

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA HYDROMELIORACÍ A KRAJINNÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM: STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ
STUDIJNÍ OBOR: INŽENÝRSTVÍ ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



SMODERP2D – ANALÝZA VLIVU VSTUPNÍCH DAT NA HYDROLOGICKOU ODEZVU

SMODERP2D – INFLUENCE OF INPUT CHARACTERISTICS ON THE HYDROLOGICAL
RESPONSE

AUTOR: Bc. JAN-FRANTIŠEK KUBÁT
VEDOUCÍ: Ing. PETR KAVKA, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kubát** Jméno: **Jan-František** Osobní číslo: **458762**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Inženýrství životního prostředí**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

SMODERP 2D - analýza vlivu vstupních dat na hydrologickou odezvu

Název diplomové práce anglicky:

SMODERP 2D - influence of input data on the hydrological response

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Kavka, Ph.D., katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **29.09.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Petr Kavka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstract

The aim of this master thesis is testing of a rainfall-runoff physically based and event based model SMODERP2D on forest basins. The model itself is based on open-source platform, and it is free also it is possible to edit source code. The programming language is Python. The model is based on kinematic wave approach and Philip's infiltration equation. Data requirement of the model is one of its advantages. The model was tested using brute-force and partly Proxy-basin test for two gauged basins, Pstruhovec and Spůlka. The basins are located in the Czech Republic and are mostly forested. Due to the optimization issues there was no time for simulating whole basins and testing was moved to the smaller catchment within the basins. Testing the model in forest basins ran into the routines on which the model is built. The model is still under development and therefore the implementation of the new routines and overall optimization of the model is possible. However, more tests and measurements are required for practical use in forest basins.

Key words Runoff | Kinematic wave | Philip infiltration model | SMODERP2D | Hydrological modelling | Physically based hydrological model | Hydrology | Brute-force | External calibration and validation | Forest basins

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá testováním srážko-odtokového fyzikálně založeného epizodního modelu SMODERP2D na lesních povodích. Model je založen na open-source platformě a je možné ho získat zdarma a editovat zdrojový kód, který je napsán v programovacím jazyce Python. Základem modelu je kinematická vlna a Philipova infiltrační rovnice. Výhodou modelu je celková nenáročnost na vstupní data. K testování bylo přistoupeno metodou hrubé síly (brute-force) v kombinaci s částečným využitím Proxy-basin testu. Testovaná povodí Pstruhovec a Spůlka se nacházejí na území České republiky. Obě povodí jsou převážně lesnatého charakteru a jedná se o pozorovaná povodí ČHMÚ. Vzhledem k problémům s optimalizací modelu došlo k přechodu na simulaci na podpovodí. Testování modelu na lesních povodích naráželo na rutiny, na kterých je model postaven. Model je stále ve vývoji a je tedy možná implementace nových rutin a celková optimalizace modelu. Pro využití v praxi na lesních povodích je ale stále nutné provést další testování a měření.

Klíčová slova Povrchový odtok | Kinematická vlna | Philipův infiltrační model | SMODERP2D | Hydrologické modelování | Fyzikálně založený hydrologický model | Hydrologie | Hrubá síla | Vnější kalibrace a validace | Lesní povodí

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 2. 1. 2022

.....
Bc. Jan-František Kubát

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Kavkovi, Ph.D. za poskytnuté rady, vedení a časovou flexibilitu konzultací během zpracovávání. Dále bych rád poděkoval Ing. Davidu Zumrovi, Ph.D. za konzultace.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu (QK1910029) „*Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích*“.

Obsah

1	Úvod	10
2	Teorie	12
2.1	<i>Hydrologické procesy</i>	12
2.1.1	Srážka.....	13
2.1.2	Evapotranspirace	16
2.1.3	Infiltrace.....	16
2.1.4	Odtok z povodí	19
2.2	<i>Hydrologické modelování</i>.....	21
2.2.1	Dělení hydrologických modelů	21
2.2.2	Modelování hydrologických procesů	25
	<i>Model proudění</i>	25
	<i>Model infiltrace</i>	28
2.3	<i>Kalibrace a validace</i>.....	31
2.3.1	Testování hydrologických modelů	32
3	Metodika	33
3.1	<i>SMODERP2D</i>.....	33
3.1.1	Fyzikální báze modelu.....	34
3.1.2	Vstupy modelu	43
3.1.3	Výstupy modelu.....	45
3.2	<i>Modelované oblasti</i>.....	46
3.2.1	Porovnání modelovaných povodí.....	47
3.2.2	Pstruhovec.....	52
3.2.3	Spůlka	54

3.3	Modelování oblastí	56
3.3.1	Digitální model reliéfu	56
3.3.2	Vstupní data	58
3.3.3	Testování modelu SMODERP2D	65
4	Výsledky.....	74
4.1.1	Výsledek analýzy hydrologické odezvy	87
4.1.2	Výsledek Proxy-basin testu.....	90
5	Diskuze.....	97
6	Závěr	100

