



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Martin Kubáň

Autoreferát dizertačnej práce

VYUŽITIE SATELITNÝCH SNÍMOK VLHKOSTI PÔDY V HYDROLOGICKOM MODELOVANÍ

na získanie akademického titulu: „doktor“ „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe: 3629V09 vodohospodárske inžinierstvo D-VHI4

v študijnom odbore: stavebníctvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: v Bratislave 23.05.2022

Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre vodného hospodárstva krajiny Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity

Predkladateľ: Ing. Martin Kubáň
Katedra vodného hospodárstva krajiny
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. Ján Szolgay, PhD.
Katedra vodného hospodárstva krajiny
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Milan Čistý, PhD.
Katedra vodného hospodárstva krajiny
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Ing. Michal Danko, PhD.
Ústav hydrológie SAV, v.v.i., Bratislava,
Výskumná základňa pre horskú hydrológiu v Liptovskom Mikuláši

Mgr. Marcel Zvolenský, PhD.,
SHMÚ Bratislava, Regionálne pracovisko Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:
(dátum rozoslania/*Date of sending*)

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa/*Dissertation Thesis Defence will be held on*

o/at.....**h (am/pm) na/at**(presná adresa miesta konania
obhajoby dizertačnej práce/*exact address where the dissertation thesis defence will take place*)

.....
rektor STU alebo dekan fakulty,
ak sa doktorandský študijný program uskutočňuje na fakulte
(meno a priezvisko s uvedením titulov)/

Obsah

1	ÚVOD	3
2	Ciele dizertačnej práce	4
3	DÁTA.....	4
3.1	Produkt ASCAT SWI.....	6
4	mETODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA	7
5	VÝSLEDKY A DISKUSIA	8
5.1	Výsledky kalibrácie	8
5.2	Validácia v období 2015-2018	9
5.3	Validácia 1991-2000	10
5.4	Vplyv viacúčelovej kalibrácie na parameter pôdnej kapacity FC	12
5.5	Hydrologická Bilancia.....	12
6	ZÁVER.....	15
7	Odporúčania pre používateľov satelitných údajov pre koncepčné hydrologické modely	18
7.1	Súhrn	18
7.2	Príprava údajov.....	18
7.3	Výber ideálnych povodí	18
7.4	Zakomponovanie do kalibrácie	18

1 ÚVOD

Vlhkosť pôdy je jedným z najdôležitejších faktorov v objemovej a energetickej bilancii povodí, slúži tiež ako regulátor tvorby povrchového a podpovrchového odtoku. V tejto práci je skúmaný potenciál nového satelitného experimentálneho produktu indexu vlhkosti pôdy ASCAT SWI pre niekoľko viac-účelových kalibrácií koncepčného hydrologického modelu s priestorovo rozčlenenými parametrami a dvojitoú štrukturalizáciou pôdnej vrstvy. Do kalibračného procesu boli zakomponované údaje o indexe vlhkosti pôdy ASCAT pre povrchovú a koreňovú zónu pôdy. Dáta ASCAT sú oproti ostatným satelitným produktom zdokonalené o lepšie priestorové a časové rozlíšenie, spoľahlivejšiu rádio-metrickú presnosť a zberný algoritmus. Analýza bola vykonaná na 209 povodiach situovaných v rozličných fyzicko-geografických a klimatických oblastiach v Rakúsku v rokoch 2007-2018 a 1991-2000. Validácia bola vykonaná v rokoch 2015-2018 a 1991-2000. Výsledky preukázali, že viac-účelovým postupom bol dosiahnutý pozitívny efekt na rozsah parametrov. Kombináciou vlhkosti pôdy a prietoku v kalibračnom postupe zlepšilo efektívnosť simulácie vlhkosti pôdy vo viac ako 70 % povodiach. Zlepšenie nebolo dosiahnuté v povodiach ktoré boli pokryté hustým lesným porastom na viac ako 55 % plochy povodia. Zlepšenie sa tiež objavilo pri efektívnosti simulácie odtoku pri viac ako 27% povodiach, tieto povodia sa vyznačovali nižšou nadmorskou výškou a väčším množstvom pokrytia povodia poľnohospodárskymi pôdami, na viac ako 20% plochy povodia, tiež pri alpských povodiach, ktoré neboli výrazne ovplyvnené vodou z topenia ľadovcov a snehu.

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Konkrétne ciele dizertačnej práce sme, v súlade s odporúčaniami komisie dizertačnej skúšky, stanovili nasledovne:

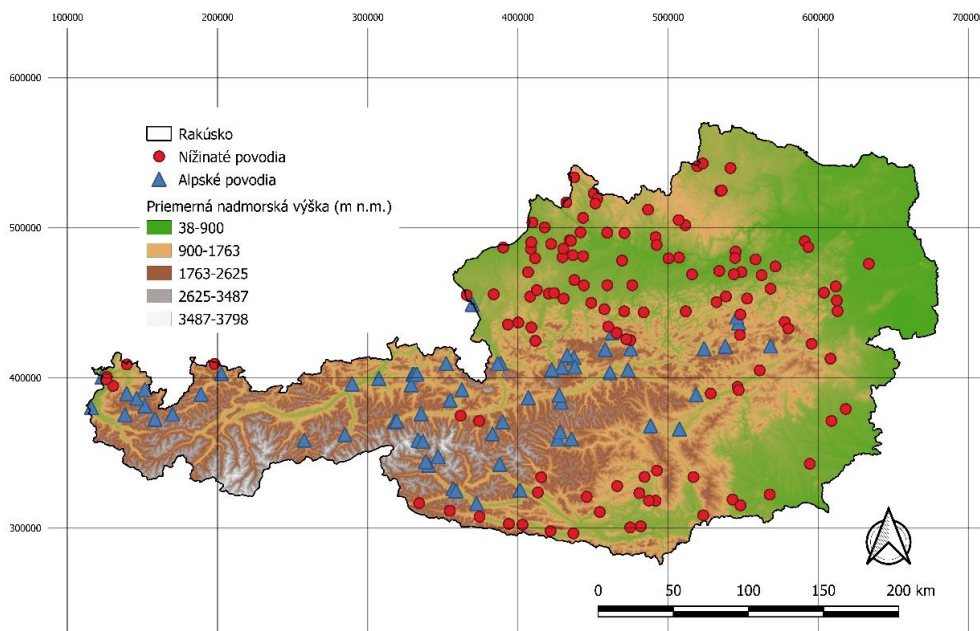
- Štúdium a kvantifikácia neistôt v našom regióne najrozšírenejšom zrážkovo-odtokovom modeli typu HBV vo verzii TUV s priestorovo sústredenými parametrami na základe dostupnej literatúry.
- Štúdium a zhodnotenie potenciálu nových produktov diaľkového prieskumu Zeme pre koncepčné zrážkovo – odtokové modelovanie, najmä z hľadiska znižovania neistôt v odhadovaní vnútorných stavových premenných modelov a modifikácie reprezentácie procesov tvorby odtoku a ich parametrizácie.
- Hľadanie a návrh vhodných kalibračných postupov vrátane ich cieľových funkcií na efektívne znižovanie neistoty v kľúčových výstupoch modelu TUV z hľadiska využitia údajov o vlhkosti pôdy z diaľkového prieskumu Zeme.
- Skúmanie citlivosti parametrov modelu TUV z pohľadu využívania údajov o vlhkosti pôdy z diaľkového prieskumu Zeme.
- Vytvorenie metodických postupov kalibračnej stratégie s dôrazom na aplikovateľnosť koncepčných z-o modelov typu HBV v rôznych podmienkach, ktoré môžu nastať pri používaní týchto modelov pre riešenie úloh pre vodohospodársku prax a praktické inžinierske aplikácie.
- Vytvorenie súboru odporúčaní pre hydrologickú prax s dôrazom na ich uplatniteľnosť v rôznych aplikáciách.

3 DÁTA

V našej štúdii boli použité dáta pre 209 rakúskych povodí na základe výberu z predošlých štúdií (Parajka, 2009; Szeles, 2020). Týchto 209 povodí bolo vybraných na základe toho, že ich prietoky nie sú ovplyvnené nadlepšovaním prietokov. Plocha povodí je v rozmedzí od 13,7 km² (Micheldorf, rieka Krems) do 6214 km² (Bruck an der Mur unter Muerz, rieka Mur) s mediánom 167,3k m². Priemerná nadmorská výška povodia sa nachádza v rozmedzí medzi 353 a 2939 m n.m. s mediánom 1010 m n.m. Percentuálna plocha pokrytia lesom je medzi 0 – 94,6 %, a priemerná plocha pokrytia poľnohospodárskou pôdou sa nachádza medzi 0 – 92,9 %. Priemerná denná teplota vzduchu je od -2,83 °C v alpských povodiach, po 10,30 °C v nížinatých povodiach. Povodia sú znázornené na obrázku Obr.1.

Vlastnosti povodí boli získané z viacerých zdrojov. Priemerná denná potenciálna slnečná globálna radiácia a morfológické charakteristiky, napr. priemerná nadmorská výška povodí, index drsnosti, sklony svahov boli získané z digitálneho výškového modelu Rakúska. Index oslnenia (dĺžka denného svitu) bola určená pomocou funkcie R.sun (GRASS GIS 7.8.8dev *Reference Manual*, 2022) v programe GIS-GRASS pre raster 1x1 km². Informácie o využití pôdy boli získané z „Copernicus Land Monitoring Service“ a CORINE údajov o využití pôdy z roku 2006. Vrstvy HRL „High Resolution Layers“ sú údaje založené na rastri a poskytujú údaje o rozličných využívaníach pôdy. Sú doplnkom k mapám o využitíach pôdy (CORINE 2006). Dáta spojené s pôdnymi vlastnosťami, kapacita pôdy (*Field Capacity, FC*) a nasýtená hydraulická vodivosť boli získané z globálnych máp vo vysokom rozlíšení („High-Resolution Global Map of Soil Hydraulic Properties“ (Zhang, 2018)), ktoré poskytujú globálne mapy priemerných hodnôt a smerodajnú odchýlku pôdných hydraulických parametrov založených na „Kosugi“ modeli (Kosugi, 1996) vodnej retencie v 1km rozlíšení pre vrchnú vrstvu pôdy (0-5 cm). Toto sú vstupy pre „Kosugi K3 pedotranfer function model“, (s využitím percent piesku, siltu, hlíny a objemovej hmotnosti ako vstupmi) založených na údajoch z gridu 1x1km (Hengl, 2014). Všetky tieto charakteristiky boli interpolované do

výškových zón po 200 výškových metrov (prvá výšková zóna začína na 0 m n.m. a končí v 200 m n.m.). Zoznam základných charakteristík sa nachádza v Tab.1.



