivých polygonů ČHP v rámci projektu ISVS Voda. Aplikace běží na vnitřní síti ČHMÚ. Na obrázku 4. je zobrazen stav aktualizace rozvodnic k datu 8. 8. 2019, na obrázku 5. pak stav k 7. 5. 2021.



Obr. 4 Stav zpracování aktualizace rozvodnic k 8. 8. 2019



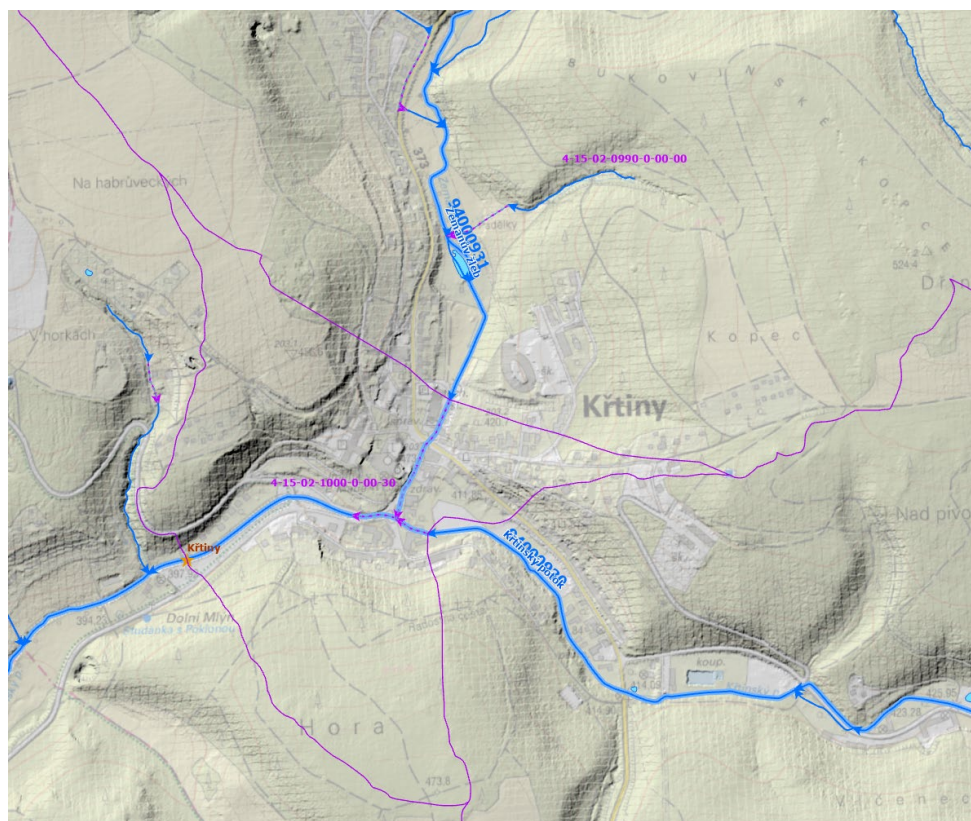
Obr. 5 Stav zpracování aktualizace rozvodnic k 7. 5. 2021

Řešení podzemních úseků páteřních vodních toků

V průběhu aktualizace rozvodnic jsou řešeny také situace, kdy je jeden z páteřních vodních toků v místě soutoků veden v podzemí a kdy část území nad podzemní částí toku může náležet jinému povodí. Byla provedena prostorová analýza nad daty ZABAGED s cílem zjistit počet takových případů a na základě provedené analýzy pak byla navržena řešení vedení přilehlé rozvodnice. Výsledných cca 200 příkladů bylo rozděleno do šesti skupin, ve kterých je či není možné přistoupit k jednotnému řešení. Problematické oblasti jsou konzultovány individuálně mezi OPV a pobočkami s přihlédnutím na hydrologická, orografická a topologická pravidla. Výsledky přibližuje matice na obrázku 6. Nejvíce případů se nachází v intravilánu obce, kde však není potřeba rozvodnice upravovat, protože podzemní úsek toku prochází v údolnici potenciálního povrchového úseku. Komplikovanější případ soutoku tří podzemních úseků toku a řešení rozvodnice ilustruje obrázek 7 v obci Křtiny.