1 Úvod

Hydrologie se zabývá cirkulací vody a jejích složek skrze hydrologický cyklus, do něž spadají srážky, transpirace, výpar, infiltrace, proudění podzemní vody, odtok, proudění v korytech a transport rozpuštěných a nerozpuštěných látek ve vodě. Zaměřuje se na vodu, která je buď přímo na povrchu nebo k povrchu blízko. (Maidment 1992)

Hydrologické procesy je možno modelovat, a tím vznikne hydrologický model, který popisuje odezvu modelovaného prostředí na srážku. Tyto informace jsou použity pro plánování a další činnosti, jež souvisejí s vodními zdroji (Lohani 2018). Hydrologické modely vznikají zhruba od 60. let 20. století, ale až od 80. let s nástupem rychlého vývoje výpočetní techniky začaly nabývat na významu. Hydrologickým modelem můžeme rozumět matematickou soustavu rovnic, zjednodušeně popisující strukturu chování systému, jež představuje kvantitativní vztahy mezi vstupními a výstupními veličinami srážko-odtokového procesu. (Clarke 1973)

Hydrologické modely mají nejrůznější možnosti uplatnění, které lze shrnout do tří kategorií (Jeníček 2009):

- Operativní hydrologické předpovědi
- Návrhová a projekční činnost v oblasti krajinného inženýrství a vodního hospodářství
- Výzkumná činnost

Pokud se zamyslíme nad kalibrací a validací fyzikálně založených modelů, mohlo by se zdát, že kalibrovat a validovat fyzikální model není třeba, jelikož by měl obsahovat z popisu vyplývající fyzikální základ, a tedy exaktní popis procesů, které daný model simuluje. Pokud se ale podíváme na fungování konkrétního modelu, dojdeme ke zjištění, že model je sice založen na fyzikálních procesech, které jsou ale velmi často pro potřeby numerického řešení zjednodušené empirickými vztahy. Numerika modelů je velmi složitým tématem a jako taková může mít vliv na stabilitu celého modelu.

Dále můžeme také narazit na nejistoty měřených dat, kterými byl model kalibrován a odtud vzniká potřeba tyto modely kalibrovat a validovat a zároveň analyzovat jejich citlivost na vstupní parametry.

Vstupem, který by se mohl jevit jako exaktní, jsou půdní data. V inženýrské praxi ale většinou není prostor pro odebírání půdních vzorků a jejich analýzu, navíc se tato činnost stává marginální, modelujeme-li velká povodí, která budou půdně silně heterogenní. Přistupujeme tedy ke kompromisnímu řešení v podobě půdních

map a dalších způsobů odvození půdních charakteristik a vnášíme do modelu další nejistoty.

Je možné, že i ověřený a kalibrovaný model nebude poskytovat podobné výsledky, jako jsou historická pozorování, jelikož mohlo v průběhu času dojít ke změně ve využití území nebo byl model kalibrován a validován pro jiný typ. Modelovaná situace vycházející ze současných dat neodpovídá historickému využití území v době pozorování srážko-odtokové události. Je proto potřeba myslet i na to, kdy modelujeme.

Z předchozího textu vyplývá, že veškeré modely je potřeba neustále zdokonalovat a testovat jejich spolehlivost a výkonnost. Ve své diplomové práci jsem se věnoval testování modelu SMODERP2D, který lze dle předchozího rozdělení kategorizovat mezi návrhové modely sloužící pro projekční činnost v oblasti krajinného inženýrství a vodního hospodářství. Model SMODERP2D je fyzikálně založený distribuovaný epizodní model, který simuluje srážko-odtokový proces včetně eroze, k níž dochází během srážkové epizody.

Motivace

Model SMODERP2D byl kalibrován a validován převážně na zemědělských záchytných plochách. Motivací byla možnost otestování rutin modelu na lesních pozorovaných povodích.

Cíle

- Testování spolehlivosti a výkonnosti modelu SMODERP2D na lesních povodích v České republice
- Přítomnost rychlého povrchového odtoku v lesních povodích
- Vznik matice vstupních charakteristik pro lesní povodí

2 Teorie

Teorie se věnuje popisu problematiky hydrologický procesů a modelování srážko-odtokového jevu, základnímu popisu hydrologických modelů a metodám jejich testování.