Obr. 1 209 Vybraných rakúskych povodí . Červené sú povodia nížinatého charakteru s dažďovým režimom odtoku a modrou sú znázornené povodia alpského charakteru so snehovým režimom odtoku (Sleziak, 2017).

Tab. 1 Vlastnosti Vybraných 209 rakúskych povodí (Tong, 2021)

	Atribút	Skratka	Jednotka	Min.	Max.	Medián
Veľkosť	Plocha povodia	A	km ²	13.7	6214	167.3
Poloha	Priemerná nadmorská výška	MELE	m a.s.l.	353	2939.7	1010.7
	Minimálna nadmorská výška	MiELE	m a.s.l.	200	1939	561
	Maximálna nadmorská výška	MxELE	m a.s.l.	509	3760	1861
	Rozsah min. a max. výšky	ER	m	80	3072	1279
	Priemerný sklon	SL	%	1.74	43.91	18.84
Pokrytie pôdy	Pokrytie lesom	FP	%	0	94.59	46.88
	Pokrytie poľnohospodárskymi pôdami	AP	%	0	92.86	16.3
Klíma	Priemerné ročné úhrny zrážok	MAP	mm	728.1	2301.8	1274.4
	Priemerná denná teplota	MAT	°C	-2.83	10.3	7.36
	Percentuálny počet dní v roku s priemernou dennou teplotou pod 0°C	MTLO	-	0.12	0.62	0.2

Na kalibráciu modelu boli použité vstupné dáta o úhrne zrážok a teplote vzduchu z databázy Spartacus (Hiebl, 2016), pre obdobie 2007-2014. Tieto dáta boli interpolované do hypsometrických výškových zón po 200 výškových metrov. Dáta o prietokoch boli získané z 209 vodomerných staníc a poskytnuté Rakúskym hydrografickým ústavom. Tieto prietoky nie sú ovplyvnené priehradami, vodnými elektrárnami ani prevodmi vody z iných povodí. Na základe dostupnosti dát bola vykonaná validácia modelu v dvoch obdobiach 2015-2018 a 1991-2000. Pre obdobie 2015-2018 bolo validovaných celkovo 189 povodí (65 alpských a 124 nížinatých povodí).

Potenciálna evapotranspirácia bola určená pomocou rovnice Blaney-Criddle (Parajka, 2005).

$$EP = -1.55 + 0.96 * (8.128 + 0.457 * T) * \frac{SD}{Sy} * 100$$

1

Kde:

T- priemerná denná teplota vzduchu (°C)

SD – Je potenciálne trvanie denného svitu počas dňa (hod.)

Sy – suma priemerného denného trvania slnečného svitu (hod.)

SD/Sy – index oslnenia (-)

SD a Sy boli vypočítané z digitálneho modelu reliéfu v modeli GISS GRASS pomocou funkcie R. sun (1x1 km grid), (GRASS GIS 7.8.8dev Reference Manual, 2022).

Údaje pre klimatické dáta z databázy Spartacus boli získané z priestorovo rozdelených klimatických dát s vysokým časovým rozlíšením (podrobnejšie v prácach (Hiebl, 2016, 2017). Denné úhrny zrážok boli získané z gridu 1x1 km, dáta začínajú od roku 1961, tieto dáta sú priebežne obnovované. Dáta o úhrnoch zrážok boli zostavené na základe klasickej dvojvrstvovej analýzy, ktorá zahŕňa rozdielne interpolácie pre priemerné mesačné úhrny zrážok a pre denné relatívne hodnoty. Predchádzajúce hodnoty boli získané pomocou „kriging“ metódy za pomoci topografických predvídateľov („external drift kriging“) zahŕňajúcich 1249 staníc (Hiebl, 2017). Údaje o teplote vzduchu boli z gridových mriežok maximálnych a minimálnych denných teplôt vzduchu, ktoré pokrývali celé územie Rakúska, údaje sú v gride 1x1 km a začínajú od roku 1961 do dnešného dátumu. Na pre rozdelenie teplôt vzduchu v horských regiónoch kde sú teploty vzduchu veľmi rôznorodo prerozdelené, bola aplikovaná metóda ktorá určila nelineárne teplotné profily s nadmorskými výškami a určujú tak ne – Euklidovskú priestorovú reprezentatívnosť meračských staníc. Priestorová analýza predstavuje sériu až 150 staníc v Rakúsku a v okolí (homogenizovaných ak to boli dostupné), z ktorých všetky presahujú alebo vyplňajú medzery, tak aby pokryli celé obdobie potrebné pre výskum.

3.1 Produkt ASCAT SWI

Produkt ASCAT *Direx Soil Water Index* (SWI) v rozlíšení 0,5 km, poskytuje údaje o indexe vlhkosti pôdy SWI pre grid 0.5 km. Tento produkt bol odvodený a škálovaný z povrchovej vlhkosti pôdy ASCAT, ktorá bola priamo meraná (Wagner, 1999; Albergel, 2008). Hlavnou výhodou tohto produktu je jeho časová konzistentnosť pre dlhé časové obdobie, údaje boli merané pomocou dôsledne kalibrovaných ASCAT senzorov na palube satelitu METOP-A, -B a -C. Informácie o produkte ASCAT SWI nie sú komerčne dostupné. Tieto informácie sme získali na základe spolupráce s katedrou geodézie na TUW. Všetky informácie o produkte boli poskytnuté pri spoločných konzultáciách na katedre geodézie na TUW (EODC, 2021).

Hlavnými údajmi, ktoré ovplyvňujú kvalitu meraných údajov sú sklony svahov, snehová pokrývka a zamrznutá pôda. Medzi údaje, ktoré môžu ovplyvniť hodnoty nameraných údajov môžeme zaradiť údaj o drsnosti pôdy (Roughness index). Pri rozdielnej drsnosti pôdy totiž dochádza k zmene odrazivosti lúčov smerom späť ku senzoru. Pri relatívne hladkých povrchoch sa uhol dopadu lúčov rovná uhlu odrazu a späť do senzoru sa odrazí len časť vyslaného signálu. Pri povrchoch s veľkou drsnosťou sa však môže uhol dopadu a odrazu výrazne líšiť, môže sa tak stať, že sa nám odrazí do späť do senzoru väčšie množstvo signálu, čo môže spôsobiť vyššie hodnoty nameraných údajov. Hustá vegetácia spôsobuje viaceré komplikácie pri meraní pomocou satelitných senzorov. Signál ktorý je vyslaný zo senzoru môže preniknúť cez vegetáciu, čo ho oslabí odrazí sa od zemského povrchu a následne odrazený signál musí znova

peniknúť cez vegetáciu aby sa dostal späť do senzoru, dochádza tak ku dvojitému oslabeniu signálu. Ďalej môže dochádzať k zdvojeniu odrazu signálu medzi hustou vegetáciou čo môže spôsobiť zosilnenie signálu odrazeného späť do senzoru a tým pádom vyššie hodnoty nameraných údajov.

4 METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA

Na jednoúčelovú a viacúčelovú kalibráciu parametrov modelu TUW dual, sme použili diferenciálny evolučný algoritmus DEoptim (Mullen, 2011). Model TUW dual bol kalibrovaný na 4 rozličné účelové funkcie (OF): OF_Q založenú na prietoku Q , OF_{Q+SR} založenú na prietoku a vlhkosti pôdy pre koreňovú zónu, OF_{Q+SS} založenú na prietoku a vlhkosti pôdy pre povrchovú zónu, a $OF_{Q+SR+SS}$ založenú na prietoku a vlhkosti pôdy pre koreňovú a povrchovú zónu.

Jednotlivé účelové funkcie OF_Q pre pretok, OF_{SR} pre vlhkosť pôdy v koreňovej zóne a OF_{SS} pre vlhkosť pôdy v povrchovej zóne boli počítané pomocou kombinácie koeficientu efektivity *Nash-Sutcliffe* (NSE) (*Nash and Sutcliffe* (Nash, 1970)), a jeho logaritmu ($\log NSE$), kde $OF = (NSE + \log NSE) / 2$. V účelovej funkcii OF boli porovnané simulované hodnoty prietoku Q_{sim} , vlhkosti pôdy pre povrchovú vrstvu $SM_{sim(povrchová)}$ a koreňovú zónu $SM_{sim(koreňová)}$ z meranými hodnotami prietoku Q_{mer} , a meranými hodnotami ASCAT pôdnej vlhkosti $SWI_{povrchová}$ a $SWI_{koreňová}$.

Vo viac-účelovej kalibrácii sme nastavili rozličné váhy pre účelové funkcie OF_Q , OF_{SR} a OF_{SS} :

$$OF_{Q+SR} = OF_Q * w_Q + OF_{SR} * w_{SR}, \quad 2$$

$$OF_{Q+SS} = OF_Q * w_Q + OF_{SS} * w_{SS}, \quad 3$$

$$OF_{Q+SR+SS} = OF_Q * w_Q + OF_{SR} * w_{SR} + OF_{SS} * w_{SS}, \quad 4$$

Kde w_Q , w_{SR} , w_{SS} sú jednotlivé váhy. Pri OF_{Q+SR} a OF_{Q+SS} , hodnoty váh w_Q , w_{SR} a w_{SS} sú 1/2, a pri $OF_{Q+SR+SS}$, sú hodnoty w_Q , w_{SR} a w_{SS} rovné hodnote 1/3, (Tong, 2021; Slezia, 2020).

