ANALÝZA PŘÍSPĚVKOVÝCH PLOCH POVODÍ V RÁMCI SRÁŽKOODTOKOVÉHO PROCESU V HRUBÉM JESENÍKU

Jan UNUCKA[1,2], Ivo WINKLER[2] , Dušan ŽIDEK[2]

[1] VŠB-TU Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, jan.unucka@vsb.cz

[2] Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava, K Myslivně 3/2182, 708 00 Ostrava, Česká republika, jan.unucka@chmi.cz, winkler@chmi.cz, zidek@chmi.cz

Abstrakt

Proměnlivá příspěvková plocha povodí v rámci přímého odtoku je fenomén, jímž se zabývalo již více autorů, ze zásadních studií můžeme jmenovat práce Kirkbyho (1978), Bevena (2002, 2012), Dingmana (2015) nebo Kantora a kolektivu (2003). V zásadě se jedná o stanovení poměru příspěvkových ploch v závislosti na příčinné srážce a vlastnostech povodí, zejména pak geologických, morfometrických, půdních a hydrografických poměrech spolu s využitím půdy či porostní strukturou lesa. Předložená studie se zabývá tímto fenoménem na horních částech povodí Horní Opavy a Bělé v Hrubém Jeseníku, přičemž povodí U Vodárny je zároveň lesnicko-hydrologickým výzkumným povodím. Pro část terénního měření bylo využito geodetických a hydrometrických přístrojů včetně indukčních a akustických průtokoměrů a analyzátoru objemové půdní vlhkosti. Následně byla jednotlivá dílčí povodí podrobena morfometrickým a hydrografickým analýzám v programových prostředcích GIS, s pomocí kterých byly zároveň provedeny schematizace srážkoodtokových modelů HEC-HMS a MIKE SHE. Výstupy z modelování byly následně konfrontovány s výsledky terénního měření a provedeny korelace mezi simulovanými a měřenými hodnotami průtoku a objemové půdní vlhkosti, přičemž koeficient determinace prakticky ve všech případech překročil hodnotu 0.65. Předběžné výsledky by měly podpořit dosavadní spolupráci VÚLHM a ČHMÚ v rámci lesnicko-hydrologického výzkumu a zároveň pomoci pochopit odtokovou odezvu povodí na odlišnou příčinnou srážku včetně extrémních povodňových situací, kdy příspěvková plocha povodí logicky narůstá.

Klíčová slova: výzkumné povodí; charakteristiky povodí; GIS; hydrologický model.

Abstract

The varied contribution area of the whole catchment spatial extent within the scope of the direct outflow is a phenomenon that has been dealt with by more authors; we can name the works of Kirkby (1978), Beven (2002, 2012), Dingman (2015), or Kantor et al. (2003). Basically, it is the determination of the ratio of the contribution areas depending on the causal precipitation and the characteristics of the river basins, especially the geological, morphometric, soil and hydrographic conditions, together with the land use or forest structure. The presented study deals with this phenomenon in the upper parts of the Upper Opava and Bělá basins in Hrubý Jeseník, while the basin U Vodárny is also an established forest-hydrological research river basin. Geodetic and hydrometric instruments, including inductive and acoustic discharge samplers and the volumetric soil moisture analyser, were used for part of field measurements. Subsequently, the individual subbasins were subjected to morphometric and hydrographic analyses in GIS program tools, which were also used for the HEC-HMS and MIKE SHE rainfall-runoff models schematizations. Particular outputs from the modelling infrastructure were then confronted with the results of field measurements and correlations between simulated and measured flow values and volumetric soil moisture were performed, with a determination factor practically in all cases exceeding the value 0.65. Preliminary results should support existing cooperation between Forestry and Game Management Research Institute and Czech Hydrometeorological Institute in the framework of forest-hydrological research while helping to understand the drainage response of the catchment area to a different causal rainfall events, including extreme flood situations when the contribution area of the river basin logically grows.

Keywords: research basin; basin characteristics; GIS; hydrological model.

ÚVOD

Role malých lesních povodí je mimořádně významná při generování a transformaci odtoku z krajiny, která se projevuje při běžných odtokových situacích v průběhu hydrologického roku, jejich význam narůstá při výskytu extrémů, tj. v případě sucha nebo povodně. Vliv lesa na odtok vody z krajiny je v ČR dlouhodobě monitorován, lesnicko-hydrologický výzkum probíhal v letech 1928 – 1934 na povodích Kychová a Zděchovka (Válek 1977), v roce 1953 byl přenesen do Beskyd na povodí Červík a Malá Ráztoka. V Jeseníkách bylo zřízeno výzkumné povodí U Vodárny v povodí Bělé. Cílem sledování výzkumných povodí je snaha o vyjádření vlivu lesa na odtokové poměry z hlediska kvantity a kvality vod z dlouhodobého pohledu. Výzkumná povodí poskytují díky dlouhodobému a pravidelnému monitoringu meteorologických a hydrologických prvků rozsáhlý a velmi kvalitní podkladový materiál pro zkoumání a pochopení srážkoodtokových vztahů v závislosti na hydrosynoptické situaci či změnách vybraných parametrů v rámci povodí. Jako mimořádně výkonný a účinný nástroj hydrologického výzkumu se prosadily do hydrologické praxe hydrologické matematické modely a geoinformační technologie, které poskytují možnost simulace a predikce chování hydrologických systémů v čase a prostoru. Pro tyto nástroje jsou výsledky pravidelně prováděného monitoringu a sledování základním stavebním kamenem, kvalitní vstupní data tedy představují klíčový předpoklad přípravy a provozu funkčních systémů vzájemné spolupracujících GIS a matematických modelů. Pro lesnicko-hydrologický výzkum na malých povodích je tedy klíčových faktorem využití co nejmodernějších technologií na úrovni monitoringu (stacionární měření, hydrometrické přístroje), analýz území v programových prostředcích GIS a konečně matematického modelování. Pro stanovení poměru příspěvkových ploch v závislosti na příčinné srážce a vlastnostech povodí, zejména pak geologických, morfometrických, půdních a hydrografických poměrech spolu s využitím půdy či porostní strukturou lesa byla zvolena povodí Šumného potoka (výzkumné povodí VÚLHM U Vodárny) a povodí Černé Opavy. V rámci příspěvku budou stručně uvedeny aspekty terénního průzkumu povodí (geodetická a hydrometrická měření), GIS analýz území založených na zejména na morfometrických a hydrologických analýzách DMR a konečně výstavby, provozu a kalibrace srážkoodtokových modelů, zejména pak plně distribuovaných modelů DHI MIKE SHE a SIMWE. Vycházelo se zejména z praktických zkušeností v rámci monitoringu nejen těchto povodí, ale i z konceptů variabilních příspěvkových ploch povodí během příčinné srážky (viz např. Hewlett 1969, Dingman 2015, Chang 2013 nebo Beven 2012), přičemž tato vstupní hypotéza byla ověřována pomocí hydrometrických měření (vodní stavy, průtoky a jejich postupné změny v rámci nárůstu plochy povodí, měření půdní vlhkosti), analýz DMR a dalších terénních dat v GIS a konečně pomocí simulací aparátem plně distribuovaných srážkoodtokových modelů. Výsledky byly rovněž konfrontovány s obdobnými studiemi z Pensylvánie (Lin et al. 2006, Baldwin et al. 2017), Québecu (James et Roulet 2009), Saskatchewanu (Mengistu, S. G. et Spence, C. 2016), Aberdeenu (Ala-aho et al. 2017), Vogéz (Ambroise 2016) nebo Jizerských hor (Kulasová, Beven et al. 2014). Monitoring a vyhodnocení základních komponent srážkoodtokové procesu na těchto povodích zajišťuje Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti (VÚLHM), více na stránkách ústavu http://www.vulhm.cz/zajisteni_dlouhodobeho_sledovani), který v této oblasti velmi úzce spolupracuje s Českým hydrometeorologickým ústavem, konkrétně ČHMÚ pobočkou Ostrava. Na druhém pilotním povodí Černé Opavy (2-02-01-0030) je stacionární měření zajištěno hlásným profilem ČHMÚ Ostrava kategorie B HPPS ČR Černá Opava / Mnichov (DBČ 258100), viz evidenční list hlásného profilu na odkazu http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=20241095.

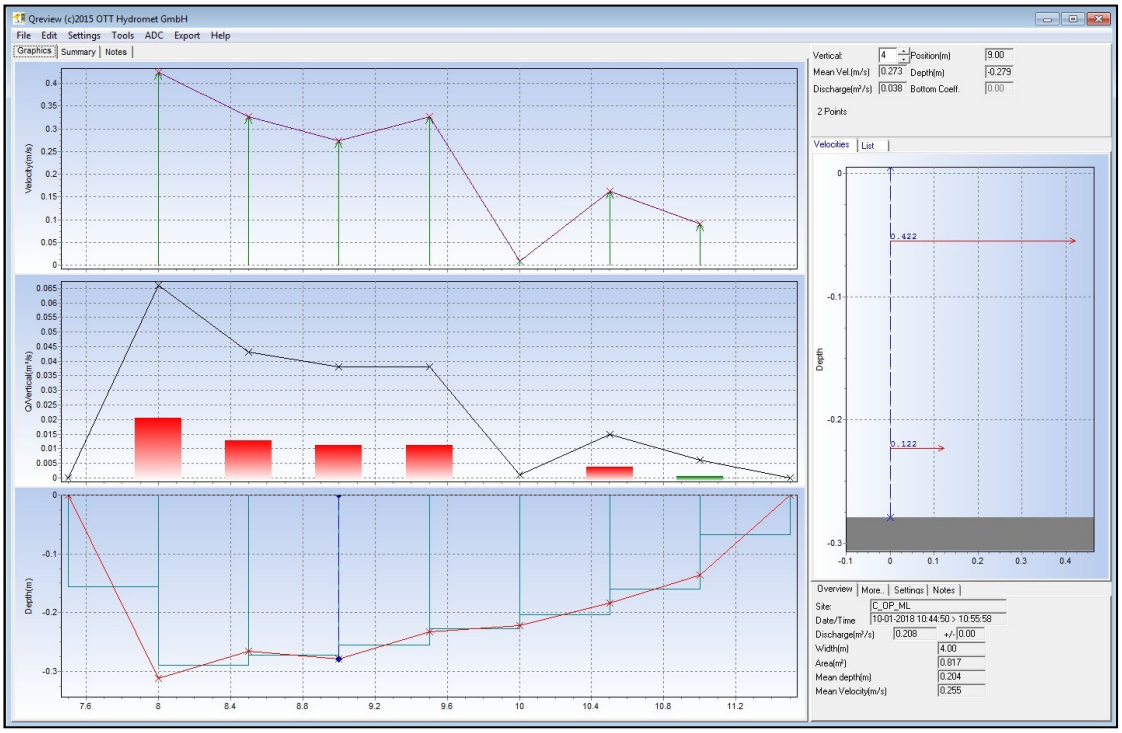
POUŽITÁ METODIKA A NÁSTROJE

Celou studii lze rozdělit do několika základních etap, které se nadále vzájemně prolínají:

1. Geodetická a hydrometrická měření, primární a sekundární zpracování hydrologických dat (tzn. měřících kampaní i dlouhodobého monitoringu).
2. Analýzy území v GIS, tvorba odvozených geodat a GIS vrstev.
3. Výstavba, kalibrace a provoz hydrologických modelů (zejména plně distribuovaných srážkoodtokových.