		3	2	34	5	17	68
Návrh řešení	bez úpravy rozvodnice	3	2	34	5	17	68
	komplikovaný případ, individuální řešení	1			1	3	12
	rozvodnice k ústí povrchového úseku, bez dělení povodí		1			4	37
	rozvodnice k ústí povrchového úseku, s dělením povodí					1	7
		jiné	krasová oblast	krátký úsek v tělese hráze, náspu	mimoúrovňové křížení	úsek mimo obec	úsek v obci
		Kategorie podz. toku					

Obr. 6 Matice kategorií páteřních podzemních toků a návrhů řešení rozvodnice



Obr. 7 Řešení rozvodnic v místě podzemních úseků vodních toků obce Křtiny a rozvodnice k vodoměrné stanici Křtiny

Začlenění zahraničních povodí

Česká republika jakožto „střecha Evropy“ odvádí převážnou část povrchové vody říční sítí z ČR směrem do zahraničí. Jsou ale případy, kdy je část území odvodňované ze zahraničí (např. horní úsek Ohře, Lužnice, Dyje nebo Olše) anebo je na území ČR jen malá část zahraničního povodí (týká se všech hraničních povodí s Polskem, Německem, Rakouskem i Slovenskem). Zde je potřeba vyřešit rozvodnice ve spolupráci s vybraným zahraničním partnerem. Byly proto osloveny dotčené zahraniční organizace s dotazem na poskytnutí jejich aktuálních rozvodnic a informací, jakým způsobem byly tyto rozvodnice odvozeny.

Závěr

Aktualizace datové sady rozvodnic nad digitálním modelem reliéfu 5. generace probíhá od začátku roku 2018, dokončení se předpokládá v roce 2022. Aktualizované rozvodnice budou sloužit pro zpřesnění hydrologických údajů vydávaných ČHMÚ, a také při odvození katastru *M*-denních průtoků za nové referenční období 1991–2020.

Větší změny v rozvodnicích se projevují především v rovinatých a nížinných oblastech, kde se jako výrazný terénní prvek usměrňující odtok vody projevují násypy a zářezy liniových dopravních staveb či ohrázení podél vodních toků, které jsou v rozlišení DMR5G jasně patrné. Změny se dále projevují v místech, kde se respektují podzemní úseky vodních toků. A změny se projevují v lokalitách s dynamickou proměnou krajiny, jako jsou povrchové hnědouhelné doly, jejich revitalizace a likvidace (výsypky, řízené zaplavování). Zároveň jsou v rozvodnicích průběžně zohledňovány a zapracovávány změny ve struktuře vodních toků vzešlých z projektu Harmonizace ISVS Voda (např. změny v pořadí zaústění toků, názvosloví, rušení neexistujících vodních linií).

V současné chvíli (květen 2021) bylo zkontrolováno, upraveno či připomínkováno téměř 50 % povodí z celé republiky vč. zahraničních toků. Po skončení podpory dlouhodobého rozvoje se předpokládá, že budou dále probíhat pravidelné aktualizace rozvodnic vzhledem k novým skutečnostem plynoucím z projektu Rozvoj ISVS Voda.

Poděkování

Projekt aktualizace rozvodnic nad DMR5G je financován v rámci institucionální podpory dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace, který skončí v roce 2022.

Zdroje

Tippner A. (2017): Generování vrstevnic pro nové SMD 1:5 000, Praha.

Hydrologické dny 2021

IX. národní konference českých a slovenských hydrologů a vodohospodářů
Sborník

Foto na obálce: Jáchym Brzezina

Vydalo nakladatelství Českého hydrometeorologického ústavu, Na Šabatce 2050/17, 143 06
1. vydání, 200 stran

Publikace neprošla jazykovou úpravou, za obsah příspěvků odpovídají autoři

ISBN 978-80-7653-032-4