Pre určovanie prietokovej efektivity modelu („*Runoff Model Efficiency*“ RME), sme použili kombináciu koeficientu *Nash-Sutcliffe* (NSE) a jeho logaritmu ($\log NSE$):

$$RME = \frac{(NSE + \log NSE)}{2}, \quad 5$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mer} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{mer} - \bar{Q}_{mer})^2}, \quad 6$$

$$\log NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{mer} - \log Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{mer} - \log \bar{Q}_{mer})^2}, \quad 7$$

Kde Q_{sim} , Q_{mer} sú simulovaný a pozorovaný prietok; $\bar{Q}_{obs}$ je priemerný pozorovaný prietok.

Výpočet chyby objemu odtoku („*Volume error*“ VE) bola počítaná ako:

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim}^i - \sum_{i=1}^n Q_{mer}^i}{\sum_{i=1}^n Q_{mer}^i} \quad 8$$

Efektivita modelovania vlhkosti pôdy bola určená za pomoci korelácie medzi relatívnymi hodnotami simulovanej vlhkosti pôdy pre koreňovú a povrchovú zónu $SM_{sim(koreňová)}$ a $SM_{sim(povrchová)}$ a meranými hodnotami satelitnej vlhkosti pôdy ASCAT $SWI_{koreňová}$ a $SWI_{povrchová}$.

$$Korelácia (R- $SWI_{koreňová}$) = $\left(\frac{SM_{sim(koreňová)}}{FC} \times 100 \right)$ a $SWI_{koreňová}$ 9$$

$$Korelácia (R- $SWI_{povrchová}$) = $\left(\frac{SM_{sim(povrchová)}}{fC_{povrchová}} \times 100 \right)$ a $SWI_{povrchová}$ 10$$

5 VÝSLEDKY A DISKUSIA

V našej práci sme použili údaje satelitnej vlhkosti pôdy SWI pre kalibráciu zrážkovo-odtokového modelu TUW pre 209 rakúskych povodí. Celkovo sme vykonali 4 kalibračné varianty v období 2007-2014. Ako prvú sme spustili kalibráciu, kde sme v účelovej funkcii priradili váhu $w=1$ prietoku, pre druhú kalibráciu sme použili údaje o prietoku s váhou $w=1/2$ a údaje SWI pre povrchovú vrstvu s váhou $w=1/2$. V tretej variante sme použili údaje o prietoku s váhou $w=1/2$ a údaje SWI pre koreňovú zónu s váhou $w=1/2$, a pre štvrtú variantu sme použili údaje o prietoku s váhou $w=1/3$, údaje SWI pre povrchovú zónu s váhou $w=1/3$ a údaje SWI pre koreňovú zónu s váhou $w=1/3$. V prvej časti sme vyhodnotili výsledky jedno a viacúčelovej s kalibrácie.

Následne sme pristúpili ku validácii, najskôr sme využili parametre z kalibračného obdobia a validovali v období 2015-2018 pre 189 povodí (počet povodí bol ovplyvnený dostupnosťou vstupných údajov pre validáciu v danom období) za cieľom porovnania údajov simulácie vlhkosti pôdy s modelom TUW s meranými údajmi ASCAT SWI. Sledovali sme zároveň aj rozdiel efektivity simulácie medzi jedno a viacúčelovým postupom a celkový vplyv údajov ASCAT SWI na výsledky kalibrácie a validácie. V ďalšom kroku sme spustili validáciu pre obdobie 1991-2000 pre 198 povodí (počet povodí bol ovplyvnený dostupnosťou vstupných údajov pre validáciu v danom období) za cieľom skúmania vplyvu údajov ASCAT SWI na výsledky simulácie odtoku z povodia a následné porovnanie s jednoúčelovým postupom. V ďalšej časti sme vyhodnotili výsledky simulácie vlhkosti pôdy a odtoku z povodia a zároveň sme charakterizovali vplyv fyzicko-geografických vlastností povodí na výsledky simulácie, ktoré viedli k vypracovaniu manuálu pre používateľov satelitných údajov o vlhkosti pôdy a následne sme prešli k vyhodnoteniu parametrov. Keďže sme v našej práci používali údaje o indexe vlhkosti pôdy ASCAT SWI, zamerali sme sa hlavne na pôdny parameter FC.

V závere sme vyhodnotili vplyv viacúčelovej simulácie odtoku z povodia na hydrologickú bilanciu pre jednotlivé rakúske regióny.

5.1 Výsledky kalibrácie

Na základe výsledkov z kalibrácie boli porovnané kumulatívne distribučné funkcie (CDFs) hodnôt prietokovej efektivity modelu (RME), objemovú chybu (VE) a korelačný koeficient (R) medzi simulovanou vlhkosťou pôdy z modelu TUW (SM_{sim}) a meranými údajmi (ASCAT SWI) pre povrchovú a koreňovú zónu pôdy. Všetky výsledky boli porovnané pre dve skupiny povodí (71 alpských „*alpine*“ a 138 nížinatých „*lowland*“ povodí). Mediány hodnôt prietokovej efektivity modelu (RME), objemovej chyby (VE) a korelačných koeficientov (R) sú zosumarizované v Tab. 2. Výsledky v Tab. 2 preukázali, že viacúčelový postup výrazne zlepšil hodnoty korelácie medzi SM_{sim} a meranými údajmi ASCAT SWI, zároveň mierne znížil medián hodnôt RME.

Tab. 2 Medián hodnôt pre 209 povodí v období 2007-2014, hodnoty pre prietokovú efektivitu modelu (RME), Objemovú chybu (VE) a koeficient korelácie SMSim a ASCAT SWI (R), hodnoty pri ktorých sme zaznamenali významné zmeny sú označené **tučným písmom**.

Kalibrácia (2007-2014)	RME		VE (%)		R SS Povrchová zóna		R SR Koreňová zóna	
	alpské	nížinaté	alpské	nížinaté	alpské	nížinaté	alpské	nížinaté
Cal. to Q	0.83	0.75	-0.05	0.02	0.02	0.37	0.23	0.49
Cal. to Q+SS	0.81	0.74	-0.05	0.02	0.40	0.49	0.36	0.49
Cal. to Q+SR	0.81	0.74	-0.05	0.02	0.18	0.38	0.43	0.54
Ca. to Q+SS+SR	0.81	0.73	-0.04	0.03	0.41	0.48	0.44	0.54

5.2 Validácia v období 2015-2018

Následne sme pristúpili ku validácii, najskôr sme využili parametre z kalibračného obdobia a validovali v období 2014-2018 pre 189 povodí (počet povodí bol ovplyvnený dostupnosťou vstupných údajov pre validáciu v danom období) za cieľom porovnania údajov simulácie vlhkosti pôdy s meranými údajmi vlhkosti pôdy SWI (Tab. 3), sledovali sme zároveň aj rozdiel efektivity simulácie medzi jedno a viac-účelovým postupom a celkový vplyv údajov ASCAT SWI na výsledky kalibrácie a validácie. V ďalšom kroku sme spustili validáciu pre obdobie 1991-2000 pre 198 povodí (počet povodí bol ovplyvnený dostupnosťou vstupných údajov pre validáciu v danom období) za cieľom skúmania vplyvu údajov SWI na výsledky simulácie odtoku z povodia a následné porovnanie s jedno-účelovým postupom (Tab. 4). V závere sme vyhodnotili výsledky simulácie vlhkosti pôdy a odtoku z povodia a zároveň sme aj charakterizovali vplyv fyzicko-geografických vlastností povodia na výsledky simulácie, ktoré nás viedli k vypracovaniu manuálu pre používateľom satelitných údajov a o vlhkosti pôdy.

Výsledky v Tab. 3 preukázali, že zakomponovanie satelitného produktu vlhkosti pôdy ASCAT SWI do kalibrácie modelu TUW, zlepšilo hodnoty RME v povodiach s nižšou priemernou nadmorskou výškou (medián medzi 738,5-754,9 m n.m.), menším sklonom svahov (medián medzi 10,44-12,43 %), a vyšším percentom poľnohospodárskych pôd (medián medzi 26,8-38,1 %). A naopak, zlepšenie nebolo zaznamenané v povodiach s vyššou nadmorskou výškou (medián medzi 1270,8-1335,4 m n.m.), väčším sklonom terénu (medián medzi 23,61-24,73%) a nižším percentom poľnohospodárskej pôdy (medián 10,9-11,4%). Zlepšenie hodnôt RME nezáviselo od percentuálneho pokrytia povodia lesom.

Percentuálne pokrytie povodia lesom a poľnohospodárskymi pôdami hrali dôležitú úlohu pri zlepšení simulácie vlhkosti pôdy. Hodnoty korelácie indexu vlhkosti pre koreňovú zónu pôdy R SR boli zlepšené v povodiach s menším sklonom terénu (medián hodnôt SL medzi 16,06-18,54%), a menším percentom pokrytia územia lesom (medián FP medzi 45,3-46,3%) a s vyšším percentom pokrytia poľnohospodárskymi pôdami (medián AP medzi 18,2-20,1%). Zlepšenie hodnôt R-SR nebolo zaznamenané v povodiach s vyšším priemerným sklonom terénu (SL medzi 23,4-24,7%), a vyšším percentuálnym pokrytím lesa (FP medzi 63,1-78,4%) a s menším percentom pokrytia poľnohospodárskymi pôdami (medián AP medzi 5,9-8,0%). Podobné výsledky boli tiež zaznamenané pri zlepšení koeficientu korelácie pre povrchovú zónu R-SS. Rozdiel medzi zlepšením simulácie odtoku z povodia a zlepšením simulácie vlhkosti pôdy bol v tom, že sa mierne líšili vlastnosti ktoré, zásadne ovplyvňovali kvalitu simulácií. Zatiaľ čo pri simulácii odtoku z povodia boli hlavnými kritériami množstvo poľnohospodárskych pôd AP, sklony svahov SL a priemerná nadmorská výška, pri simulácii vlhkosti pôdy pre povrchovú zónu hral najdôležitejšiu úlohu ukazovateľ percentuálneho pokrytia lesom FP (53-79%).