Geodetické zaměření objektů všech pilotních lokalit proběhlo s využitím konvenčních geodetických přístrojů a GNSS technologií. Krom totální stanice Topcon GTS-225 (http://www.topcon.com.sg/survey/cs230.html)

byla použita byla dvoufrekvenční měřická GNSS aparatura Ashtech / Magellan s přijímačem ProMark 500 (viz např. https://gnss.co.jp/wp-content/uploads/2017/03/ProMark500-Brochure.pdf) která umožňuje zaměřit objekty s velmi vysokou polohovou přesností. Tato přesnost je ovlivněna kvalitou přijímaného signálu dostupných družic a signálu mobilních operátorů pro přijímání korekčních dat z referenčních stanic CZEPOS, což je síť permanentních stanic GNSS, kterou spravuje a provozuje ĆÚZK. Jelikož většina plochy zájmových povodí je situována v zalesněném území, probíhalo měření na těchto lokalitách v měsících mimo hlavní vegetační sezónu, aby byla zajištěna co možná nejvyšší kvalita signálu a tím dosaženo nejvyšší možné přesnosti. Nově naměřenými daty byly doplněny a upřesněny stávající polohopisné a výškopisné údaje pilotních lokalit (digitální model reliéfu, zaměření podélného a příčných profilů hlavního toku a případný geodetické a geometrické plány technických objektů v tocích) a zároveň vytipovány lokality pro měření půdních vlhkostí. Pomocí GNSS a ADCP (viz dále v textu) technologií byly taktéž zaměřeny další příčné profily koryt vodních toků, přičemž takto získaná výsledná data sloužila jako další podklad pro schematizaci hydrologických modelů. Hydrometrická měření proběhla a nadále probíhají za využití konvenčních hydrometrických vrtulí, zejména typu OTT31 pro vyšší průtoky (http://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-c31-958/) a OTT C2 pro nižší průtoky, nízkou hladinu a malé rychlosti proudění (http://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-c2-385/) indukčních přístrojů OTT Nautilus 2000 (http://www.scottech.net/products/hydro/current_meters_accessories/ott_nautilus/) a OTT MF-Pro (http://www.ott.com/en-us/products/water-flow-3/ott-mf-pro-water-flow-meter-968/) akustických přístrojů ADV YSI/SonTek FlowTracker1 (https://www.xylem-analytics.com.au/productsdetail.php?SonTek-FlowTracker-Handheld-ADV-15) a FlowTracker2 (https://www.sontek.com/productsdetail.php?FlowTracker2-Handheld-ADV-1) a konečně ADCP RDI Teledyne StreamPro (http://www.teledynemarine.com/streampro) a SonTek RiverSurveyor M9 (https://www.sontek.com/productsdetail.php?RiverSurveyor-S5-M9-14). Vybraná batygrafická a geometrická data z ADCP měření byla importována do schematizací hydraulických modelů pomocí vlastní vyvinuté aplikace (Unucka 2017). Průsaky byly měřeny přístrojem na měření objemové půdní vlhkosti Decagon ProCheck (http://www.ekotechnika.cz/procheck-cteci-a-zaznamove-zarizeni). Měření profilových rychlostí a Q výše uvedenými přístroji spolu s daty z dlouhodobého stacionárního monitoringu sloužilo pro následné parametrizace a kalibrace hydrologických modelů, zejména HEC-HMS, SIMWE a MIKE). Vyhodnocení všech měření probíhala dle platných metodických pokynů pro hydrometrická měření a primární zpracování hydrologických dat a výsledky, které nešly zahrnout do požadovaných tříd přesnosti, byly z dalšího zpracování vyřazeny (Boiten 2008).



Obr. 1. Vyhodnocení měření Q přístrojem OTT MF-Pro na profilu Černá Opava / Wurzlův mlýn.

Průzkum pilotních povodí a lokalit v programových prostředcích GIS využívaly zejména nástrojů pro analýzy digitálního modelu reliéfu (DMR), popř. povrchu (DMP). Základním zdrojem byl digitální model reliéfu 5. generace ČÚZK, který vznikl za využití dat leteckého laserového skenování. V tuto chvíli se jedná o nejmodernější oficiálně dostupný DMR pokrývající území ČR a s přípustnou polohovou a výškovou chybou v otevřeném i zalesněném terénu (bližší informace viz např. http://geoportal.cuzk.cz). Mezi standardní analýzy, které nabízí prakticky všechny komerční i open source programové balíky GIS, patří analýzy sklonu a orientace svahů. Mezi další analýzy DMR, které lze již označit za sofistikovanější a pro podobné účely i vhodnější, lze zahrnout tvorbu odvozených rastrů derivací DMR ve směrech S-J a V-Z, analýzy mikrodrsnosti reliéfu, tvorbu vlhkostních indexů území, tvorby hypsografických křivek, podélných a příčných profilů údolí a koryt toků (ty se využívají i při samotné schematizaci hydraulických modelů, viz dále v textu), elementárních forem reliéfu (které umožňují determinovat příkopy, valy a další terénní hrany či singularity v území). Mezi další efektivní nástroje můžeme zahrnout i různé moduly a modely řešící rastr směru odtoku a akumulace odtoku. V této souvislosti je nutné poukázat na fakt, že se až na výjimky nejedná o algoritmy řešící reálný odtok vody v 1D a 2D po hypotetické ploše DMR, ale mechanismy, které šetří de facto lokální morfometrii, příspěvkové plochy a potenciální akumulaci těchto příspěvků v dané buňce rastru. V tomto ohledu open source nástroje GRASS GIS a SAGA GIS nabízejí větší výběr nástrojů, nadto sofistikovanější než základní nástroje platformy ArcHydro pro ArcGIS. Pro detailnější popis jednotlivých nástrojů a práce s nimi i v kontextu této studie lze využít i práce autorského kolektivu, např. Fárek, Unucka (2016) nebo Fárek, Kosík, Ponížilová, Unucka (2017). V tomto ohledu jsou důležitým nástrojem moduly *SAGA Wetness Index* a *Topographic Wetness Index* v SAGA GIS a GRASS GIS (varianta TOPMODEL, tzn. topografický index dle Beven 2012), pomocí kterých byly v první etapě přímo vytipovány hlavní příspěvkové zóny povodí. Ty pak byly v dalších etapách ověřeny pomocí výše jmenovaných hydrometrických měření a simulacemi odezvy povodí na příčinnou srážku pomocí plně distribuovaných srážkoodtokových modelů. V rámci této skupiny programových prostředků byly použity nástroje HYDROG, HEC-HMS, SIMWE a MIKE SHE. Srážkoodtokový model HYDROG je rutinně využíván na ČHMÚ Ostrava pro zajištění operativní hydrologické prognózy HPPS ČR. Model byl využit pro vytipování a ověření odtokových epizod na povodích Bělé a Opavy, do kterých pilotní povodí patří. Model HEC-HMS (http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/), který je k dispozici coby freeware, umožňuje zejména nejčastěji používanou semidistribuovanou schematizaci povodí, tzn. schematizaci, kdy jsou zvolené hydrologicko - hydraulické parametry území distribuovány v rámci dílčích ploch (subpovodí, vodní nádrže) či úseků (úseky vodních toků) povodí. Je zřejmé, že míra detailu schematizace je přímo úměrná volbě počtu dílčích elementů, která pak určuje velikost těchto elementárních ploch (platí pro subpovodí, nikoliv vodní nádrže) či úseků (koryta toků).

Obr. 2. Měření Q na Šumném potoce u Vodárny pomocí ADV FlowTracker2 (foto Ivo Winkler).

Od veze 3.1 umožňuje model HEC-HMS i distribuovanou schematizaci výškopisných či vybraných hydrologických parametrů území (např. pro metody SCS-CN či SAC-SMA), přičemž v současných verzích 4.x lze v rámci jednoho projektu kombinovat semidistribuované i plně distribuované přístupy v rámci schematizace povodí. Model je znám svou dobrou konektivitou na GIS, a to jak v rámci podpory vybraných rastrových a vektorových formátů geodat, tak v rámci extenze HEC-GeoHMS pro ArcGIS či dříve ArcView GIS (http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/). Konektivita na další nástroje a modely USACE/HEC je zajištěna např. správcem časových řad a rastrů HEC-DSSVue nebo v rámci nové platformy HEC-WAT (aktuálně ve verzi 1.0). Model je verifikován a validován bezpočtem studií v celosvětovém měřítku a je zařazen do seznamu hydrologických modelů akceptovaných FEMA/NFIP. V rámci této studie byly použity metody SCS-CN a SAC-SMA spolu s metodou lineární nádrže a kinematické vlnové aproximace. Plně distribuovaný srážkoodtokový model SIMWE je jedním z nejčastěji využívaných srážkoodtokových modelů v rámci platformy GRASS GIS (viz např. Unucka 2014, Fárek, Unucka et al. 2015 nebo Fárek et Unucka 2016). Byť se nejedná o plnohodnotný srážkoodtokový model řešící všechny komponenty srážkoodtokového procesu (v současnosti např. zanedbává základní odtok, viz Unucka 2014), je velice vhodný pro determinaci hlavních zón povrchového odtoku díky jeho řešení za využití tzv. *walkers*, což výrazně urychluje simulaci povrchového odtoku zejména nad velkými DMR o rozsahu větším než 2 tis. buněk v jakémkoliv směru. To platilo i v rámci simulaci na pilotních povodích, kdy počet buněk byl dán velikosti povodí a rozlišením DMR 4G a 5G a ve všech případech přesahoval 2 tis. buněk rastru podle podél obou os. Výstupy GIS analýz a srážkoodtokových modelů byly opět konfrontovány s daty ČHMÚ a VÚLHM a daty ÚHÚL (hydrické řady SLT) a VÚMOP (retenční vodní kapacita půd). Pomocí těchto dat byly rovněž modely kalibrovány, viz např. Houser, Shuttleworth et al. (1998).