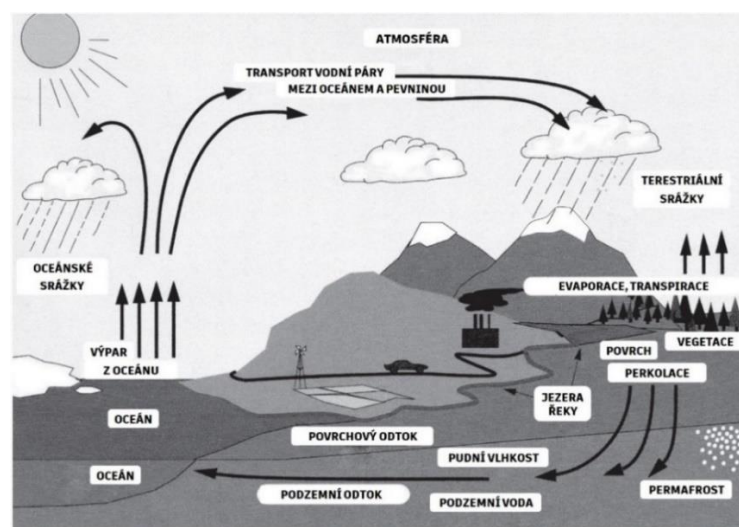
2.1 Hydrologické procesy

Základním kamenem každé vědy je její schopnost předpovídat chování nějakého jevu a poté ověřit správnost předpovědi pozorováním. V hydrologii je ověřování komplikované, protože je jev řízen srážkou, která je ze své podstaty náhodným a nejistým procesem, a protože je prostorově variabilní, je velmi problematický popis přesného chování jevu a jeho měření v každém bodě (Maidment 1992).

Hydrologický cyklus

Hydrologický cyklus je elementárním principem hydrologie. Voda se vypařuje z oceánů a pevniny a je unášena kolem Země atmosférickou cirkulací jako vodní pára. V podobně pevných nebo kapalných srážek vyprší, je zachycena stromy a vegetací (intercepce), odtéká ze zemského povrchu, vypařuje se zpět do atmosféry, infiltruje do půdy a znovu zásobuje podzemní vody, pokračuje do vodních toků a nakonec odtéká do oceánů, kde se případně opět vypaří. (Maidment 1992)

Tomuto celému kolosu, který pohání solární energie a řídí gravitace, říkáme velký hydrologický cyklus (obrázek 1), tedy proces, kdy dochází k výměně mezi pevninou a oceánem. V případě, že se voda vypaří a vypadne již nad oceánem nebo pevninou, nazýváme tento proces malým vodním cyklem.



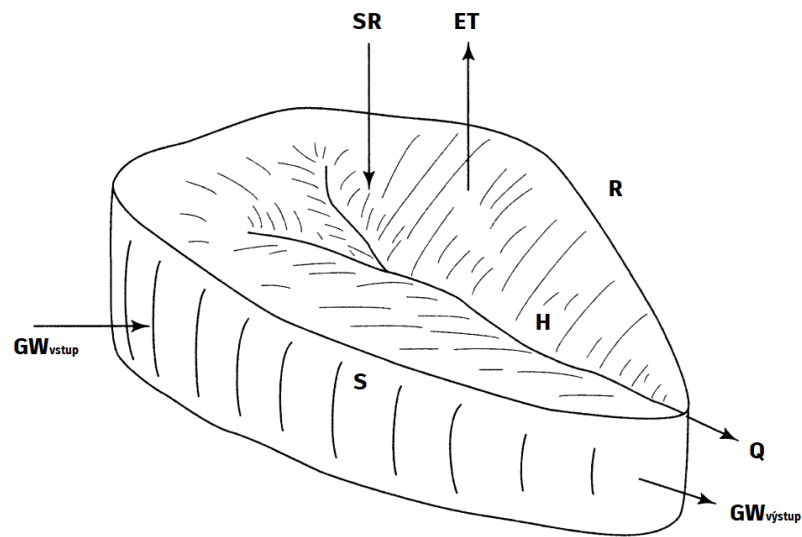
Obrázek 1: Velký hydrologický cyklus (upraveno - Trenberth et al. 2007)

Povodí

Bilance se provádí na jednotce povodí. Povodí (obrázek 2) je rozvodnicí ohraničená oblast, ze které odtéká spadlá srážka závěrovým profilem. Rozvodnice (obrázek 2-R), která určuje tuto oblast, může být daná morfologií terénu (morfologická rozvodnice) nebo vlastnostmi pod povrchem povodí (hydrologická rozvodnice).

Morfologie povodí, rozložení půd, stav hydrografické sítě a využití území (anglicky – landuse) jsou hlavními charakteristikami celého povodí, které určují reakci povodí na srážkovou událost.

V své práci jsem se věnoval malým povodím (plocha do 10 km²) a jejich odezvě na srážkovou epizodu.



Obrázek 2: Třidimenzionální schematické zobrazení povodí, SR = srážka, ET = evapotranspirace, R = rozvodnice, H = hydrografická síť, S = zásoba, Q = odtok, GW_{vstup} = přítok podzemní vody, GW_{vystup} = odtok podzemní vody (upraveno - Dingman 2015)

2.1.1 Srážka

Děšť se tvoří v mracích, kde pára kondenzuje v malé kapičky vody a ve chvíli, kdy jsou tyto kapičky vody dostatečně těžké, vypadnou v podobě deště na zemský povrch.

Děšť se vyznačuje svou časovou a prostorovou variabilitou. Dramatickými následky této variability jsou sucha a extrémní povodně, které dnes i v historii ovlivnily umístění lidských obydlí. Pro lidskou aktivitu je velmi důležité predikovat a popisovat variabilitu srážkových událostí.