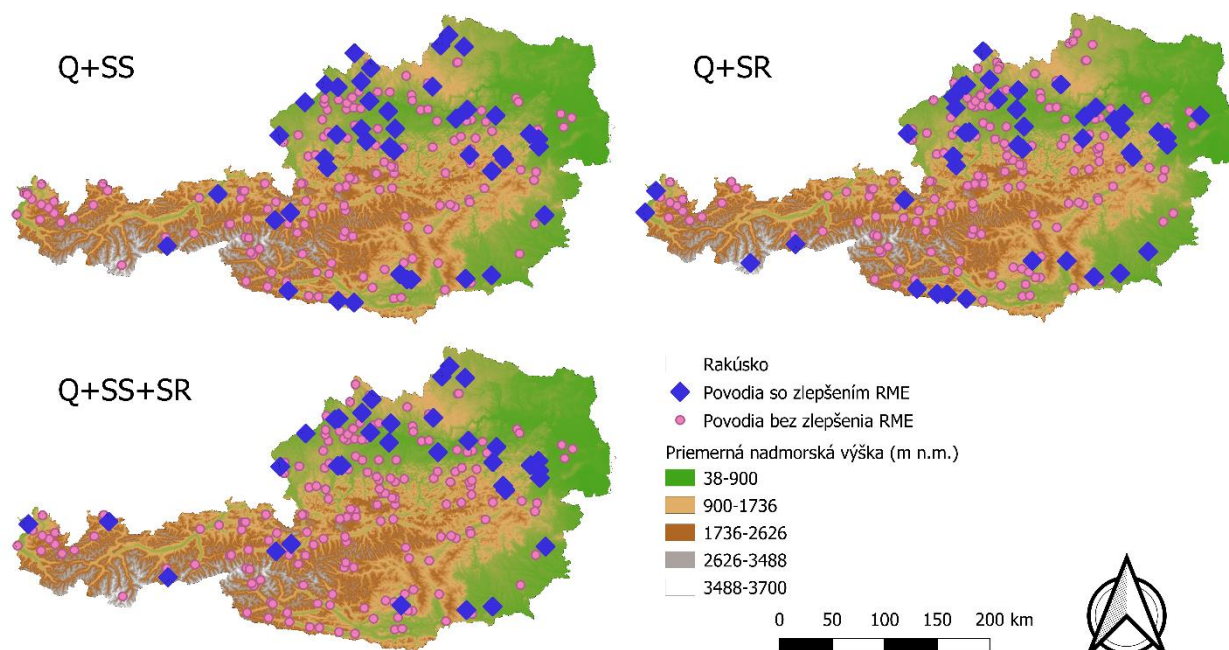
Tab. 3 Množstvo povodí kde sa zlepšili [RME +] hodnoty RME pomocou zakomponovania údajov ASCAT SWI pre obdobie 2015-2016 (horná tabuľka), s priradením hodnôt mediánu charakteristík povodí pre každú skupinu povodí (povodia pri ktorých sme naznačenli zlepšenie majú označenie [RME -]). Množstvo povodí kde sa zlepšili hodnoty korelačného koeficientu [R+] pomocou zakomponovania údajov ASCAT SWI pre obdobie 2015-2018 (stred a dolná tabuľka), s priradením hodnôt mediánu charakteristík povodí pre každú skupinu povodí. (povodia pri ktorých sme naznačenli zlepšenie majú označenie [R-])

Simulácia odtoku z povodia pre obdobie 2015-2016 (189 povodí)								
RME	[%]	Počet povodí		MELE	SL	FP	AP	MTLT0
Q+SS	30	56	RME +	754.9	12.43	53.8	26.8	0.18
Q+SR	36	68		738.5	10.44	45.5	31.2	0.17
Q+SS+SR	27	51		744.5	10.83	50.9	38.1	0.17
Q+SS	70	133	RME -	1270.9	23.61	46.3	11.4	0.23
Q+SR	64	121		1335.4	24.73	46.9	10.9	0.24
Q+SS+SR	73	138		1279.4	23.84	46.4	11.3	0.23
Korelácia simulovanej (model) a meranej (SWI) vlhkosti pôdy 2015-2018 SWI povrchová zóna								
Povrchová zóna R-SS	[%]	Počet povodí		MELE	SL	FP	AP	MTLT0
Q+SS	76	144	R +	1076.9	19.36	45.5	16.3	0.21
Q+SR	71	135		1192.9	21.83	46.3	15.3	0.22
Q+SS+SR	88	166		1101.9	20.20	46.5	15.7	0.21
Q+SS	24	45	R -	1020.7	19.73	67.6	9.1	0.20
Q+SR	29	54		892.0	17.04	52.8	16.3	0.19
Q+SS+SR	12	23		941.1	18.54	78.6	9.1	0.19
Korelácia simulovanej (model) a meranej (SWI) vlhkosti pôdy 2015-2018 SWI koreňová zóna								
Koreňová zóna R-SR	[%]	Počet povodí		MELE	SL	FP	AP	MTLT0
Q+SS	73	137	R +	940.2	16.06	45.3	20.1	0.19
Q+SR	84	159		1067.3	18.54	46.3	18.2	0.21
Q+SS+SR	85	160		1006.9	17.95	46.3	18.5	0.20
Q+SS	27	52	R -	1204.5	24.67	63.1	8.0	0.23
Q+SR	16	30		1016.5	23.38	78.4	5.9	0.20
Q+SS+SR	27	52		1105.4	23.49	64.7	7.3	0.21

5.3 Validácia 1991-2000

V ďalšej časti sú charakterizované mediány vlastností povodí pre skupinu povodí, v ktorých bolo zaznamenané zlepšenie hodnôt RME Tab. 4. pomocou viacúčelového postupu, pre validačné obdobie 1991-2000. Z výsledkov je jasne viditeľné, že ku zlepšeniu RME dochádzalo v povodiach s nižšou priemernou nadmorskou výškou (medián MELE od 719 – 849 m n.m.), z toho vyplývajú aj vlastnosti povodí s nižšou nadmorskou výškou ako sú menšie sklony svahov (SL), menej percent dní/rok s teplotou nižšou ako 0°C (MTLT0). Medzi najdôležitejšie vlastnosti charakterizujúce povodia, kde môžeme očakávať zlepšenie hodnôt RME, by sme teda zaradili údaje o percentuálnom pokrytí poľnohospodárskou pôdou (AP), sklony svahov (SL), počet dní s priemernou dennou teplotou pod 0°C (MTLT0). Tieto vlastnosti výrazne ovplyvňujú kvalitu údajov ASCAT SWI (EODC, 2021). Vyššia kvalita meraných údajov

vlhkosti pôdy sa dá dosiahnuť na poľnohospodárskych pôdach, ktoré sa nachádzajú v terénoch s nižším sklonom svahov, nenachádzajú sa vo vyšších nadmorských výškach, a tak väčšinu roka nie je pôda zamrznutá alebo pokrytá snehom. Naopak, nižšia kvalita meraných údajov ASCAT SWI sa vyskytuje v oblastiach s veľkým sklonom svahov, vysokou nadmorskou výškou, ktorá súvisí s dlhším obdobím pokrytia povodia snehom.



Obr. 2 Povodia v ktorých zakomponovanie satelitných údajov o vlhkosti pôdy zlepšilo simuláciu odtoku z povodia (modré štvorce), (ružové guľičky) sú povodia v ktorých nebolo zaznamenané zlepšenie hodnôt RME oproti jednouúčelovej kalibrácii vo validačnom období 1991-2000.

Vlastnosti povodí znázornené na Obr. 2, sú zosumarizované v Tab.4., sú tu uvedené hodnoty mediánov charakteristík pre skupinu v ktorých viacúčelový postup zlepšil hodnoty RME (na Obr. 2, modré) a pre skupinu povodí v ktorých nebolo zaznamenané zlepšenie (ružové). V Tab. 4 sú tiež uvedené hodnoty mediánu pre všetkých 198 validovaných povodí.

Tab. 4 Charakteristiky povodí pre skupinu povodí kde sme pomocou zakomponovania satelitných údajov ASCAT SWI zaznamenali zlepšenie hodnôt RME (zlepšené) a povodí kde sme nezaznamenali zlepšenie (nezlepšené). Opis skratiek charakteristík v Tab. 1. v kapitole Dáta

Mediány charakteristík povodí, 198 povodí										
198	[%]	počet	[+/-]	A	MELE	SL	FP	AP	MAP	MTLTO
Q+SR	22%	44	zlepšené	223.2	761.0	13.6	54.4	23.7	1216.2	0.17
Q+SS	22%	44		239.4	849.7	13.2	57.6	21.9	1173.2	0.18
Q+SS+SR	17%	34		183.5	719.2	8.5	52.1	39.2	1077.1	0.17
Q+SR	78%	154	nezlepšené	170.2	1178.1	22.1	46.4	14.4	1307.4	0.22
Q+SS	78%	154		165.1	1176.9	22.0	45.5	14.2	1307.4	0.22
Q+SS+SR	83%	164		168.1	1178.1	22.7	46.4	13.4	1326.0	0.22
Medián pre 198 povodí				178.3	1036	19.48	46.7	16.1	1277.7	0.20

5.4 Vplyv viacúčelovej kalibrácie na parameter pôdnej kapacity FC

V tejto časti práce je špecifikované správanie sa parametra FC pri jednoúčelovom a viacúčelovom postupe. Sledovaná bola tiež závislosť medzi zmenou parametra FC a zlepšením hodnôt RME.

V Tab. 5 sú uvedené mediány hodnôt charakteristík povodí. Výsledky preukázali, že povodia, pri ktorých dochádzalo k zníženiu hodnôt parametra FC (148-166 povodí), mali podobné vlastnosti ako povodia, pri ktorých sme zaznamenali zlepšenie hodnôt RME. Tieto povodia sa nachádzali v nižšej nadmorskej výške medián 895-925 m n. m., pokrývalo ich vyššie percento poľnohospodárskej pôdy približne 20%, medián priemerných sklonov svahov neprekračoval 20% . Naopak, povodia, pri ktorých bol zaznamenaný nárast hodnôt parametra FC, pokrývalo nízke percento poľnohospodárskych pôd okolo 10%, povodia sa nachádzali vo vyššej nadmorskej výške medián 1153-1280 m n.m., sklony svahov presahovali hodnoty 20%. Vlastnosti povodí, ktoré boli dosiahnuté pri povodiach so zvýšenými hodnotami FC, sú zároveň aj vlastnosti, ktoré negatívne ovplyvňujú kvalitu údajov ASCAT SWI a zároveň sú to aj rovnaké vlastnosti aké charakterizovali povodia, pri ktorých bolo zaznamenané zníženie hodnôt efektivity simulácie odtoku z povodia RME vo validačnom období so zakomponovanými údajmi ASCAT SWI.