POPIS PILOTNÍCH POVODÍ

Povodí U Vodárny v povodí Bělé, je charakteristické svou geologickou stavbou, které spolu s vegetací kvantitativní a kvalitativní ukazatele povrchových a podzemních vod ovlivňuje. Je situováno v povodí Šumného potoka, číslo hydrologického pořadí 2-04-04-0760, náleží katastrálnímu území obce Adolfovice. Hlavní hydrografická osa je situována coby levostranný přítok Šumného potoka, v podkladech bývá nejednotně nazýván – v některých pramenech a mapách je uváděn jako bezejmenný přítok, jinde jako Hraniční nebo Skřivánčí potok. Rozloha výzkumné části činí 1.45 km^2, celková rozloha povodí Šumného potoka po soutok s hlavní hydrografickou osou této oblasti Bělou pak činí 17.1 km^2. Celková délka Šumného potoka po soutok s Bělou je 9.81 km. Pozorování zde probíhá od roku 1987.

Povodí náleží do geomorfologických podcelků Bělská pahorkatina (9e-3a) a Medvědská hornatina (4c-7b) budovaných metamorfovanými vulkanickými horninami jesenického bazického masivu silezika převážně proterozoického a paleozoického stáří (ortoruly, amfibolity, diabasy, porfyry ad.). Kvartérní fluviální sedimenty jsou vyvinuty jen ojediněle v blízkosti vodních toků (Demek, Novák et al. 1992).

V rámci hydrogeologické rajonizace ČR povodí náleží k rajónu 6431 - Krystalinikum severní části Východních Sudet, jihovýchodní část. Přes komplikovanou stavbu metamorfitů s lokálním výskytem sedimentárních hornin lze tuto oblast z hlediska oběhu podzemních vod označit ve srovnání s beskydskými povodími za příznivější. Z půd dominují kambizemě, které ve vyšších polohách přecházejí v podzoly, v okolí závěrového profilu Šumného potoka jsou vyvinuty i fluvizemě a pseudogleje (Šafář et al. 2003).

Úpravna vody Adolfovice, která jímá vody ze Šumného a Borového potoka je dimenzována na kapacitu 55 $l.s^{-1}$, přičemž Q_A samotného Šumného potoka představuje 288 $l.s^{-1}$. Průměrná nadmořská výška povodí je 820 m n.m., průměrná sklonitost povodí je 15°. Dle Quittovy klasifikace území náleží oblastem CH4, CH6 a CH7. Průměrná roční teplota je 7.4 °C. Dlouhodobý roční průměr srážek je 916 mm, Q_A povodí U Vodárny je 29 $l.s^{-1}$ (Zdroj: Český hydrometeorologický ústav).

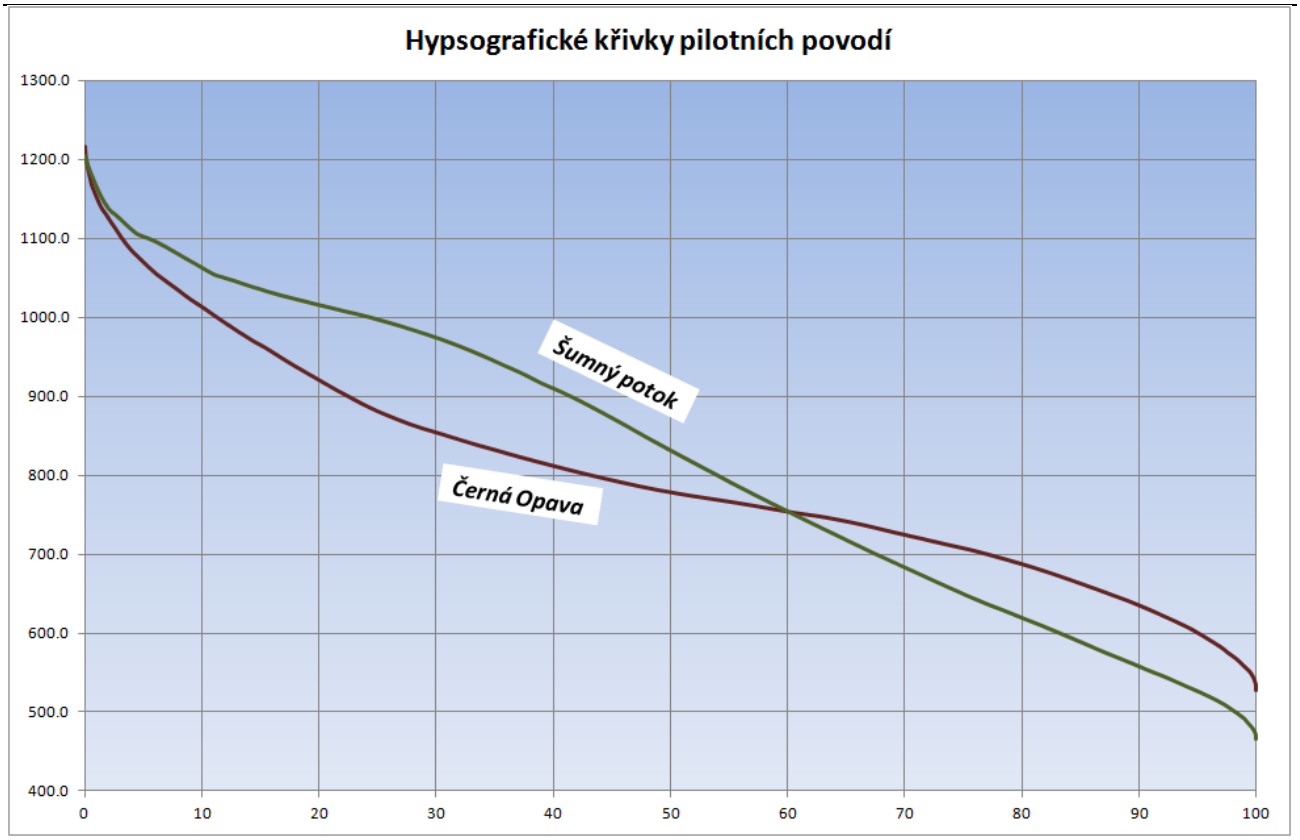
Hustota odtokové sítě celého povodí je 1.57 $km.km^{-2}$. Nejbližšími vodoměrnými stanicemi ČHMÚ jsou Bělá – Jeseník (DBČ 311000) a Staříč – Lipová-lázně (DBČ 312000). Povodí je v současnosti z 97 % zalesněno, necelá 3 % tvoří pastviny, pole a další zemědělské plochy, vodní plochy a zástavba zaujímají méně než 0.5 % plochy povodí. V porostech dominuje smrk ztepilý (*Picea excelsior*) a buk lesní (*Fagus sylvatica*) s příměsí

jedle (*Abies alba*) a dalších listnáčů (*Fraxinus sp*., *Alnus sp*., *Sorbus sp* na suťoviscích či okrajích pasek (Weissmanová et al. 2004).

Pilotní povodí Černé Opavy je, co se týče přírodních poměrů obdobné, rozhodně ne však identické, což se samozřejmě projevuje i na režimu odtoku. Orientace základní údolnice Černé Opavy stejně jako prakticky celého povodí je ve směru SSZ - JJV. Povodí náleží do geomorfologických podcelků Medvědská hornatina (4c-7b), Rejvízská hornatina (4c-6b) a Hynčická hornatina (4c-6c). Stran geologické stavby je povodí rovněž převaha metamorfovaných hornin v podloží, místy s příměsí méně metamorfovaných vulkanitů. Kvartérní sedimenty jsou pak výrazněji vyvinuty pouze kolem vodních toků a v oblasti rašelinišť Rejvízu. V rámci hydrogeologické rajonizace ČR povodí náleží k rajónu 6431 - Krystalinikum severní části Východních Sudet, jihovýchodní část. Z půd jsou opět nejvíce zastoupeny kambizemě, které ve vyšších polohách přecházejí v podzoly, v nižších partiích údolnic hlavních vodních toků jsou fluvizemě, v místech výskytu rašelinišť pak organozemě, na které navazují kyselé pseudoglejové kambizemě. Krom dřevin vyskytujících se stejně jako v povodí Šumného potoka zde nalezneme i borovici blatku (*Pinus uncinata*) na rašeliništích v povodí Bublavého potoka či místy jesenický fenotyp modřínu opadavého (*Larix decidua*). Průměrná nadmořská výška povodí je 799 m n. m., průměrná sklonitost povodí je 11°. Dle Quittovy klasifikace území náleží rovněž oblastem CH4, CH6 a CH7 (Demek, Novák et al. 1992, Weissmanová et al. 2004).

Tab. 1. Základní hydrologické údaje povrchových vod pilotních povodí odvozené v aplikaci AGPosudek pro ArcGIS 10.4 z katastru základních údajů povrchových vod 1981 - 2010 ČHMÚ dle platných metodik pro odvozování charakteristik povrchových vod.

Název lokality	**Hydrologické pořadí**	**Q_A**	**Q_1**	**Q_2**	**Q_5**	**Q_{10}**	**Q_{20}**	**Q_{50}**	**Q_{100}**
Šumný potok pod levostranným přítokem	2-04-04-0760	0.288	2.36	4.17	7.76	11.5	16.3	24.3	31.9
Pozn.: Údaje Q_A a m-denních vod jsou uvedeny v $l.s^{-1}$, *N-leté vody pak v $m^3.s^{-1}$.*			**Q_{30d}**	**Q_{60d}**	**Q_{90d}**	**Q_{120d}**	**Q_{150d}**	**Q_{180d}**	**Q_{210d}**
			564.00	415	337	284	246	215	192
		A [km^2]	**Q_{240d}**	**Q_{270d}**	**Q_{300d}**	**Q_{330d}**	**Q_{355d}**	**Q_{364d}**	-
		13.37	171	150	132	110	88.0	69.0	-
Název lokality	**Hydrologické pořadí**	**Q_A**	**Q_1**	**Q_2**	**Q_5**	**Q_{10}**	**Q_{20}**	**Q_{50}**	**Q_{100}**
Černá Opava - stanice Mnichov	2-02-01-0030	1.19	4.83	9.06	17.0	25.0	34.8	50.8	65.6
Pozn.: Veškeré údaje jsou uvedeny v $m^3.s^{-1}$.			**Q_{30d}**	**Q_{60d}**	**Q_{90d}**	**Q_{120d}**	**Q_{150d}**	**Q_{180d}**	**Q_{210d}**
			1.62	1.17	0.959	0.814	0.715	0.657	0.589
		A [km^2]	**Q_{240d}**	**Q_{270d}**	**Q_{300d}**	**Q_{330d}**	**Q_{355d}**	**Q_{364d}**	-
		50.5	0.525	0.469	0.404	0.348	0.255	0.190	-