Z fyzikálního hlediska atmosférickou dynamiku popisují proměnné: hustota, tlak a teplota prostředí. Základní rovnice vztahují tyto proměnné k atmosférickým tokům skrze systém šesti rovnic (zákon zachování hmoty, zákon zachování energie, stavová rovnice pro ideální plyn a tři rovnice zákona zachování hybnosti, jedna za

každou složku rychlosti) v šest proměnných (tlak, teplota, hustota a tři složky rychlosti). (Maidment 1992)

Dva fyzikální faktory hrají dominantní role při určování míry srážek, a sice rychlost padajících kapek a rozdělení jejich velikosti. Tyto dva faktory určují reakci povrchu Země ve chvíli dopadu. (Maidment 1992)

Pro měření srážek bylo vyvinuto mnoho metod a zařízení. Musíme rozlišovat mezi pevnými a kapalnými srážkami, jelikož pro každou disciplínu je potřeba trochu jiné zařízení.

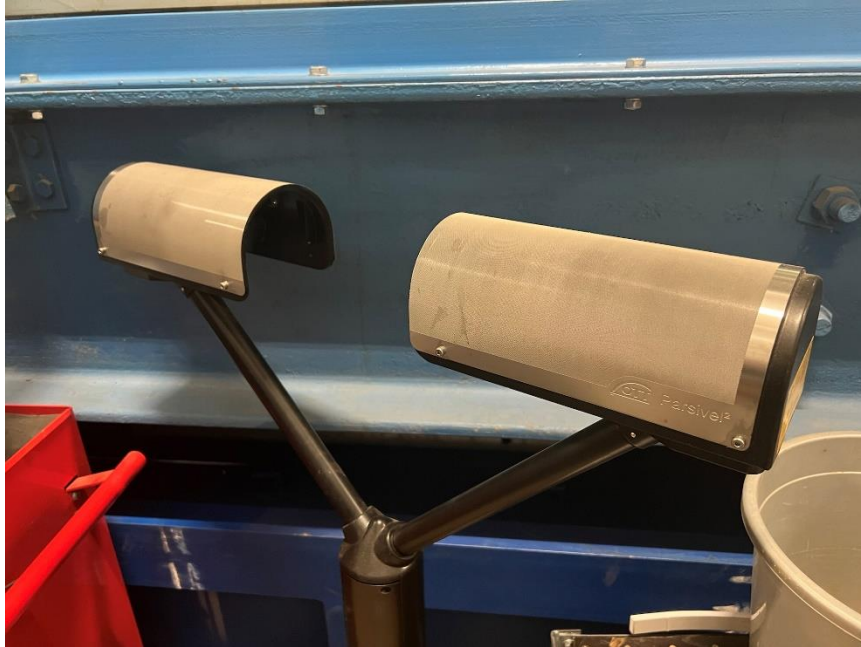
V případě kapalných srážek se pro stanovení celkového bodového úhrnu používají totalizátory (obrázek 3), jež zachytí napršené množství. Pro získání bodového měření hyetogramu (včetně celkového úhrnu) se používají například překlápávací srážkoměry (obrázek 3). Srážkoměr má přesně určenou plochu, kde dochází k zachycení srážky a svedení do překlápávací misky s přesně určeným objemem. Když dojde k naplnění, miska se překlopí a je zaznamenán pulz, který je přepočten na úhrn za časový úsek. V případě, že nás zajímá prostorové rozdělení srážky, je vhodné použít radarovou technologii.

Jedna z hlavních výhod radaru pro měření srážek je možnost pokrytí velkého území s vysokou schopností prostorového a časového rozlišení. (Maidment 1992)



Obrázek 3: Příklad totalizátoru (napravo) a překlápávacího srážkoměru (nalevo)

Další možností jsou disdrometry (obrázek 4), které jsou schopny měřit distribuci a velikost dešťových kapek, intenzitu deště, radarovou odrazivost atd. Disdrometr generuje světelný paprsek a ve chvíli, kdy je tento paprsek přerušen, dojde ke změření průměru a rychlosti kapky. (Frasson et al. 2011)



Obrázek 4: Laserový disdrometr OTT Parsivel²

Intercepce

Se srážkou úzce souvisí intercepce. Jedná se o část srážky, která je zachycena objekty, jež leží na povrchu Země. Těmito objekty může být přirozená vegetace anebo jakékoli jiné živé nebo neživé předměty.

Povrchová retence

Během srážkové události dochází k zachycení vody v povrchových depresích. Deprese jsou malé kapsy, misky, prohlubně apod. na zemském povrchu. Výskyt depresí na povrchu může být příčinou zachycení velkého množství srážky. Voda v těchto depresích se buď vypaří, nebo vsákne do půdy.

2.1.2 Evapotranspirace

K evapotranspiraci (evaporace – výpar z povrchu, transpirace – výpar povrchem rostlin) dochází během přeměny skupenství vody z kapalného na plynné.