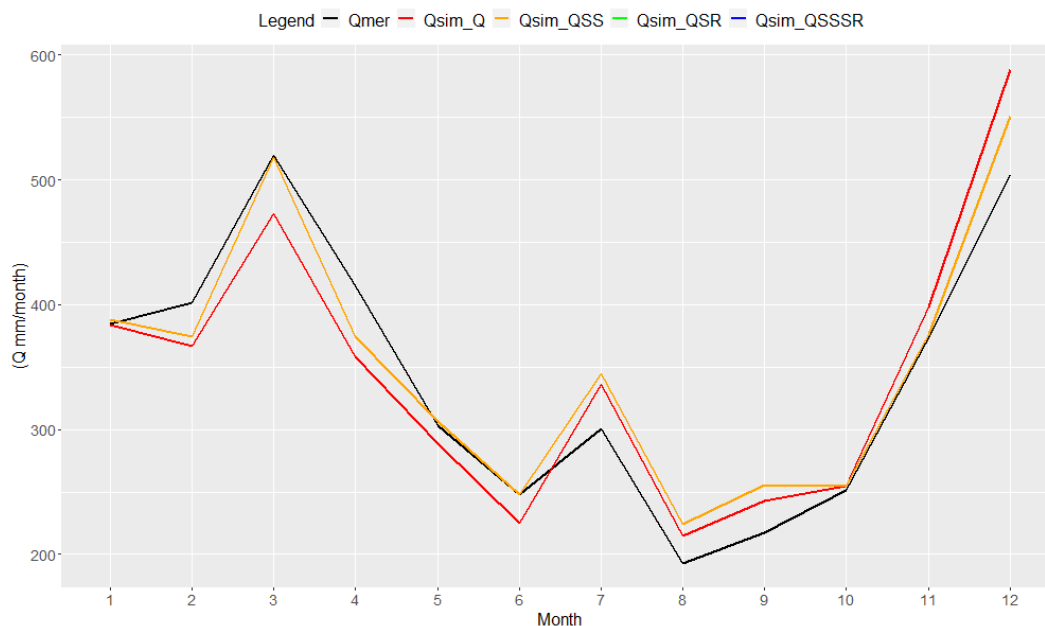
Tab. 5 Charakteristiky pre povodia kde viac-účelový postup navýšil hodnoty FC+ alebo znížil FC-, hodnoty pri ktorých sme zaznamenali významné zmeny sú označené **tučným písmom**.

209 povodí	Počet povodí	Medián [%] +/-	MELE	SL	RI	FP	AP	CAI	MTLT0
QSS FC+	43	20.50	1280.56	23.85	0.41	55.98	9.52	0.39	0.23
QSR FC+	61	13.52	1153.09	22.27	0.37	61.18	11.70	0.39	0.22
QSSSR FC+	42	24.68	1208.18	23.41	0.38	63.52	10.85	0.38	0.23
QSS FC-	166	-25.69	924.51	17.54	0.37	46.41	19.71	0.50	0.19
QSR FC-	148	-25.55	894.46	16.01	0.38	43.92	19.73	0.52	0.19
QSSSR FC-	167	-25.36	909.01	17.54	0.38	45.30	19.52	0.51	0.19

5.5 Hydrologická Bilancia

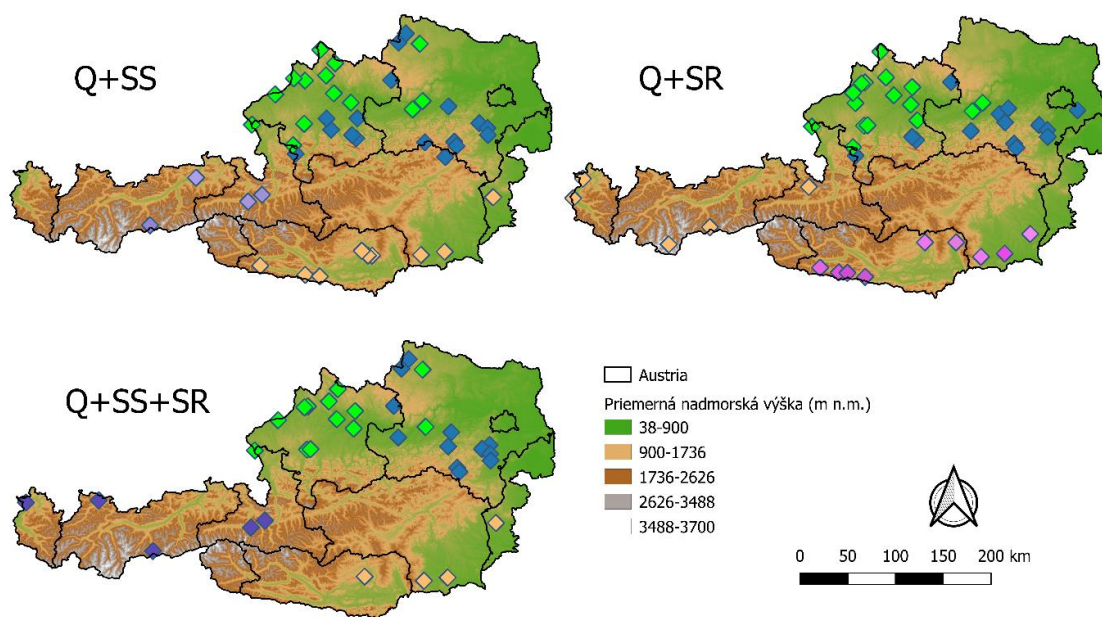
Cieľom tejto časti práce bolo porovnať ako sa zmenil odtok z povodí tým, že sme pre simuláciu použili parametre z viacúčelového kalibračného postupu s využitím údajov ASCAT SWI, oproti jednoúčelovému postupu s využitím len prietoku. V prvom kroku je znázornené v ktorých mesiacoch viacúčelový postup zlepšoval simuláciu odtokovej efektivity modelu RME. V druhej časti sú zachytené zlepšenia simulácie odtoku v jednotlivých regiónoch Rakúska, keďže sme zistili, že ku zlepšeniu nedochádzalo pravidelne v tých istých mesiacoch pre všetky povodia, rozhodli sme sa prístup k porovnaniu zlepšenia simulácie odtoku v jednotlivých regiónoch.

Na základe grafického porovnania na Obr.3 (vybraný je prípad pre jedno povodie ostatné povodia sú uvedené v dizertačnej práci) bolo zrejmé, že ku zlepšeniu simulácie odtoku pomocou viacúčelového postupu dochádzalo v mesiacoch so zvýšeným odtokom z povodí.



Obr. 3 Porovnanie mesačných súm odtokov pre skupinu povodí zlepšených zakomponovaním dát ASCAT SWI, pre vlhkosť povrchovej zóny pôdy. Čierna farba sú merané údaje, oranžová farba sú simulované údaje QSS a červená farba sú simulované údaje Q.

V tejto časti sme sa rozhodli regionalizovať priebeh mesačných odtokov a následne vyhodnotiť správanie sa zlepšenia simulácie odtoku v jednotlivých regiónoch. V prvej časti sme použili metódu K-means (Hartigan, 1979) na rozdelenie povodí na základe špecifických sezónnych odtokov. Metóda K-means rozdelila sezónne prietoky do 4 špecifických skupín, tento postup bol vypočítaný pre všetky 3 viac-účelové postupy Obr. 4.

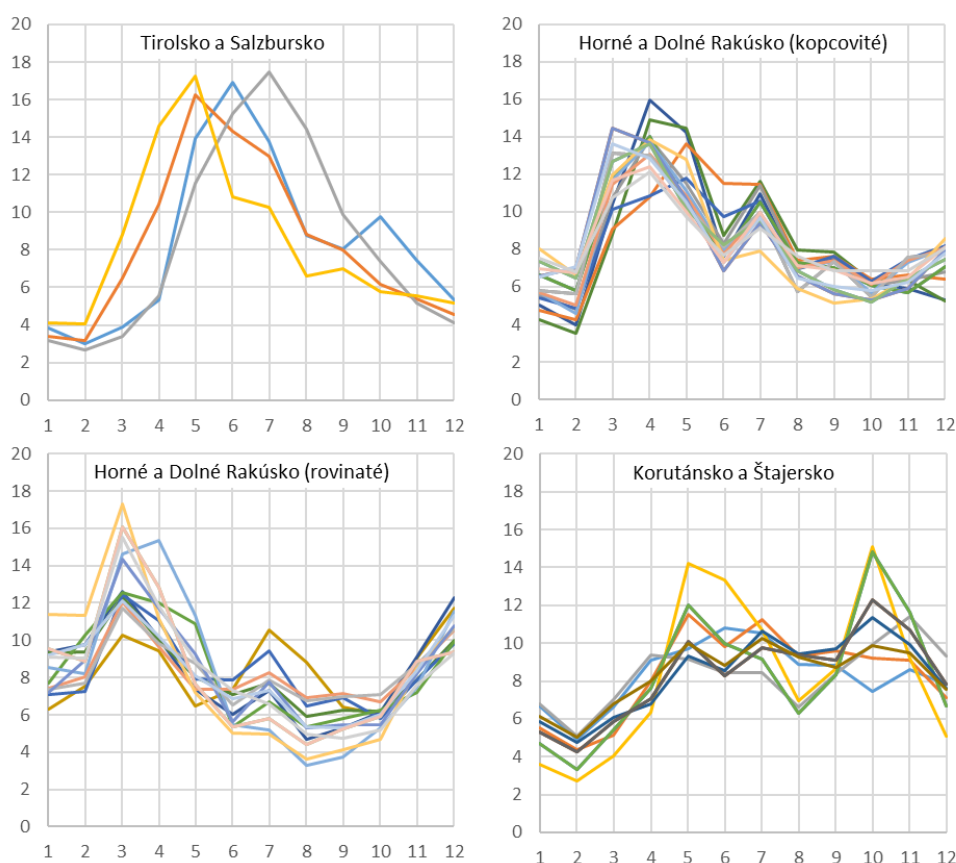


Obr. 4. Delenie podľa charakteristických sezónnych odtokov pre tri viac-účelové postupy Q+SS, Q+SR a Q+SS+SR vo validačnom období 1991-2000.