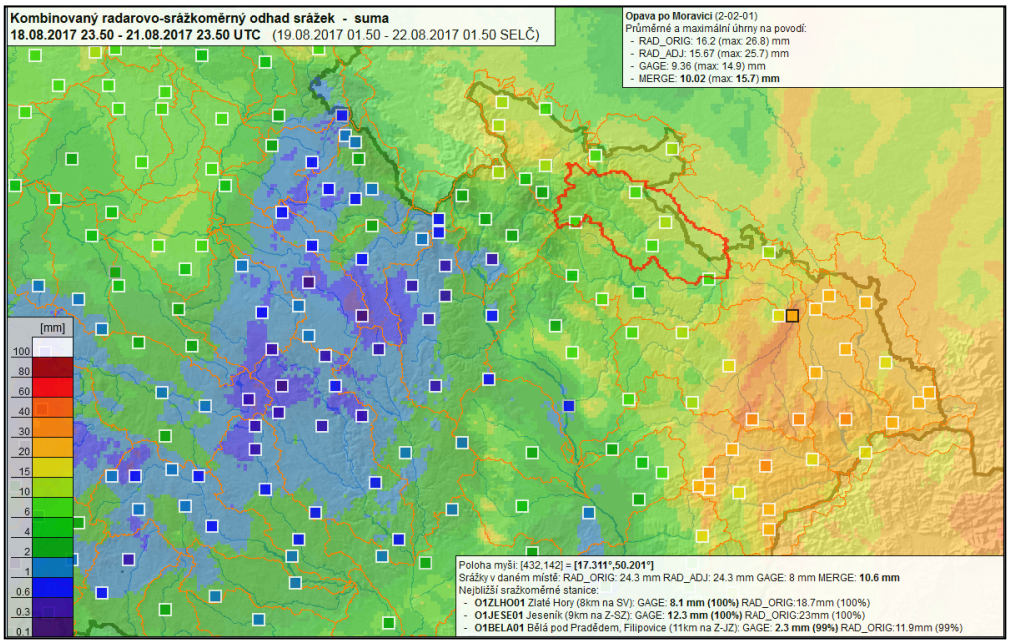


Obr. 3. Hypsografické křivky pilotních povodí.

Obr. 4. Současný stav meteorologické zahrádky a vodoměrného profilu na povodí U Vodárny (foto Jan Unucka 8/2017).

POUŽITÁ DATA, PARAMETRIZACE A KALIBRACE MODELŮ

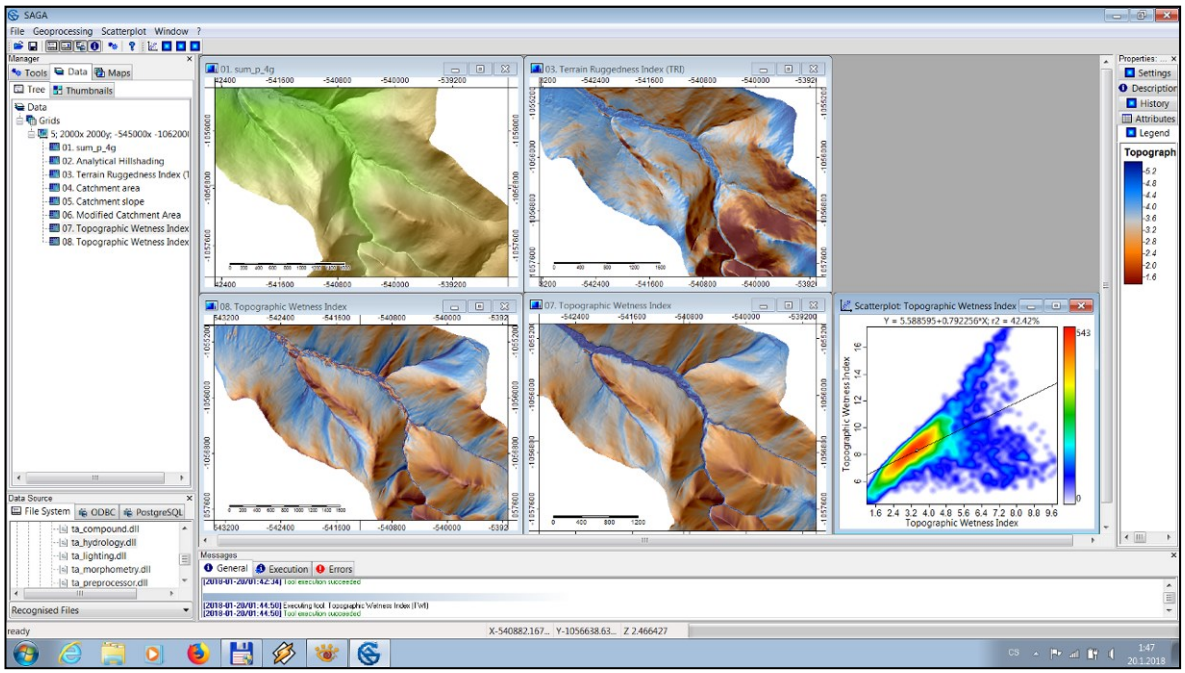
V rámci studie byla využita především data z dlouhodobého monitoringu území ČHMÚ a VÚLHM. Jednalo se zejména o řady srážek (staniční síť a radarové odhady srážek), teplot vzduchu a odvozených Q. Z dalších použitých dat lze jmenovat retenční vodní kapacitu půd (RVK) a morfogenetický klasifikační systém půd (MKSP) VÚMOP nebo soubory lesních typů ÚHÚL. Dále byla využita data o podzemních vodách z databází ČHMÚ nad podklady České geologické služby. Terénní data zahrnovala především DMR 4G a 5G ČÚZK a data ZABAGED či DIBAVOD (topologický model hydrografické sítě po revizi ČHMÚ). Rovněž byla využita revidovaná vrstva rozvodnic ČHMÚ. Terénní data z geodetických (měřící body) a hydrometrických (Q, půdní vlhkosti) měření byla pořízena přístrojovou technikou popsanou v kapitole „Použitá metodika a nástroje“. DMR 5G v rozlišení 1x1 m nebo 5x5 m vstupoval do analýz v SAGA GIS a GRASS GIS, konkrétně modulů *TWI*, *r.slope.aspect, r.terraflow, r.watershed* nebo *r.topmodel*. S těmito DMR byly také provedeny simulace pomocí modelu SIMWE / GRASS GIS. DMR 5G v rozlišení 5x5 m byl vstupem pro schematizaci semidistribuovaného srážkoodtokového modelu HEC-HMS. Operativní srážkoodtokový model HYDROG data DMR jakéhokoliv typu přímo nevyužívá, odtok z ploch povodí i v korytech toků je řešen pomocí orientovaného síťového grafu, přičemž pro jednotlivá povodí (tzv. zavěšené plochy) byly odvozeny průměrné sklony z DMÚ 25 (viz např. Unucka 2014). Model DHI MIKE SHE byl využit s rozlišením buňky 10x10 m a 15x15 m z důvodu snížení rozdílů mezi rozlišeními dalších vstupních dat (např. RVK, srážky) a zkrácení doby výpočtu, která se u plně fyzikálního a distribuovaného řešení s napojením na hydrogeologický model MODFLOW a hydraulický model MIKE 11 pohybovala v rozmezí 3 - 5 hodin. Pro srovnání výpočet pro stejné časové rozmezí v modelech HYDROG nebo HEC-HMS trvá řádově jednotky až desítky sekund. V modelu MIKE SHE byly pro hydrologickou transformaci ovzdušné srážky použity metody kinematické vlnové aproximace pro 2D povrchový odtok z ploch povodí, Richardsovy rovnice pro infiltraci a perkolaci nebo dynamické vlnové aproximace pro 1D odtok v korytech toků v rámci hydraulického modelu MIKE 11. Evapotranspirace byla simulována pomocí metody Kristensen-Jensen (Unucka 2014). V modelu HYDROG je pro stanovení efektivní srážky implementována metoda Hortona, odtok vody orientovaným síťovým grafem je řešen St. Venantovými rovnicemi a kinematickou vlnovou aproximací 1D/2D. Základní odtok je v modelu HYDROG řešen metodou lineární nádrže. Ve srážkoodtokovém modelu HEC-HMS byly pro hydrologickou transformaci ovzdušné srážky použity metody SCS-CN (událostní režim) a SAC-SMA (kontinuální režim), recesní metoda a metoda lineární nádrže pro základní odtok a konečně metoda kinematické vlnové aproximace pro 1D odtok v korytech toků. Pro schematizaci povodí byly použita extenze HEC-GeoHMS a AGPosudek, což je interní extenze ČHMÚ, která umožňuje odvození dalších parametrů, např. dobu koncentrace nebo revizi hodnot CN křivek. Epizody byly vytipovány z dat dlouhodobého monitoringu VÚLHM, popř. na základě měření ČHMÚ. Zde můžeme zařadit srážkovou událost 8/2017, viz obrázek 5.



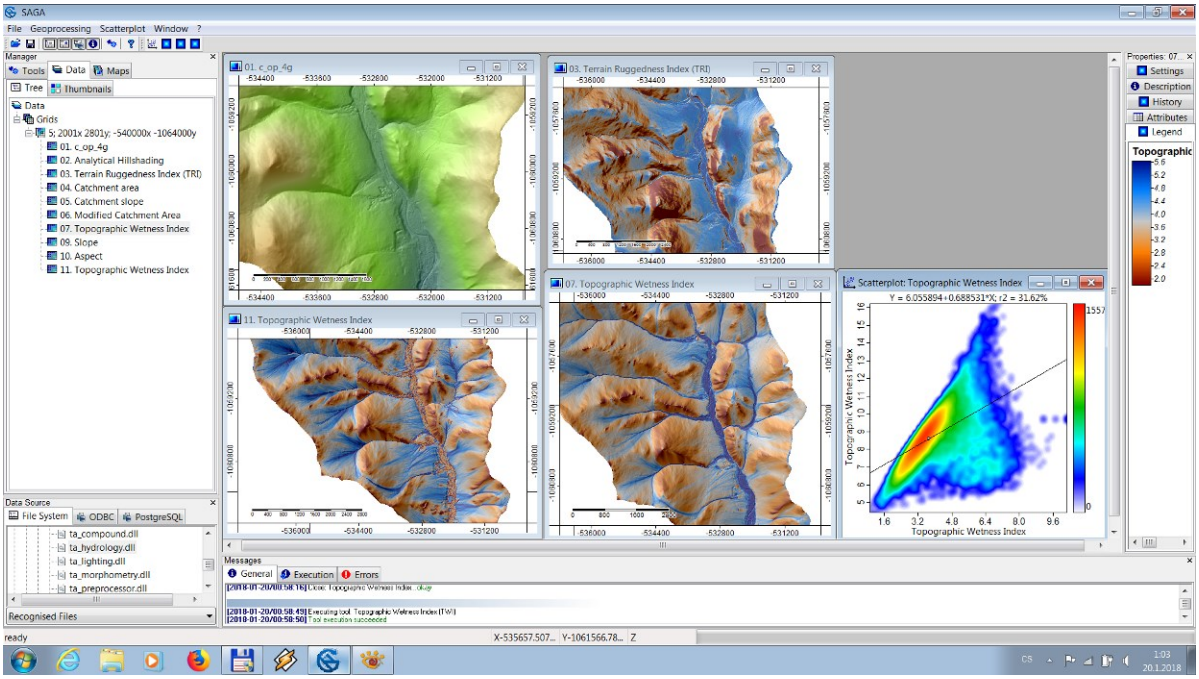
Obr. 5. Srážkové úhrny (72 h) pro epizodu 8/2017. Kombinované odhady srážek (radar + srážkoměr) ČHMÚ.