Přirozeně k výparu dochází tehdy, pokud je dostupná energie ať už ze Slunce, nebo atmosféry. Rychlost výparu je závislá na schopnosti této energie v podobě vodní páry se rozptýlit do atmosféry od zemského povrchu. (Shuttleworth 1979)

Různé fyzikální procesy jsou zodpovědné za difúzi, ale fyzika ztráty vodní páry z otevřených vodních povrchů, půdy a vegetace jsou v zásadě identické. (Maidment 1992) Výpar je rozdíl toků, a to rychlostí odpařování, která je dána především gradientem tlaku vodních par mezi kapalnou a plynnou fází, a rychlostí kondenzace. Pokud se mohou molekuly šířit od povrchu pryč, tlak vodní páry zůstává nízký a rozdíl mezi těmito dvěma rychlostmi je pozitivní, výpar pokračuje. Pokud ale vzduch nad vodou je teplotně izolován a uzavřen, tlak vodních par se zvětšuje, dokud si rychlost odpařování a kondenzace nejsou rovny, a dojde k vyrovnání výparu a kondenzace. (Maidment 1992; Ritari a Strommer 1985) Dojde k nasycení vzduchu vodními parami.

2.1.3 Infiltrace

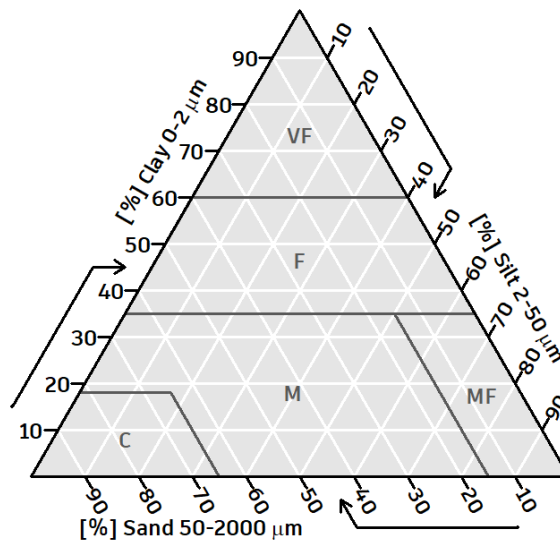
Infiltrace je proces, kdy dochází k přechodu vody do půdy ze srážky, táním sněhu nebo zavlažováním. Rychlost infiltrace je dána rychlostí pohybu vody v půdě a hraje klíčovou roli během povrchového odtoku, doplňování zásob podzemní vody, evapotranspiraci, půdní erozi atd.

Půdní charakteristikou, která ovlivňuje pohyb vody v půdě, je hydraulická vodivost (je schopnost půd vést vodu) a vodní retence (schopnost půdy ukládat vodu a půdní potenciál). Půdní charakteristiky, jež ovlivňují proudění vody v půdě, jsou úzce spjaty s fyzikálními vlastnostmi dané půdy. (Maidment 1992)

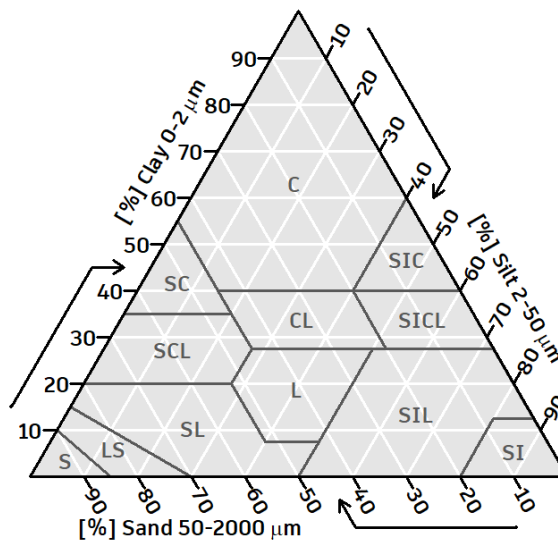
Textura půdy je jedním ze základních parametrů pro fyzikální popis půdy. Jedná se o velikostní distribuci zrn v půdě menších než 2 mm rozdělených do tří intervalů pro skupiny: jíl, prach a písek. Na základě obsahu jednotlivých skupin je pak půda zaříděna dle dostupných klasifikačních diagramů např. evropský HYPRES (obrázek 5), americký USDA-NCSS (obrázek 6) atd. Dalšími velmi významnými parametry, které mají velký vliv na pohyb vody v půdě, jsou tvar, geometrie a konektivita pórů, obsah organické hmoty a druhy jílu v půdě obsažených.

S tím, jak se objemová hmotnost zvyšuje, se vodní retence a nasycená hydraulická vodivost blízká nasycení snižuje. Vodní retence se zvyšuje spolu se zvyšujícím se obsahem organické hmoty. V půdě se vyskytuje celá řada druhů jílu. Jílová mineralogie a samotných typ jílu mají velký vliv na vodní vlastnosti půdy. (Maidment 1992)

Chemické vlastnosti jsou ale také velmi důležitým faktorem, jelikož mají vliv na integritu a stabilitu agregátů (shluky půdních částic).