Metóda K-means rozdelila povodia podľa špecifického odtoku a na obrázku 4., je jasne viditeľné, že toto delenie súvisí aj s geografickou polohou povodí, v rámci jednotlivých regiónov (farebne sú označené

povodia z rovnakej skupiny špecifických odtokov v rámci povodí zlepšených pomocou viac-účelového postupu Q+SS, Q+SR a Q+SS+SR).

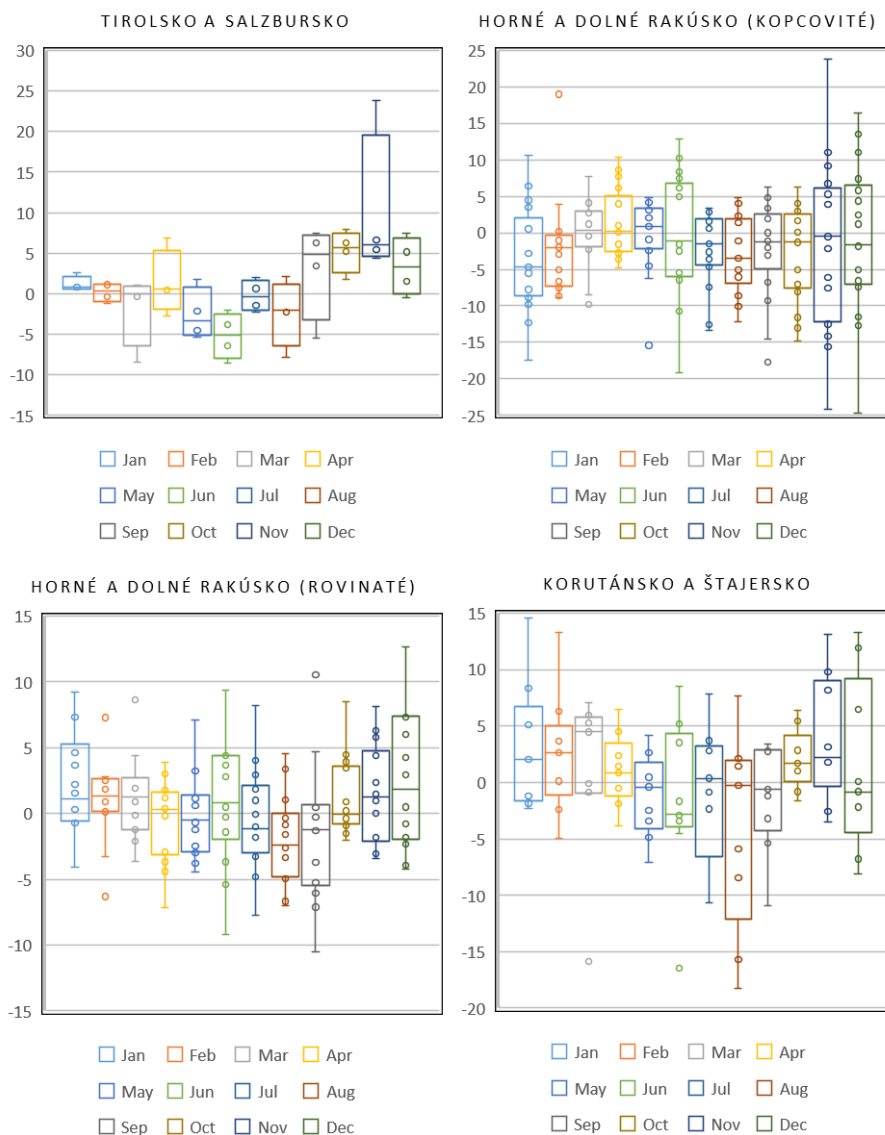
Následne sme na Obr. 5 zobrazili priebehy jednotlivých normalizovaných (percentuálny podiel z celkového ročného odtoku) priemerných mesačných odtokov pre povodia, v ktorých sme pomocou viac-účelového postupu (Q+SS, povodia pre ostatné dva viacúčelové postupy sú uvedené v dizertačnej práci) zaznamenali zlepšenie simulácie odtoku z povodí. Zároveň, sme priradili aj názvy jednotlivých spolkových krajín (regiónov) na základe toho kde sa nachádzajú jednotlivé povodia. Krajiny Horného a Dolného Rakúska sa na základe špecifického odtoku delia na podskupinu kopcovitých a rovinatých povodí. Na Obr. 5, skupinu rovinatých povodí od kopcovitých odlišuje výrazné zvýšenie odtoku z povodí v mesiacoch November a December. Regióny Tirolska a Salzburska obsahovala najmenší počet zlepšených povodí (väčšinou povodia s vysokou nadmorskou výškou), tieto regióny sa vyznačovali špecifickým zvýšením odtoku v mesiacoch máj – júl. Regióny Korutánska a Štajerska boli špecifické svojím zvyšovaním odtoku v jesenných mesiacoch.



Obr. 5 Priebehy špecifických odtokov z povodí pre jednotlivé skupiny rozdelené pomocou metódy *k-means* (Hartigan, 1979) pre povodia v ktorých viac-účelový postup Q+SS zlepšil simuláciu odtoku

Výsledky (Obr. 5 a 6) preukázali, že k zlepšeniu simulácie odtoku pomocou viacúčelového postupu s využitím údajov ASCAT SWI z povodí dochádzalo v zväčša na prietoky výdatnejších zimných a jarných mesiacoch, a naopak, ku poklesu efektivity simulácie dochádzalo v suchých letných mesiacoch, čo môže súvisieť s tým, že produkt ASCAT SWI môže poskytovať mierne skreslené údaje vo veľmi suchých pôdach (EODC, 2021). V regiónoch Horného a Dolného Rakúska sa tiež potvrdilo, že väčšie zlepšenie simulácie

môžeme očakávať v rovinatých povodiach oproti kopcovitým typom povodí, teda v povodiach s nižším priemerným percentuálnym sklonom svahov.



Obr. 6 Zlepšenie simulácie odtoku pre jednotlivé mesiace pomocou viac-účelového postupu $Q+SS$ oproti jedno-účelovému postupu Q

6 ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo teda priniesť prehľad poznatkov o hydrologickom modelovaní a následného začlenenia diaľkového prieskumu Zeme (ďalej v skratke DPZ) do hydrologického modelovania. V prvej časti sú písané druhy hydrologických modelov a spôsoby ich využitia vo vede a praxi. Táto časť práce je viac zameraná na deterministické modelovanie a koncepčné zrážkovo-odtokové modely. V druhej časti rešerše v práci sú opísané aktuálne spôsoby získavania hydrologických údajov z diaľkového prieskumu Zeme a ich využitie v hydrologickom modelovaní. Vo výskume bol použitý koncepčný zrážkovo-odtokový model TUW. Pre kalibráciu modelu boli klasicky použité vstupné dáta o úhrnoch zrážok, potenciálnej evapotranspirácii, teplote vzduchu, prietokoch a k nim sme pridružili údaje meranej odrazivosti vlhkosti pôdy pomocou DPZ. Konkrétny výber padol na využitie a otestovanie nového

experimentálneho satelitného produktu indexu vlhkosti pôdy (ASCAT SWI), ktorý poskytuje údaje o indexe vlhkosti pôdy pre povrchovú zónu pôdy (vrchných 3-5 cm) a umožňuje odhadnúť vlhkosť koreňovej zóny (do hĺbky 100 cm). Výsledky tejto práce boli publikované v článkoch (Kuban a kol. 2021-a, Kuban a kol. 2021-b), počas spolupráce s katedrou hydrológie na TUW vo Viedni sme sa podieľali na tvorbe článku (Tong a kol. 2021) kde bolo testované správne nastavenie účelovej funkcie. Ďalšie výsledky, ktoré sú uvedené v tejto práci budú tiež publikované v pripravovanom článku o zakomponovaní satelitných údajov ASCAT SWI za cieľom zlepšenia simulácie odtoku z povodia.

Podrobne sme sa v našej práci zaoberali vplyvom viac-účelovej kalibrácie koncepčného zrážkovo-odtokového modelu TUV vo verzii dual (pôda reprezentovaná dvomi spojenými retenčnými priestormi) so sústredenými parametrami (Parajka, 2009), na efektívnosť simulácie vlhkosti pôdy a finálneho odtoku z 209 rakúskych povodí. Do účelovej funkcie sme zahrnuli údaje o prietoku a údaje o odrazivosti reprezentujúce index vlhkosti pôdy meranej satelitným senzorom ASCAT (tieto údaje ďalej uvádzame pod skratkou ASCAT SWI). Údaje o vlhkosti pôdy poskytovali index relatívnej hodnoty množstva vody v pôdnej vrstve, pre povrchovú zónu pôdy (3-5 cm) a pre koreňovú zónu pôdy (do hĺbky 100cm). Tieto údaje nám boli poskytnuté na základe spolupráce s katedrou geodézie na TU Viedeň, tieto údaje zatiaľ nie sú komerčne dostupné koncovým užívateľom.