VÝBĚR Z VÝSLEDKŮ

Rozsah příspěvku neumožňuje prezentaci veškerých výstupů a výsledků, proto se autorský kolektiv omezil na výstupy, které jsou v relaci ke konceptu variabilní příspěvkových ploch. Jedná se zejména o výstupy z analýz DMR v programových prostředcích GIS a výsledky ze simulací v plně distribuovaných srážkoodtokových modelech SIMWE a MIKE SHE.

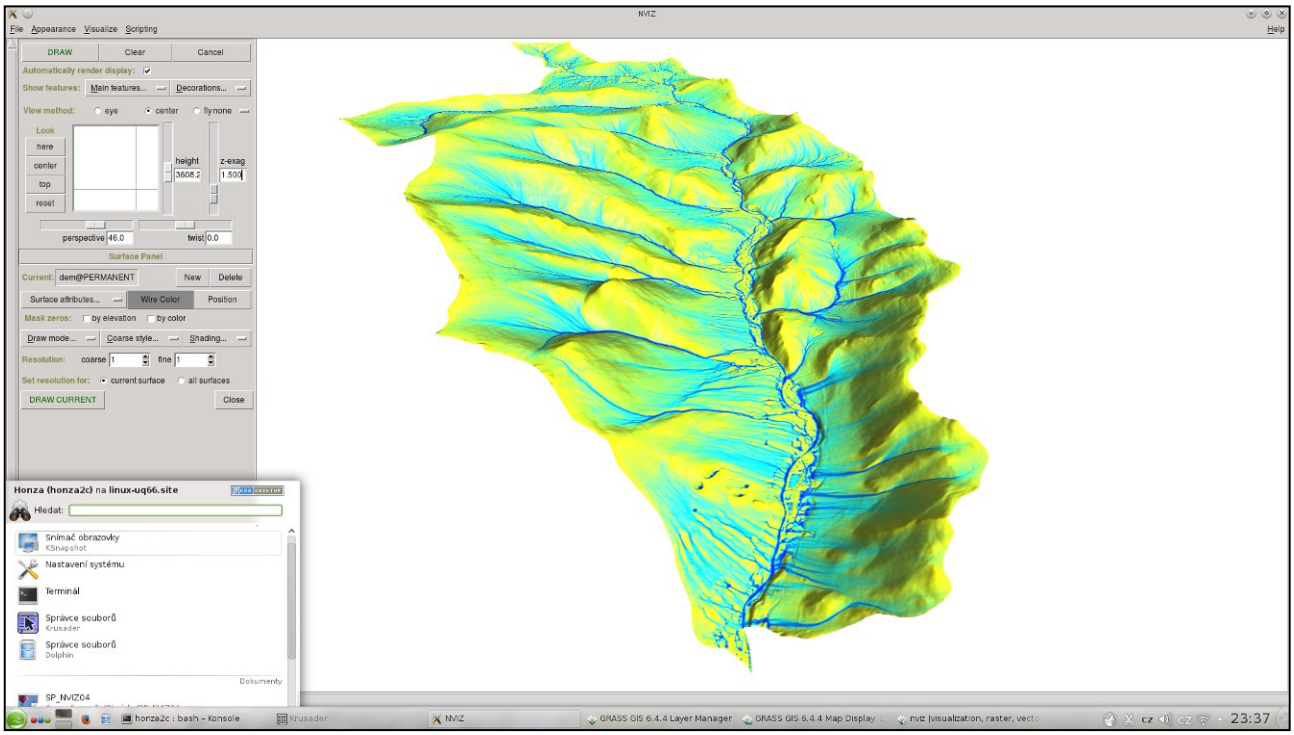


Obr. 6. Výsledky analýz DMR 5G na pilotním povodí Šumného potoka. Pořadí ve směru hodinových ručiček: DMR s podkladem stínovaného reliéfu, drsnost reliéfu, korelace mezi topografickým indexem TOPMODEL a vlhkostním indexem reliéfu SAGA GIS, vlhkostní index reliéfu SAGA GIS a topografický index TOPMODEL / GRASS GIS.

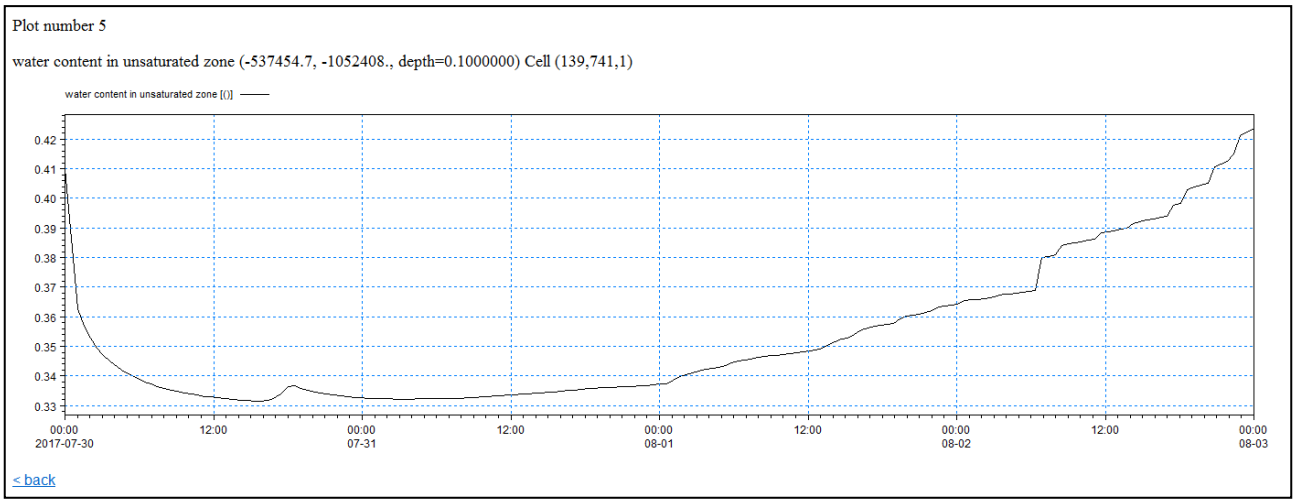


Obr. 7. Výsledky analýz DMR 5G na pilotním povodí Černé Opavy. Pořadí ve směru hodinových ručiček: DMR s podkladem stínovaného reliéfu, drsnost reliéfu, korelace mezi topografickým indexem TOPMODEL a vlhkostním indexem reliéfu SAGA GIS, vlhkostní index reliéfu SAGA GIS a topografický index TOPMODEL / GRASS GIS.

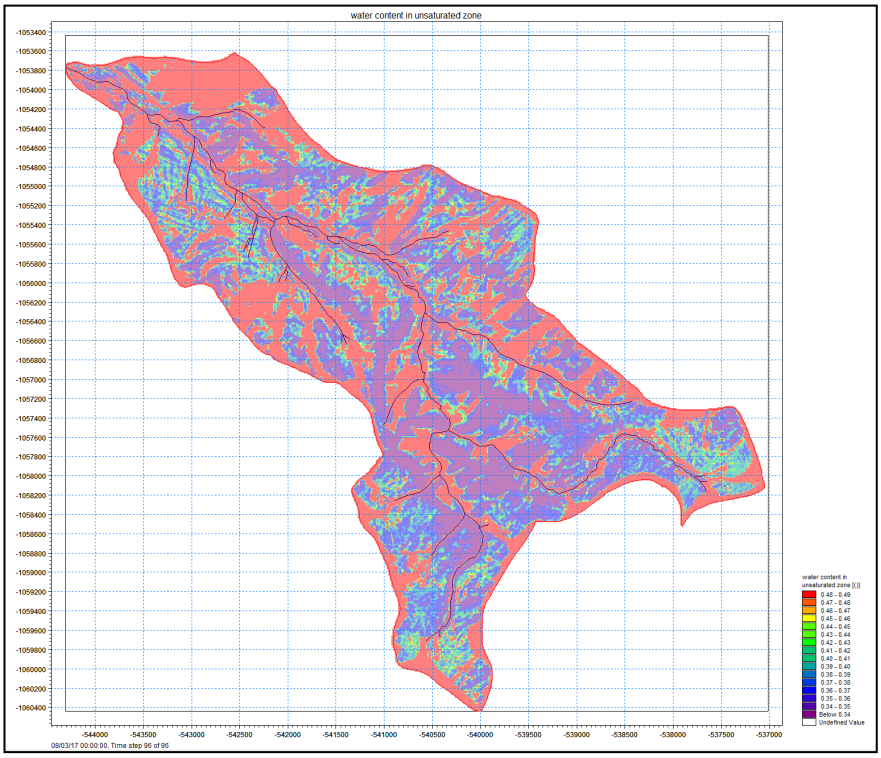
Obrázky č. 6 a 7 ilustrují výsledky analýz DMR v SAGA GIS a GRASS GIS, přičemž je patrná dobrá míra shody mezi indexem vlhkosti terénu SAGA GIS a GRASS GIS / TOPMODEL. Tyto výstupy byly dále ověřeny terénním měřením (půdní vlhkosti), daty ÚHÚL (hydrické řady SLT) a simulacemi v plně distribuovaných srážkoodtokových modelech SIMWE a MIKE SHE.