Obrázek 5: Evropský klasifikační diagram dle textury (HYPRES) – soiltexture.R



Obrázek 6: Americký klasifikační diagram dle textury (USDA-NCSS) – soiltexture.R

Proudění podzemní vody

Během proudění podzemní vody dochází k doplňování podzemních zásob. Užívání této zásoby hraje základní roli při hospodaření s vodou, zvláště dnes, kdy dochází k rychlé expanzi urbanistických, industriálních a zemědělských nároků na vodu. (de Vries a Simmers 2002)

Ze své podstaty je proudění podzemní vody velmi složitou disciplínou, kterou ovlivňuje mnoho proměnných např. porozita, hydraulická vodivost, geologie prostředí, hydraulické a fyzikální vlastnosti půdy atd.

Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost je míra schopnosti půdy vést vodu a závisí jak na vlastnostech půdy, tak na vlastnostech tekutiny, která půdou protéká. Celková pórovitost, distribuce, velikost a spojitost těchto pórů jsou důležité půdní charakteristiky, které ovlivňují hydraulickou vodivost. (Maidment 1992)

Hydraulická vodivost je nelineární funkce obsahu vody v půdě a mění se v závislosti na půdní textuře. Půda je silně heterogenní prostředí a hydraulická vodivost se tak i v jednom půdním druhu může prostorově měnit (řádově). Jedná se o komplexní půdní charakteristiku, kterou není jednoduché přesně určit.

Rozlišujeme dva hlavní pohledy na hydraulickou vodivost, saturovaná (nasyčená) hydraulická vodivost (K_{sat}), za pomoci které popisujeme proudění v půdě plně nasycené vodou, a nenasycená hydraulická vodivost, jíž popisujeme proudění v půdě, která není plně nasycena (vadózní zóna).

Při měření hydraulické vodivosti musíme k oběma přistupovat jednotlivě. Existuje celá řada polních i laboratorních měření. Většina těchto metod je ale velmi pracná a časově náročná. Došlo k vývoji metod určení nasycené (stále se vesměs měří) a nenasycené hydraulické vodivosti. Volba metody plně závisí na dostupných fyzikálních a hydraulických vlastnostech půdy (Maidment 1992). Jednou z nejběžnějších technik určení nenasycené hydraulické vodivosti je aplikování kapilárních modelů Mualema (Mualem 1976) nebo Burdine (Burdine 1953) s kombinací vztahu pro retenční křivku Brookse a Coreyeho (Brooks a Corey 1964) nebo van Genuchtena (van Genuchten 1978) pro odhad funkce relativní vodivosti. Pro tyto kapilární modely je ale stále potřeba měřit nasycenou hydraulickou vodivost. V případě, že máme pouze texturu půdy, jsou dostupné alternativy v podobě izolinií hydraulických vodivostí pro jednotlivé třídy USDA-NCSS (SSSNNE 2009). Jedná se o velmi nespolehlivou metodu, která je pouze odhadem z měřených dat. Pokud jsou k dispozici i další fyzikální charakteristiky, zejména obsah organického uhlíku a objemová hmotnost, můžeme využít pedotransferové funkce.

Pedotransferové funkce jsou vyvinuty pro odhadování hydraulických parametrů půdy. Jedním z dalších hlavních důvodů, bez ohledu na využití výsledků, je i možnost vyhnout se drahému a pracnému měření v terénu. (Patil a Singh 2016)

2.1.4 Odtok z povodí

Odtok z povodí je kombinací několika toků skrz povodí. Těmito toky jsou základní průtok, povrchový odtok, podpovrchový odtok a proudění podzemní vody.

Základní průtok

Jedná se o část odtoku, u kterého se předpokládá, že vstoupil do povodí během předchozí události a pokračuje z pomalu drénujícího zdroje. Ve většině případů jde o vodu, která drénuje ze zvodní do vodního toku (Maidment 1992; Wolock 2003).

Povrchový odtok a podpovrchový odtok

Během srážkové události vzniká povrchový odtok po vyčerpání infiltrace. Tomuto odtoku, který se objevuje v mnoha situacích, říkáme Hortonův. Dále rozlišujeme dva další typy odtoku, které jsou výsledkem pozorování v povodích během bouřek. Povrchový odtok, ke kterému dochází po nasycení půdního profilu, a rychlý podpovrchový odtok. Rychlý podpovrchový odtok je voda, která zainfiltruje do půdy a vlivem perkolace (ve většině případů skrze makro póry –trhliny, kořeny, zvířecí chodby) se rychle přesune do saturované zóny a vodního toku, kde drénuje. (Maidment 1992)

Proudění ve vodních tocích

Základní jednotkou proudění ve vodních tocích jsou $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tedy objem, který proteče úsekem vodního toku za čas. Vodní toky jsou základním komponentem hydrologického cyklu pro přemísťování vody, která původně spadla v podobě deště nebo sněhu na povodí. (Maidment 1992) Voda, která odtéká vodním tokem, je kombinací základního odtoku, rychlého podpovrchového odtoku a povrchového odtoku ze saturovaného povodí.