V prvej časti práce sme vykonali kalibráciu modelu v štyroch kalibračných variantoch (4 rôzne účelové funkcie) s rôznou mierou zahrnutia hodnôt prietoku a ASCAT SWI. Na základe výsledkov z kalibrácie bolo zrejmé, že viac-účelový kalibračný postup výrazne zlepšil hodnoty simulácie vlhkosti pôdy u viac ako 70 % povodí voči jednoúčelovej kalibrácii, zároveň sa iba mierne znížila hodnoty efektivity simulácie odtoku (medián Nash-Sutcliffovho koeficientu pre 209 povodí klesol z 0,78 na 0,77). Z kalibrácií sme tak získali 4 skupiny parametrov modelu TUV. Podrobne sme rozoberali ako viac-účelový postup kalibrácie ovplyvnil rozptyl hodnôt parametrov oproti jednoúčelovému postupu. Keďže údaje ASCAT SWI nám poskytujú údaj o indexe vlhkosti pôdy sústredili sme sa pritom hlavne na porovnanie parametrov pôdneho komponentu modelu TUV a z nich podrobne hlavne na parameter indexu hraničnej kapacity pôdnej vlhkosti FC. Výsledky nám ukázali, že viac-účelový kalibračný postup znížil hodnoty parametra FC oproti jednoúčelovému postupu v priemere o 25%, ku zníženiu však nedošlo vo všetkých povodiach. Hodnoty parametra FC sa znížili v povodiach, ktoré mali percentuálne pokrytie lesom s mediánom pod 46%. Následne sme prešli ku validácii aby sme mohli hľadať súvislosť medzi zlepšením simulácie odtoku a zmenou hodnôt parametra FC, ktorú vykonali v dvoch validačných obdobiach: 2015-2018 a 1991-2000

Cieľom validácie bolo tiež otestovať simuláciu vlhkosti pôdy a odtoku z povodia s parametrami s viac-účelového postupu a porovnať ju s jednoúčelovým postupom.

Porovnávali sme hodnoty korelačných koeficientov medzi meranými údajmi ASCAT SWI a simulovanými údajmi z modelu TUV pre povrchovú a koreňovú zónu. Vo výsledkoch sme porovnali výsledky pre skupinu alpských a nížinatých povodí pre 3 viac-účelové varianty oproti jednoúčelovému postupu. Vo validačnom období 2015-2018 sme zaznamenali výrazné zlepšenie v simulácii vlhkosti pôdy. Zlepšenie povodí sa objavovalo u 70 % povodí, ostatných 30 % povodí boli povodia v ktorých viac ako 55 % (medián pre 3 viac-účelové skupiny medzi 55 – 79%) povodia pokrývali lesy. Na základe štúdií prác od viacerých autorov, ktorý vyžívali údaje o vlhkosti pôdy meranej satelitnými senzormi sme takéto zlepšenie simulácie vlhkosti pôdy očakávali (Brocca, 2017;; Tong, 2021; Trambly, 2012; Brocca, 2012; Parajka, 2009). Podotýkame, že predošli autori nezaznamenali zlepšenie v simulácii odtoku z povodia, zaznamenali však výraznejšie zníženie efektivity simulácie odtoku.

Pri porovnaní údajov simulácie odtoku z povodia sme porovnávali údaje ukazovateľa zhody medzi simulovaným a pozorovaným odtokom RME, pri porovnaní mediánu hodnôt pre všetkých 189 validovaných povodí (znížený počet oproti 209 kalibrovaných z dôvodu nedostatku vstupných údajov vo

validačnom období 2015-2018) sme dosiahli len mierne zhoršenie mediánu hodnôt RME. Pri podrobnejšom skúmaní výsledkov sme zistili, že sme pri určitých povodiach dosiahli zlepšenie jej hodnôt pri viac-účelovom postupe oproti jednoúčelovému postupu. Rozhodli sme sa preto otestovať validáciu aj na období 1991-2000 kde sme sa zamerali len na výsledky simulácie odtoku z povodia. Dosiahli sme zlepšenie hodnôt až pri 22 % povodí (vo validačnom období 2015-2016 až 30%). Povodia, pri ktorých došlo ku zlepšeniu RME, boli svojimi vlastnosťami jasne odlišné od povodí pri ktorých sme nedosiahli zlepšenie. Vyznačovali hustejším pokrytím poľnohospodárskymi pôdami nad 20%, nachádzali sa v nižších nadmorských výškach medián okolo 790 m n.m., v povodiach boli menšie sklony svahov okolo 8,5-14%. Na základe týchto výsledkov sme sa zamerali na rovnaké vyhodnotenie charakteristík aj v období 2015-2016. Zlepšenie sa dosiahlo v povodiach s nižšou nadmorskou výškou (medián menší ako 750 m n.m., podobným pokrytím poľnohospodárskymi pôdami a sklonom svahov.

Pristúpili sme aj ku porovnaniu hydrologických bilancií odtokov z povodí za cieľom špecifikácie tých ročných období, ktorým viac-účelový postup pomohol zlepšiť efektivitu simulácie odtoku oproti jedno-účelovému postupu. Porovnali sme pritom hodnoty simulovaných priemerných mesačných odtokov z povodí v povodiach kde sme zaznamenali zlepšenie. Pri porovnaní sme rozdelili pomocou klastrovania metódou K-means na základe rozdelenia odtoku v roku do 4 skupín. Povodia Tirolska a Salzburska sa vyznačovali charakteristickým zvýšením odtoku v mesiacoch topenia snehu vo vysoko položených alpských oblastiach v mesiacoch apríl až júl. Skupina nížinatých povodí Horného a Dolného Rakúska sa vyznačovala zvýšením odtoku v mesiacoch marec a apríl, miernym zvýšením odtoku v mesiaci júl a špecifickým zvýšením odtoku v mesiacoch November a December. Ďalšou oblasťou boli kopcovité oblasti Horného a Dolného Rakúska, ktoré sa vyznačovali zvýšením odtoku v mesiacoch marec až apríl a júl. Poslednou oblasťou bola časť Korutánska a Štajerska, ktorá sa vyznačovala špecifickým zvýšením odtoku v mesiacoch máj, október a november. Na základe vyhodnotení vo všetkých oblastiach sme dospeli k záveru, že ku zlepšeniu simulácie odtoku dochádzalo v mesiacoch so zvýšeným odtokom a naopak v suchých mesiacoch došlo k miernemu zhoršeniu simulácie. Tento jav môže súvisieť s tým, že satelitné údaje indexu vlhkosti pôdy ASCAT SWI majú problémy s určovaním vlhkosti pôdy na suchých pôdach (EODC, 2021). Tiež sa potvrdilo, že k najväčšiemu zlepšeniu simulácie odtoku dochádzalo v povodiach situovaných v rovinatej oblasti Horného a Dolného Rakúska, Korutánska a Štajerska.

Zistili sme, že v povodiach pri ktorých viac-účelový postup zlepšil hodnoty simulácie odtoku z povodí, došlo zároveň aj ku zníženiu hodnôt parametra FC. Naopak povodia, pri ktorých došlo k zvýšeniu hodnôt FC, vykazovali aj nižšiu efektivitu simulácie odtoku. Na základe týchto výsledkov a zistených informácií o produkte ASCAT SWI, sme dospeli ku záveru, že zvýšenie hodnôt parametra FC môžu mať za následok údaje indexu vlhkosti pôdy ASCAT SWI, ktoré boli merané v husto zalesnených oblastiach a v oblastiach s vyšším sklonom svahov. Z poznatkov z konzultácií na katedre geodézie na TUW bolo potvrdené že údaje ASCAT SWI v husto zalesnených oblastiach a vyšším sklonom svahov môžu poskytovať skreslené hodnoty pôdnej vlhkosti, ktoré môžu byť umelo navýšené v dôsledku zdvojenia odrazeného signálu v husto zalesnených oblastiach (EODC, 2021), čo v našom prípade viedlo aj ku zvýšeniu hodnôt parametra FC.

Celkovým záverom z kalibračných a validačných výsledkov je, že satelitné údaje vlhkosti pôdy ASCAT SWI pre povrchovú a koreňovú zónu pôdy, dokážu zlepšiť hodnoty simulácie vlhkosti pôdy v povodiach, ktoré nie sú husto zalesnené (nad 55% pokrytia povodia). Zároveň tieto údaje dokážu pozitívne ovplyvniť aj simuláciu odtoku z povodí, ku zlepšeniu simulácie však dochádzalo len v povodiach so špecifickými charakteristikami. Povodia v ktorých sme dosiahli zlepšenie simulačných výsledkov odtoku z povodí, sa nachádzali v nižších nadmorských výškach okolo 750 m n.m., prevládal v nich dažďový režim odtoku (Sleziak, 2017), pokrývalo ich väčšie množstvo poľnohospodárskych pôd, minimálne 20% plochy povodia, priemerný sklon svahov v týchto povodiach nepresahoval 15%. Zároveň sme zistili, že nový

produkt satelitnej vlhkosti pôdy vykazuje nižšiu kvalitu údajov v oblastiach s vyššou nadmorskou výškou MELE < 900 m n.m. (viac dní so snehovou pokrývkou, alebo zamrznutou pôdou), väčším sklonom svahov (SL > 20%) a na základe dosiahnutých výsledkov by sme odporúčali nepoužívať tento produkt v takýchto oblastiach. Zároveň sme zistili, že nový produkt satelitnej vlhkosti pôdy vykazuje nižšiu kvalitu v oblastiach s vyššou nadmorskou výškou, teda aj väčšími sklonmi svahov (EODC, 2021). Na základe týchto výsledkov sme vypracovali odporúčania pre užívateľov satelitných údajov indexu vlhkosti pre povrchovú a koreňovú zónu pôdy, pre koncepčné hydrologické modely, ktoré sme rozdelili do troch skupín: príprava údajov pre zakomponovanie do kalibračného procesu, výber vhodných povodí za cieľom zlepšenia efektivity simulácie vlhkosti pôdy a odtoku, a zakomponovanie satelitných údajov indexu vlhkosti pôdy ASCAT SWI do kalibrácie.

7 ODPORÚČANIA PRE POUŽÍVATEĽOV SATELITNÝCH ÚDAJOV PRE KONCEPČNÉ HYDROLOGICKÉ MODEL Y

7.1 Súhrn

Pri zakomponovaní satelitných údajov o vlhkosti pôdy, do kalibrácie zrážkovo-odtokového modelu TUW, sme na základe výsledkov dosiahnutých našej štúdií vybrali odporúčania pre užívateľov satelitných údajov indexu vlhkosti pre povrchovú a koreňovú zónu pôdy, pre koncepčné hydrologické modely. Tieto odporúčania sme rozdelili do troch skupín,

1. Príprava údajov pre zakomponovanie do kalibračného procesu
2. Výber vhodných povodí za cieľom zlepšenia efektivity simulácie vlhkosti pôdy a odtoku
3. Zakomponovanie satelitných údajov indexu vlhkosti pôdy do kalibrácie.