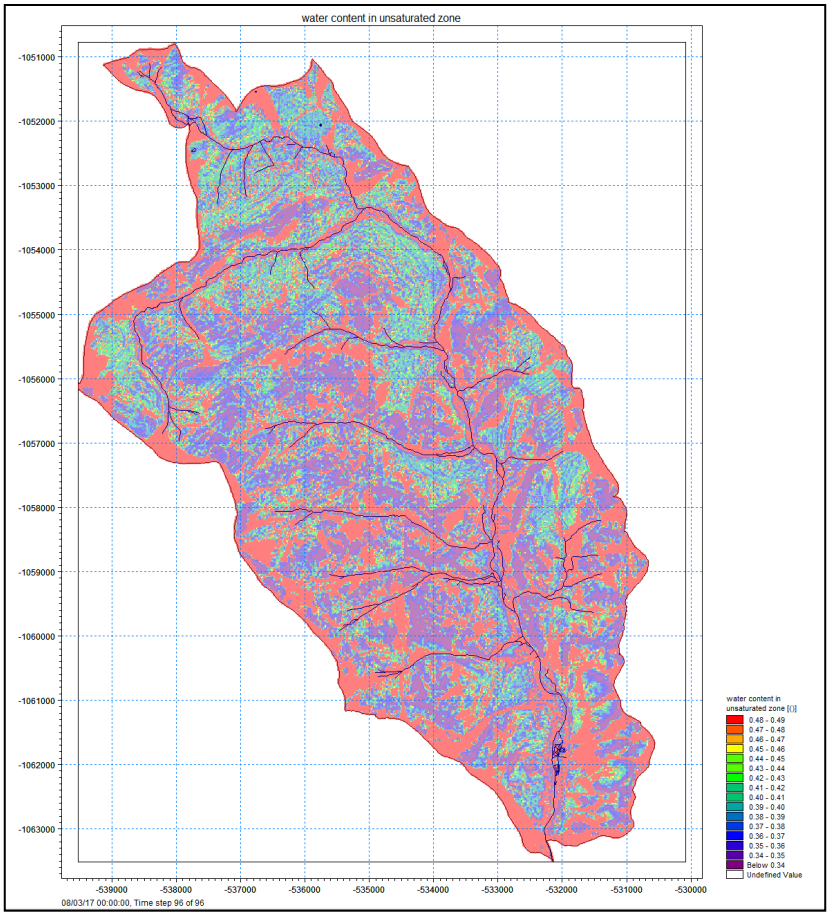
Obr. 8. *Výsledky simulace výšky povrchového odtoku pro epizodu 8/2017 na povodí Černé Opavy modelem SIMWE / GRASS GIS. Vizualizace rastru výšky povrchového odtoku v NVIZ / GRASS GIS.*



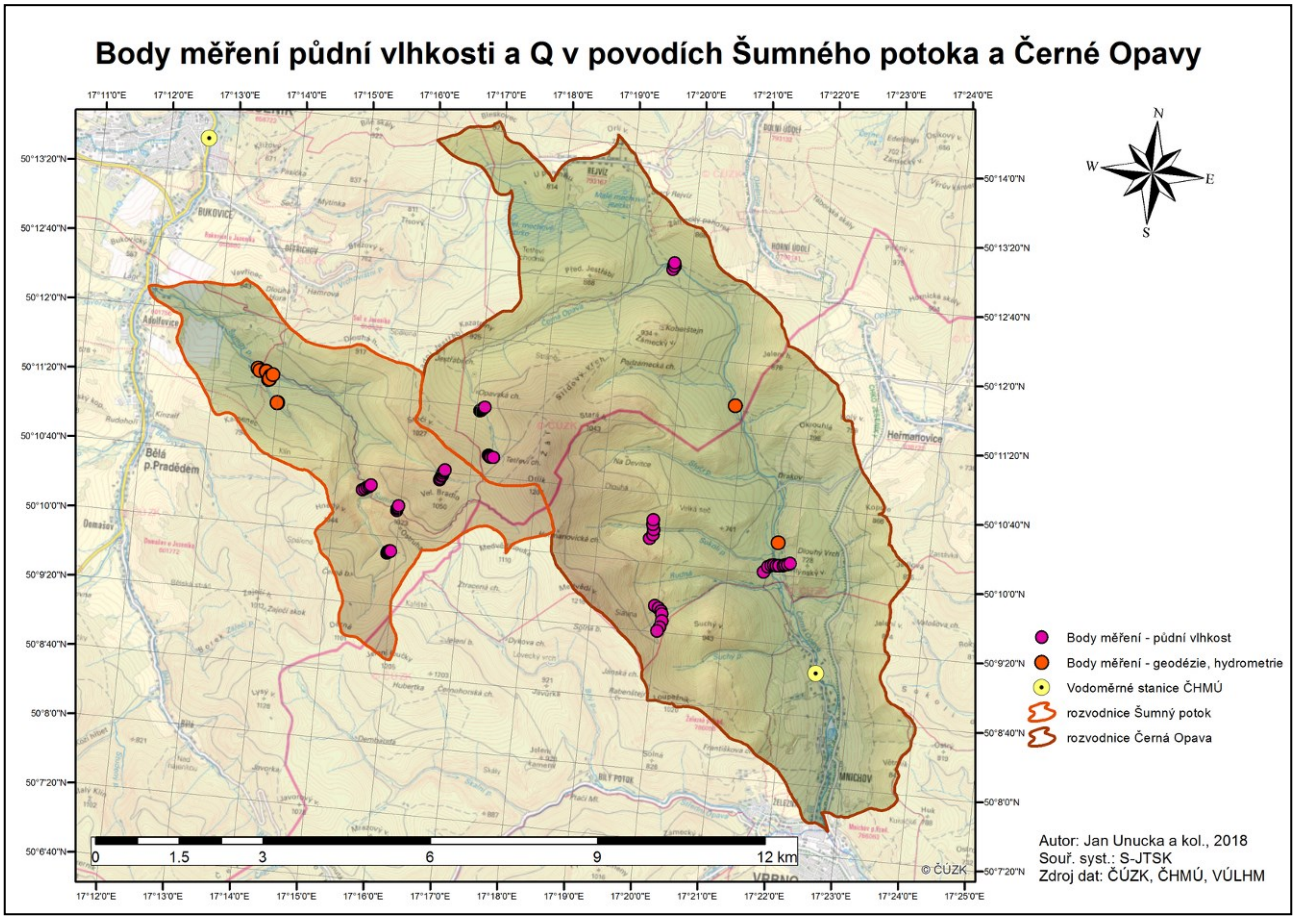
Obr. 9. *Výsledky simulace výšky povrchového odtoku pro epizodu 8/2017 na povodí Černé Opavy modelem MIKE SHE. Vizualizace objemové vlhkosti půdy v bodě měření č. 4 v hloubce 10 cm pod povrchem.*



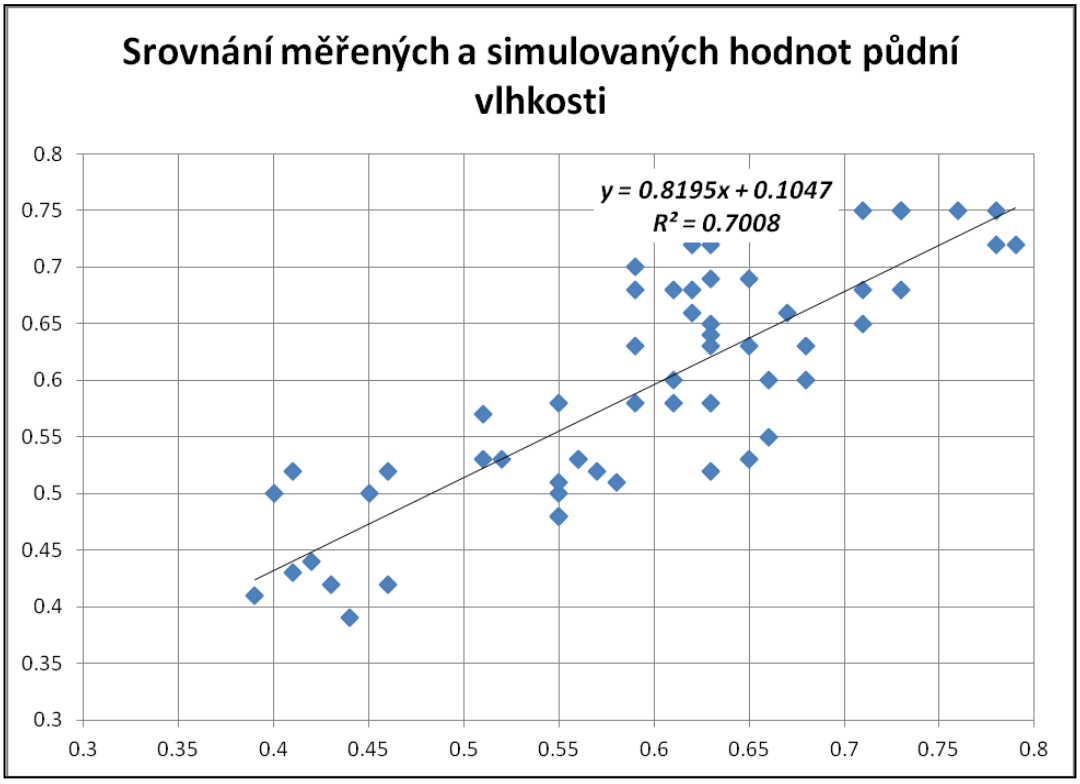
Obr. 10. Výsledky simulace výšky povrchového odtoku pro epizodu 8/2017 na povodí Šumného potoka modelem MIKE SHE. Vizualizace objemové vlhkosti půdy formou rastru pro konečný časový krok simulace.



Obr. 11. Výsledky simulace výšky povrchového odtoku pro epizodu 8/2017 na povodí Černé Opavy modelem MIKE SHE. Vizualizace objemové vlhkosti půdy formou rastru pro konečný časový krok simulace.



Obr. 12. Lokality a profily s měřením Q a půdních vlhkostí.