Povodňový odtok

Povodňový odtok z povodí je způsoben buď rychlou a intenzivní srážkou, během níž dojde k povodním v malých záchytných oblastech na začátku velkého povodí, nebo rozlehlou srážkou s nižší intenzitou, kdy dojde k povodním v celém regionu. Kromě těchto dvou příčin, které přímo souvisejí s deštěm, může být odtok způsoben rychlým táním sněhu, průtrží hráze atd.

Bleskové povodně vznikají během krátké vysoce intenzivní srážkové události a mají vysoce ničivý dopad, jelikož není vždy možné přesně předpovědět událost. Takto vzniklé povodně zasahují relativně malou oblast.

Regionální povodně se odehrávají během dlouhodobé srážky s nižší intenzitou, zasahují velkou oblast, ale nemusejí být až tak ničivé, protože je možné je předpovědět a lépe se připravit na situaci, kterou by mohly vyvolat.

Eroze a transport sedimentu

Eroze je přírodním procesem, jež se podílí na modelování krajiny, a je jedním z důsledků srážko-odtokového procesu. Dle příčiny vzniku eroze rozeznáváme erozi vodní (akvatickou), větrnou (eolickou), ledovcovou (glaciální) a sněhovou (nivální) (Janeček and et al. 2012). Během srážko-odtokové události v povodích narušených lidskou činností dochází ke zrychlené vodní erozi půdního povrchu. Zrychlená eroze půdního povrchu je běžným globálním problémem, který v extrémních případech může ohrožovat socio-ekonomický rozvoj v dané oblasti (Feng et al. 2010).

S erozním procesem úzce souvisí transport sedimentu v povodí. Důsledkem transportu půdních zrn a dalších látek v půdě obsažených dochází ke změně půdní textury na povrchu, odnosu úživné vrstvy, akumulaci smyvu ve vodních nádržích a vodních tocích a jejich následnému vyměšování, eutrofizaci vodních nádrží z důvodu výskytu prvků podporujících růst atd.

Z fyzikálního pohledu je eroze způsobena kinetickou energií dopadajících kapek a následným odtokem. Ve chvíli, kdy je půdní povrch zasažen kapkou (kapková eroze), dojde k odmrštění půdních částic na malou vzdálenost. Tyto částice jsou buďto uloženy na místě dopadu, anebo jsou dále transportovány povrchovým odtokem (Salles et al. 2000). Mimo srážky závisí přemístění půdních částic také na infiltrační kapacitě, počáteční vlhkosti, schopnosti půdy tvořit agregáty a krustu (le Bissonais. Y. 2016), obsahu organických látek (Beguería et al. 2015) a dalších.

2.2 Hydrologické modelování

Práce je zaměřena na operaci s distribuovaným epizodním fyzikálně založeným modelem a tímto směrem se ubírají navazující kapitoly. V kapitole 2.2.2 jsou obecně popsány možnosti modelování hydrologických procesů a v kapitole 3.1.1 je popsána fyzikálních báze použitého modelu SMODERP2D.

2.2.1 Dělení hydrologických modelů

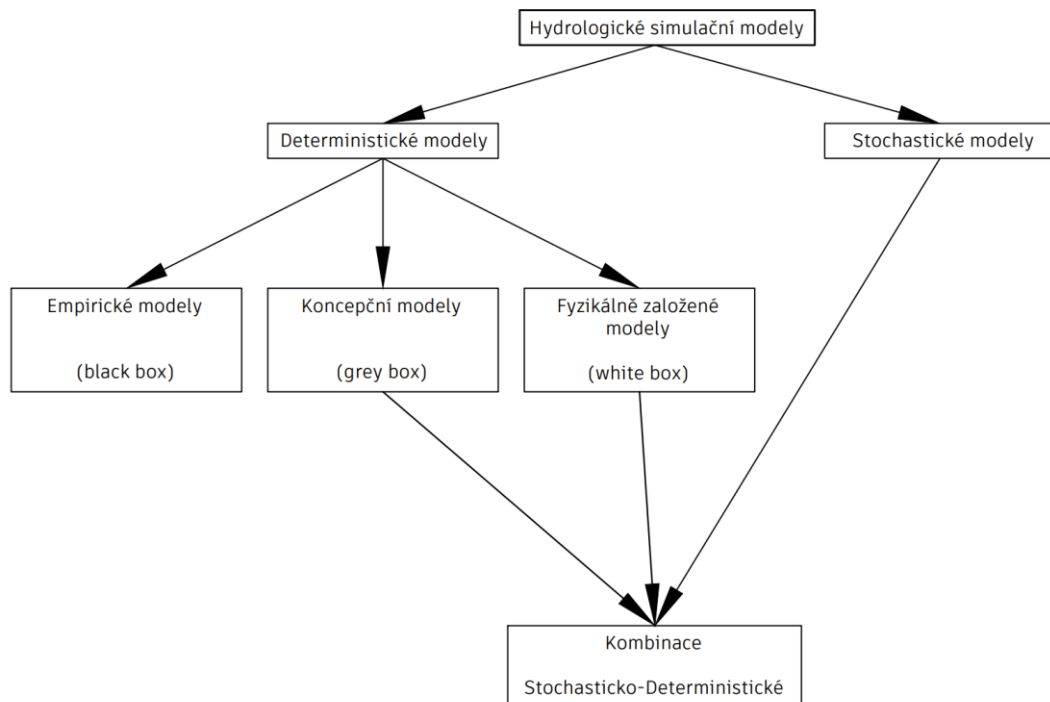
Povodí je extrémně komplikovaný přírodní systém, který je velmi těžké pochopit v plném jeho rozsahu. Tím pádem je nutná abstrakce, abychom pochopili nebo byli schopni usměrňovat jeho chování. Abstrakcí je myšleno nahradit povodí něčím, co je mu velmi podobné, ale s jednodušší strukturou. (Woolhiser 1973)