7.2 Príprava údajov

V prvom kroku, ešte pred samotným zakomponovaním údajov do kalibračného procesu je potrebné správne filtrovať (odstrániť ich z radu údajov) údaje vlhkosti pôdy, v období keď sa nachádza na danom povodí snehová pokrývka. Tak isto je dôležité filtrovať údaje vlhkosti pôdy v oblastiach ľadovcovou pokrývkou, alebo z povrchov vodných plôch a husto zastavaných oblastí. Tieto údaje by mali byť filtrované pretože senzory síce merajú údaj odrazu signálu, ale údaj nezodpovedá údaju vlhkosti pôdy. Filtrovanie by mal zabezpečiť poskytovateľ produktu vlhkosti pôdy, vždy sa však môžu objaviť prípady kde bolo maskovanie nedostatočné. Dodatočným odstránením týchto údajov dokážeme výrazne zvýšiť konzistentnosť meraných údajov vlhkosti pôdy.

7.3 Výber ideálnych povodí

Na základe výsledkov dosiahnutých v našej práci by malo vhodné povodie pre zakomponovanie satelitných údajov za účelom zlepšenia simulácie odtoku a vlhkosti pôdy vyzeráť nasledovne:

- Plocha pokrytia poľnohospodárskymi pôdami minimálne 20 %;
- Priemerný sklon terénu menší ako 15 %;
- Počet dní v roku s priemernou teplotou nižšou ako 0°C menej ako 20 %;
- Priemerná nadmorská výška menšia ako 900 m n.m.;
- V povodí by sa nemali nachádzať ľadovce alebo trvalá snehová pokrývka.

7.4 Zakomponovanie do kalibrácie

Ak chceme zakomponovať satelitné údaje do kalibračného procesu koncepčných zrážkovo- odtokových modelov, môžeme tak urobiť za účelom zlepšenia reakcií pôdneho submodelu a teda celkového **zlepšenia simulácie vlhkosti pôdy**, alebo za účelom **zlepšenia simulácie odtoku** z povodia.

Z výsledkov našej štúdie vyplýva, že zakomponovaním satelitných údajov vlhkosti pôdy do kalibračného procesu hydrologických koncepčných zrážkovo-odtokových modelov dokážeme zvýšiť kvalitu simulácie vlhkosti pôdy, a zároveň dokážeme zlepšiť kvalitu simulácie odtoku vody z povodia pre povodia s určitými fyzicko-geografickými vlastnosťami, ako sú: vyššie percento poľnohospodárskych pôd, nižšie percento sklonov svahov. Zlepšenie simulácie sa najčastejšie objavilo pri povodiach s nižšou nadmorskou výškou. Toto vyplýva aj z toho kde dokáže satelit kvalitnejšie merať údaje o vlhkosti pôdy, t.j. na území kde sa nachádzajú poľnohospodárske pôdy (veľké plochy pôdy bez husto zastavaných oblastí), kde nie sú veľké sklony svahov (problém na odvrátených svahoch alebo na veľmi strmých svahoch dopadá signál zo satelitu pod veľkým uhlom a nedokáže a odraziť späť k satelitu).

Tieto postupy zakomponovania satelitných údajov ASCAT SWI pre povrchovú a koreňovú zónu boli testované a publikované v prácach (Kuban a kol., 2021; Tong a kol., 2021).

Za účelom **zlepšenia simulácie odtoku z povodia** je potrebné zvoliť v účelovej funkcii minimálnu váhu $w_Q=0,3$ a viac pre údaje o prietoku, a zvyšné váhy $w_Q=0,7$ môžeme priradiť údajom o vlhkosti pôdy. Pri takomto postupe dochádzalo ku zlepšeniu simulácie odtoku z povodia na základe ukazovateľov zhody RME „modelovaná odtoková efektivita“ (kombinácia logNash a Nash) až pri 50% povodí nížinatého charakteru.

Ak je **účelom našej práce zlepšenie hodnôt simulácie vlhkosti pôdy** a celkové zlepšenie reakcií pôdneho submodelu tak stačilo na základe výsledkov našej práce priradiť váhu $w=0,5$ a viac údajom o indexe vlhkosti pôdy ASCAT SWI, a výsledky našej práce preukázali, že došlo ku zlepšeniu simulácie vlhkosti pôdy u viac ako 70 % povodí. Najvýraznejšie zlepšenie však bolo zaznamenané v povodiach, ktoré vo svojich fyzicko-geografických vlastnostiach neobsahovali faktory, ktoré negatívne ovplyvňujú kvalitu meraní satelitných údajov medzi tieto faktory patria: husto zalesnené oblasti (nad 55%), husto zastavané oblasti, vysoko položené územia s dlhotrvajúcou snehovou pokrývkou, povodia s veľkým sklonom svahov, povodia s nízkym percentom poľnohospodárskych pôd.

Literatúra:

- ALBERGEL, C. – RÜDIGER, C. – PELLARIN, T. – CALVET, J. – C.; FRITZ, N. – FROISSARD, F. – SUQUIA, D. – PETITPA, A. – PIGUET, B. – MARTIN, E.: From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter: An assessment of the method based on in-situ observations and model simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2008, 12, 1323–1337.
- BROCCA L. – CIABATTA L. – MASSARI CH. – CAMICI S. – TARPANELLI A.: Soil moisture for Hydrological applications: Open Questions and New Opportunities. *Water* 2017, 9, 140; doi:10.3390/w9020140
- BROCCA, L. – MORAMARCO, T. – MELONE, F. – WAGNER, W. – HASENAUER, S. – HAHN, S.: Assimilation of surface- and root-zone ASCAT soil moisture products into rainfallrunoff modeling. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2012, 50, 2542–2555.
- EODC, Product User Manual ASCAT DIREX SWI 0.5 km, v1.0, 2021.
- GRASS GIS 7.8.8dev Reference Manual, 2003-2022 GRASS Development Team, (url: <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.sun.html>, dostupné dňa 11.5.2022)
- HARTIGAN, J. A. – WONG, M. A.: Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm. *Applied Statistics*, 1979, 28, 100–108. doi: 10.2307/2346830.
- HENGL, T. – DE JESUS, J.M. – MACMILLAN, R.A. v BATJES, N.H. – HEUVELINK, G.B.M. – RIBEIRO, E. – SAMUEL-ROSA, A. – KEMPEN, B. – LEENAARS, J.G.B. – WALSH, M.G.: SoilGrids1km—Global soil information based on automated mapping. *PLoS ONE* 2014, 9, e105992.

- HIEBL, J. – FREI, C.: Daily temperature grids for Austria since 1961—Concept, creation and applicability. *Theor. Appl. Clim.* 2016, 124, 161–178. *Water* 2021, 13, 3366 19 of 19
- HIEBL, J. – FREI, C.: Daily precipitation grids for Austria since 1961—Development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. *Theor. Appl. Clim.* 2017, 132, 327–345.
- KUBÁŇ, M. – PARAJKA, J. – TONG, R. V. PFEIL, I. – VREUGDENHIL, M. – SLEZIAK, P. – ADAM, B. – SZOLGAY, J. – KOHNOVÁ, S. – HLAVČOVÁ, K.: Incorporating Advanced Scatterometer Surface and Root Zone Soil Moisture Products into the Calibration of a Conceptual Semi-Distributed Hydrological Model. *Water* 2021, 13, 3366. <https://doi.org/10.3390/w13233366>
- KUBÁŇ, M. – BRZIAK, A. – KOHNOVÁ, S.: The role of land use and morphology representation in the setup and calibration of the conceptual TUW model. The role of land use and morphology representation in the setup and calibration of the conceptual TUW model. In 7th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium - WMESS 2021. Bristol: IOP Publishing, 2021.
- MULLEN, K. M. – D., GIL, D. – WINDOVER, D. – CLINE, J.: DEoptim: An R Package for Global Optimization by Differential Evolution *Journal of Statistical Software*, 2011, 40(6), str.1-26.
- NASH, J. – SUTCLIFFE, J.: River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *J. Hydrol.* 1970, 10, 282–290.
- PARAJKA, J. – NAEMI, V. – BLOŠCHL, G. a kol.: Matching ERS scatterometer based soil moisture patterns with simulations of a conceptual dual layer hydrologic model over Austria. *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 2009, 259–271.
- PARAJKA, J. – NAEMI, V. – BLOŠCHL, G. a kol.: Assimilating scatterometer soil moisture data into conceptual hydrologic models at the regional scale. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 2006, 353–368.
- SLEZIAK, P. – HLAVČOVÁ, K. – SZOLGAY, J. – PARAJKA, J.: Závislosť kvality simulácie odtoku pomocou zrážko-vo-odtokového modelu od rozdielnosti hydroklima-tických podmienok kalibračného a validačného obdobia. *Acta Hydrologica Slovaca*, 2017, 18(1), 23-30.
- SZÉLES, B. – PARAJKA, J. – HOGAN, P. – SILASARI, R. – PAVLIN, L. – STRAUSS, P. – BLÖSCHL, G.: The added value of different data types for calibrating and testing a hydrologic model in a small catchment. *Water Resour. Res.* 2020, 56, e2019WR026153.
- TONG, R. – PARAJKA, J. – SALENTINIG, A. – PFEIL, I. – KOMMA, J. – SZÉLES, B. – KUBÁŇ, M. – VALENT, P. – VREUGDENHIL, M. – WAGNER, W. a kol.: The value of ASCAT soil moisture and MODIS snow cover data for calibrating a conceptual hydrologic model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2021, 25, 1389–1410.
- TRAMBLAY, Y. – BOUAICHA, R. – BROCCA, L. – DORIGO, W. – BOUVIER, C. – CAMICI, S. – SERVAT, E.: Estimation of antecedent wetness conditions for flood modelling in northern Morocco. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012, 16, 4375–4386. [CrossRef]
- TRAMBLAY, Y. – BOUAICHA, R. – BROCCA, L. – DORIGO, W. – BOUVIER, C. – CAMICI, S. – SERVAT, E.: Estimation of antecedent wetness conditions for flood modelling in northern Morocco. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012, 16, 4375–4386. [CrossRef]