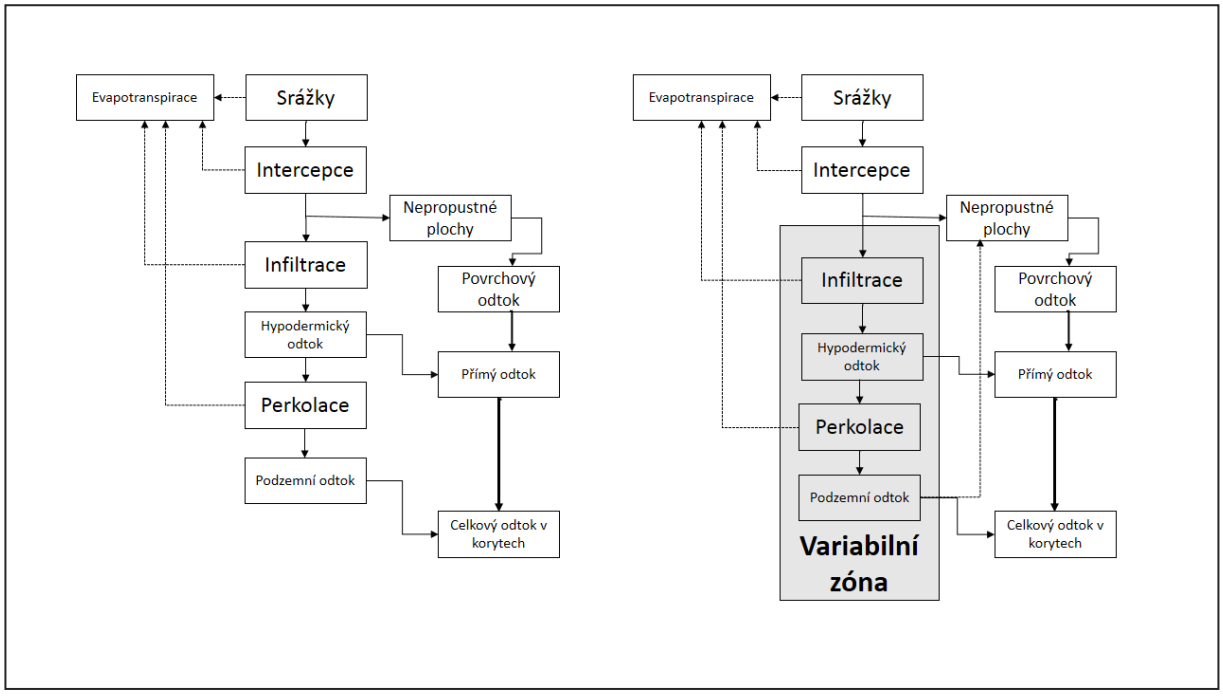
Obr. 13. Srovnání měřených hodnot objemové půdní vlhkosti (osa X) a hodnot simulovaných modelem DHI MIKE SHE (osa Y).

Na obrázku č. 13 jsou v grafu srovnány hodnoty měřených a simulovaných hodnot půdní vlhkosti pořízených a simulovaných pro epizody 8/2017, 11/2017 a 12/2017. Jde o body a transekty uvedené na obrázku č. 12. Je patrné, že kalibrovaný model (ať již na bodové hodnoty naměřených půdních vlhkostí nebo na hodnoty Q z hydrometrických měřících kampaní nebo odvozené ze staničního měření na vodoměrných profilech) vykazuje poměrně dobrou shodu výsledků simulací s hodnotami měřenými. Je však nutné poukázat na několik faktorů, které se zde propagují. Jedním z nich je současná technická nemožnost provést veškerá hydrometrická a pedologická měření v horizontu 1 - 3 hodiny. Tento efekt by takřka zcela vyřešilo rozšíření sítě dlouhodobého stacionárního měření na pilotních povodích. Druhým momentem je pak snížené rozlišení výpočetní sítě MIKE SHE (10 x 10 m na povodí Šumného potoka a 15x15 m na povodí Černé Opavy). Toto snížení rozlišení oproti původnímu rozlišení rastru DMR 5G je z důvodu snížení časové náročnosti simulace komplexního distribuovaného srážkoodtokového modelu. Poté dochází v několika ojedinělých případech k efektu, že 2 body pro měření objemové půdní vlhkosti jsou umístěny na jediné buňce výpočetní sítě MIKE SHE. Pak jsou tedy simulované hodnoty pro oba body identické. Toto lze opět řešit fragmentací modelu na dílčí subpovodí a zvýšení rozlišení výpočetní sítě na 1x1 m. S přihlédnutím k faktu, jaké prostorové rozlišení mají další vstupní data (např. rastry srážek ČHMÚ, data RVK VÚMOP či SLT ÚHÚL), autoři tuto variantu výpočtu zatím neaplikovali. Třetím faktorem přímo ovlivňujícím výpočty srážkoodtokových modelů je pak nejistota vstupních dat, zejména srážek v horských oblastech. I v případě využití kombinovaných odhadů srážek nelze uvažovat, že zejména podkorunové srážky ovlivněné intercepcí, které přímo dotují půdní profil v lesních porostech, jsou stanoveny přesně. Proto lze vnímat tyto výsledky (jakkoliv z pohledů autorů uspokojivé) spíše jako metodický příspěvek k tomu, jakými směry dále rozvíjet problematiku monitoringu a matematického modelování v lesnické hydrologii či simulace a analýzy dynamiky odtokového procesu a variabilních příspěvkových ploch ve vztahu k různým odtokovým situacím.

DISKUZE

V případě semidistribuovaných srážkoodtokových modelů spočívá jejich využití v kalibraci schematizací povodích Šumného potoka a Černé Opavy pro různé srážkoodtokové epizody, verifikaci a „regionalizaci“ parametrů zvolených metod (SCS-CN, Green-Ampt, lineární nádrž nebo kinematická vlnová aproximace), toto se v rámci studie týkalo modelů HYDROG a HEC-HMS v semidistribuovaném řešení (Unucka 2014). U plně distribuovaných modelů je prioritou vyšší míra detailu schematizace (která je dána rozlišením vstupních rastrů a následně samotné výpočetní sítě pro metody konečných rozdílů) a detailnější simulace srážkoodtokového procesu zahrnující explicitní řešení více komponent odtokového procesu (samozřejmě tam, kde to vstupní geodata umožňují). Využití plně distribuovaných modelů pro řešení vlhkostních charakteristik půd, Dunneho odtoku apod. je diskutováno např. v Beven (2009, 2012), Wainwright et Mulligan (2013) nebo Fárek et Unucka (2016). Konečně pro ověření samotné hypotézy proměnlivých příspěvkových zón povrchového a hypodermického odtoku během různých hydrosynoptických situací (Hewlett 1969, viz obrázek 14) je vhodné kombinovat metody matematického modelování v hydrologii s trvalou nebo alespoň přechodnou instalací přístrojů hydrologického a hydropedologického monitoringu. Význam kontinuálního dlouhodobého měření hydrometeorologických prvků v lesnické hydrologii zdůrazňuje i Chang (2013). Stran metod použitých v plně distribuovaných srážkoodtokových modelech lze konstatovat, že byly využity obdobné metody jako u semidistribuovaných modelu využívaných v operativní hydrologické prognóze HPPS ČR, tzn. kinematická aproximace St. Venantových rovnic, Green-Ampt popř. Richardsova rovnice. Výjimku tvoří komplexní model MIKE SHE, kde hydraulickou transformaci ovzdušné srážky a odtok v korytech toků zajišťuje hydrodynamický model MIKE 11 s dynamickou aproximací St. Venantových rovnic pro 1D odtok v korytech toků. Pro další popis výše uvedených programových prostředků a metod lze odkázat na práci Bevena (2012) nebo Unucky (2014). Pro detailnější popis výše uvedených metod a problematiky plně distribuovaných srážkoodtokových modelů lze odkázat na studie autorů, jako jsou Vieux (2004), Singh et Frevert eds. (2006) nebo Bedient, Huber et Vieux (2013). Podobně pro další popis využití srážkoodtokových modelů v lesnické hydrologii lze odkázat na doposud zřejmě nejkomplexněji práce Bredemeir et al. (2011) a Levia, Carlyle-Moses et Tanaka eds. (2011). Z hlediska metodiky využití

komplexních a tzv. hybridních modelů v lesnictví a lesnické ekologii včetně abiotických faktorů lze nalézt v práci Kimmins, Blanco, Seely, Welham et Scoular (2010). Význam využití plně distribuovaných srážkoodtokových modelů ve studiích tohoto typu je diskutován v případových studiích z oblastí Québecu (James et Roulet 2009) a Saskatchewanu (Mengistu, S. G. et Spence, C. 2016), přičemž ve druhé studii jsou analyzovány i výsledky semidistribuovaného modelu MESH-PDMROF. Vztah mezi topografií terénu, půdním nasycením a hladinami mělkých zvodní je logicky akcentován ve všech případových studiích, které zde byly využity pro srovnání s výsledky a závěry na pilotních lokalitách. Vhodnost využití vlhkostních indexů SAGA (TWI a TOPMODEL varianta) pro iniciální analýzy DMR, výběr vhodných lokalit pro hydrometrická měření je akcentována např. v pracích Lin et al. (2006), Liang et Chang (2017) nebo Baldwin et al. (2017). Zajímavý potenciál nabízejí i data z DPZ, zejména indexy pomáhající určit vodní režim vegetace i půdy. Krom již standardně využívaných indexů NDVI se jeví jako vhodná data i indexy TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*) nebo NMDI (*Normalized Multiband Drought Index*) (Gaja 2013). Možnosti kombinací vlhkostních indexů půdy (mj. data z družice SPOT) a NDVI indexu pro využití v simulacích srážkoodtokovým modelem TOPMODEL analyzuje ve své již poněkud starší, přesto však přínosné studii Pauwels a kolektiv (2001). Aktuální stav povodí a vlhkosti půd lze uspokojivým způsobem stanovit i z vyhodnocených srážkových dat ČHMÚ (nejlépe kombinované odhady srážek), ze kterých se operativně stanovuje index UPS/API, který přímo vstupuje jako parametr do v rámci HPPS ČR operativně využívaného modelu HYDROG. Další možnosti stanovení půdních vlhkostí a návazných indexů z dat DPZ diskutují Houser, Shuttleworth a kol. (1998).



Obr. 14. Koncept variabilní příspěvkové plochy nenasycené a nasycené zóny (upraveno podle Hewlett 1969).

ZÁVĚR

Výzkumná povodí představují cenný zdroj informací o dynamice odtoku z malých horských povodí. Dlouhodobý monitoring je základním pilířem a zdrojem dat, v současnosti se v oblasti zpracování dat již víceméně zcela prosadily geoinformační technologie, které jsou v analýze geodat nejefektivnější a v podstatě nezastupitelné. Výzkumné povodí VÚLHM "U Vodárny", které je součástí povodí Šumného potoka, poskytuje data z dlouhodobého monitoringu vybraných meteorologických a hydrologických prvků, který je zajišťován VÚLHM ve spolupráci s ČHMÚ Ostrava. Podobně povodí Černé Opavy díky vodoměrnému profilu Černá Opava / Mnichov je cenným zdrojem informací o proběhlých odtokových epizodách. Data z tohoto dlouhodobého monitoringu můžeme verifikovat pomocí detailních měřících

kampaní (tzn. měření Q, půdních vlhkostí, podkorunových srážek nebo sněhové pokrývky), k čemuž slouží velice dobře zejména moderní přístroje, mezi které můžeme zahrnout indukční přístroje nebo akustické přístroje ADV či ADCP. V neposlední řadě se skýtá i možnost analýzy povodí a simulace proběhlých i hypotetických srážkoodtokových epizod pomocí nástrojů geoinformačních technologií a srážkoodtokových modelů. Zejména komplexní a plně distribuované modely představují v kontextu lesnické hydrologie poslední dobou zajímavý potenciál, zejména z důvodu dostupnosti vstupních dat o území v přesnosti a detailu, které byly ještě před 10 lety reálně nedosažitelné. Jak již bylo uvedeno v různých studiích i popularizačních pracích, lesnicko-hydrologický výzkum má v ČR velkou tradici, geoinformační technologie a hydrologické modely jsou v tomto kontextu nástrojem, který by měl určité fáze výzkumu ulehčit a zefektivnit. Nabízí se srovnání s typickými párovými povodími a ukončením kalibrační epizody, kdy těžební zásah není nutné provádět v reálném povodí a porostu, ale pouze ve virtuální realitě zde reprezentované infrastrukturou GIS a matematického modelování. Z předešlých kapitol je patrné, že se v případě zvolených povodí vstupní hypotéza variabilních příspěvkových ploch povodí v rámci srážkoodtokového procesu beze zbytku potvrdila. Vyplývá to ze základního konceptu, že zatímco základní odtok je určen primárně hydrogeologickými strukturami a hladinou podzemních vod v jednotlivých částech povodí, přímý odtok je určen zejména vstupní srážkou a její časoprostorovou distribucí a v rámci odezvy povodí aktuální stavem nenasycené zóny a půdního profilu spolu s morfometrií terénu povodí a samozřejmě taktéž i hydrogeologickými poměry, zejména výskyt a konfigurace jednotlivých zvodní, jejich režim a okrajové podmínky a aktuální úrovně hladin podzemních vod, viz např. Lin et al. (2006), James et Roulet (2009), Ambroise (2016), Mengistu, S. G. et C. Spence (2016) Baldwin et al. (2017) Ala-aho et al. (2017). V případě výskytu příčinné srážky se postupně zvyšuje nasycení povodí a jejich morfometrické a hydrografické parametry spolu s aktuální hodnotou objemové vlhkosti půdy určují hodnotu povrchového a hypodermického odtoku. Lesní porost zde působí jednak jako přímý účastník srážkoodtokového procesu (intercepce, evapotranspirace), ale také jako ochranný faktor lesní půdy, která je v tomto ohledu klíčovou zónou hydrologické transformace ovzdušné srážky na odtok. Hydraulická část transformace je poté určena stavem hydrografické sítě a hladinami podzemních vod, což opět z dlouhodobého hlediska ovlivňuje stav povodí a krajinného pokryvu, tedy i porostní struktury a zdravotního stavu lesa. Je tedy zřejmé, že výzkumná lesnická povodí mají nezastupitelnou roli zejména v dnešní době, kdy se tolik diskutuje vliv změny klimatu a krajinné struktury na odtokové procesy v povodích a vodní hospodářství jako takové, což de facto zdůrazňuje i nejstarší původní česká lesnicko-hydrologická literatura, viz např. Válek 1977.

LITERATURA

Ala-aho, P., Soulsby, Ch., Wang, H. et Tetzlaff, D. (2017) Integrated surface-subsurface model to investigate the role of groundwater in headwater catchment runoff generation: A minimalist approach to parameterisation. In Journal of Hydrology vol. 547, Elsevier. 14 s. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.023

Ambroise, B. (2016) Variable water-saturated areas and streamflow generation in the small Ringelbach catchment (Vosges Mountains, France) the master recession curve as an equilibrium curve for interactions between atmosphere, surface and ground waters. In Hydrological Processes vol. 30, Wiley Online Library 18 s. DOI: 10.1002/hyp.10947

Baldwin, D., Naithani, K. J. et Lin, H. (2017) Combined soil-terrain stratification for characterizing catchment-scale soil moisture variation. In Geoderma vol. 285. Elsevier. 10 s. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.09.031

Bedient, P.B., Huber, W.C., Vieux, B.C. (2013) Hydrology and Floodplain Analysis. 4th ed. London, Prentice Hall: 795 s. ISBN: 978-0-273-77427-3

Beven, K.J. (2009) Environmental Modelling: An Uncertain Future? London, Routledge, 310 s. ISBN: 978-0-415-46302-7

Beven, K.J. (2012) Rainfall-runoff modelling: the primer. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 457 s., ISBN 978-0-470-71459-1

Blöchsl, G., Sivapalan, M., Wagener, T. eds. (2013) Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales. 465 pages. ISBN 9781107028180.

Bredemeier M., Cohne S. et al. (2011) Forest management and the water cycle. Heidelberg: Springer, 2011, xv, 531 s. Ecological studies, v. 212. ISBN 9048198348

Crétaz, A.L., Barten, P.K. (2007) Land use effects on streamflow and water quality in the northeastern United States. Boca Raton, CRC, 319 s. ISBN 0849391873.

Demek, J., Novák, V. et al. (1992) Vlastivěda moravská. Brno, Muzejní a vlastivědná společnost v Brně. 242 s. ISBN 80-85048-30-2.

Dingman, S.L. (2015) Physical Hydrology. 3rd ed. Long Grove, Waveland Press, 646 p. ISBN: 978-1577665618

Fárek, V., Unucka J., et al. (2015) Assessment of the runoff conditions of small ungauged catchments using GIS and fully distributed hydrologic models. 10 s. In Acta Montanistica Slovaca 1/2015, ISSN 1335-1788

Fárek, V., Unucka J. (2015:) Results comparison of the flow direction and accumulation algorithms

together with distributed rainfall-runoff models in Czech Switzerland National Park. In:

Lecture notes in geoinformation and cartography. Springer, Dordrecht, s. 87–98.

ISBN:978-3-319-18406-7

Fárek, V., Jančíková, A., Kosík, O., Lachmanová, Z., Unucka, J., Vícha, Z., Židek, D. (2015) Příspěvek k možnostem využití GIS a hydrologických modelů v analýzách výzkumných lesních povodí Červík a Šumný potok. In Lesnická hydrologie, věda a praxe. Sborník abstraktů. VÚLHM, Ostravice 2015. ISBN 978-80-7417-096-6

Fárek, V., Kosík, O., Ponížilová, I., Unucka, J. (2015) Zhodnocení nástrojů open source GIS a nástrojů hydrologických modelů pro hydrologickou praxi. Práce a studie ČHMÚ, svazek 63. Praha, Český hydrometeorologický ústav, 45 s. ISBN 978-80-87577-64-6

Gaja, P. (2013) Analýza půdní vlhkosti a charakteristik sucha pomocí dat DPZ. Diplomová práce. Masarykova univerzita Brno. 80 s.

Hengl, T., Reuter, H.I. eds. (2009) Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. Amsterdam, Elsevier. 775 s. ISBN: 978-0-12-374345-9

Hewlett, J.D. (1969) Principles of forest hydrology. Athens, University of Georgia Press, 183 s., ISBN: 978-0820323800

Houser, P.R., Shuttleworth J. et al. (1998) Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation. In Water Resources Journal vol. 34, 17 s. ISSN: 00431397

Chang, M. (2013) Forest hydrology: an introduction to water and forests. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 556 s. ISBN 978-1-4665-8667-3

Kantor, P., Krečmer, V., Šach, F., Švihla, V. et Černohous, V. (2003) Lesy a povodně. Praha, MŽP. 48 s., ISBN 80-7212-255-X

James, A.L. et Roulet, N.T. (2009) Antecedent moisture conditions and catchment morphology as controls on spatial patterns of runoff generation in small forest catchments. In Journal of Hydrology vol. 377. Elsevier. 16 s. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.039

Kimmins, J., Blanco, J.A., Seely, B., Welham, C. et Scoular, K. (2010) Forecasting forest futures: a hybrid modelling approach to the assessment of sustainability of forest ecosystems and their values. Washington, DC: Earthscan. 281 s. ISBN 1844079228.

Kirkby, M.J. ed. (1978) Hillslope hydrology. London, John Wiley & Sons. 389 s. ISBN: 978-0-471-95510-4

Kulasová, A., Beven, K.J., Blazkova, S., Rezacova, D. et Cajthaml, J. (2014) Comparison of saturated areas mapping methods in the Jizera Mountains, Czech Republic. In Journal of Hydrology and. Hydromechanics vol. 62. 9 s. DOI: 10.2478/johh-2014-0002

Levia,D.F., Carlyle-Moses, D., Tanka, T. (2011) Forest hydrology and biogeochemistry: Synthesis of past research and future directions. New York, Springer, 740 s. Ecological studies, v. 216. ISBN 9400713622

Liang, W. L. et Meng-Chun, Ch. (2017) Spatial and temporal variations in the effects of soil depth and topographic wetness index of bedrock topography on subsurface saturation generation in a steep natural forested headwater catchment. In Journal of Hydrology vol. 546. Elsevier. 14 s. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.033

Lin, H.S., Kogelmann, W., Walker, M. A. (2006) Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydropedological perspective. In Geoderma vol. 131. Elsevier. 24 s. DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.03.013

Mengistu, S. G. et Spence, C. (2016) Testing the ability of a semidistributed hydrological model to simulate contributing area. In Water Resources Research vol. 52, 17 s. DOI: 10.1002/2016WR018760.

Pauwels, V.R.N., Hoeben, R., Verhoest, N.E.C et De Troch, F.P. (2001) The importance of the spatial patterns of remotely sensed soil moisture in the improvement of discharge predictions for small-scale basins through data assimilation. In Journal of Hydrology vol. 251. Elsevier. 15 s.

Singh, V.P., Frevert, D.K. eds. (2006) Watershed Models. Boca Raton, CRC Press. ISBN: 978-08493-3609-6

Šafář, J. et al. (2003) Olomoucko. In Mackovčin, P. et Sedláček, M. eds.: Chráněná území ČR, svazek VI. Praha, AOPK ČR. 454 s. ISBN 80-86064-46-08.

Unucka, J. (2014) Environmentální modelování 1. Skriptum PřF OU. 209 s. SVZZ CZ.1.07/2.3.00/35.0053 & PřF OU.

Válek, Z. (1977) Lesní dřeviny jako vodohospodářský a protierozní činitel. Praha, Státní zemědělské nakladatelství, 203 s. ISBN: 07-034-77-04

Vieux, B.E. (2004) Distributed Hydrologic Modeling Using GIS. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 289 s., ISBN: 978-1402024597

Wagener, T., Wheater, H.S., et Gupta, H.V. (2004) Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments. London, Imperial College Press. 306 s. ISBN: 978-1860944666

Weissmannová, H. et al. (2004) Ostravsko. In Mackovčin, P. et Sedláček, M. eds.: Chráněná území ČR, svazek X. Praha, AOPK ČR. 454 s. ISBN 80-86064-67-0.

.