Všechny hydrologické modely jsou zjednodušenou reprezentací reálného světa. Modely mohou být fyzické (laboratorní modely v určitém měřítku), analogové nebo matematické. Fyzické a analogové modely hrály důležitou roli v minulosti, ale nejuniverzálnějšími z hlediska aplikace jsou matematické modely, kterých je mnoho a mají nespočet uplatnění jak ve veřejné, tak soukromé sféře. (Abbott a Refsgaard 1990)

Hydrologické modely se skládají ze dvou hlavních částí, hydrologického jádra a technologické schránky. Hydrologické jádro je založeno na základě vědeckého bádání a poznání a zprostředkovává popis procesů, proměnných a dalších aspektů. Technologická schránka je programovací jazyk, uživatelské rozhraní, předpříprava a následné vyhodnocení dat atd. (Abbott a Refsgaard 1990)

Na obrázku 7 je schéma dělení modelů z hlediska popisu hydrologických procesů. Jedná se o klasifikaci, jejímž hlavním principem bylo postihnout modely, které zahrnují celé povodí, ale i pouze jeden z procesů. (Abbott a Refsgaard 1990; Lohani 2018)

Rozlišujeme dva základní typy hydrologických modelů: deterministický a stochastický (Abbott a Refsgaard 1990).



Obrázek 7: Základní dělení hydrologických modelů (upraveno - Abbott a Refsgaard 1990)

Stochastické modely

Tradičně je stochastický model odvozený od analýzy dlouhé časové řady historických pozorování. Stochastický model může být použit pro generační předpovědi hypotetických událostí se stejnými statistickými předpoklady jako historická pozorování. Pro analýzu proměnných a určení nejistot modelu může být využita technika generování mnoha syntetických řad se stejnými statistickými předpoklady neboli technika Monte Carlo. (Abbott a Refsgaard 1990)

Z pohledu popisu hydrologických procesů je možné stochastický přístup přirovnat k empirickému (black box) (Abbott a Refsgaard 1990).

Empirické (black box) modely

Black box modely jsou empirické. Zahrnují matematické rovnice, které nepopisují fyzikální procesy v povodí, ale jsou výsledkem analýzy pozorovaných výstupů.

Asi nejznámějším modelem ze všech black boxových modelů v hydrologii je jednotkový hydrogram a modely, které jednotkový hydrogram uplatňují (Nash 1959).

Empirické modely jsou používány jako jedna z komponent komplexních modelů (Abbott a Refsgaard 1990) v podobě rutiny ve vodních tocích nebo proudění podzemní vody. Jedním z modelů, který využívá jednotkový hydrogram, je model HEC-HMS (Hydrological Modeling System) (US ARMY 2021).

Další hojně využívaný empirický model je metoda SCS-CN. Je populární zvláště pro její jednoduchost a snadnost použití. Původně byla tato metoda vyvinuta pro malá zemědělská povodí, ale postupně docházelo k jejímu rozšiřování na venkovská, lesní, městská povodí. (Mishra a Singh 2003)

Celistvé konceptuální (grey box) modely

Jedná se o modely, které jsou někde mezi empirickými a fyzikálně založenými. V těchto modelech je povodí tvořeno relativně málo komponenty a každý z nich je zjednodušenou reprezentací jednoho procesu v celém modelu. (Lohani 2018)

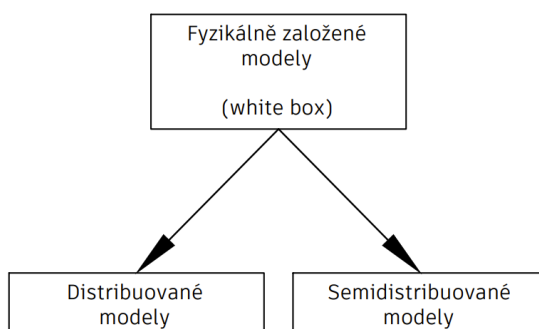
Vzhledem ke skutečnosti, že v celistvých modelech jsou proměnné reprezentovány pouze průměrem pro celé povodí, nemohou být hydrologické procesy určeny přímo fyzikálními rovnicemi pro jednotlivé půdy. Rovnice jsou semi-empirické, ale stále jsou založeny na fyzikální bázi (grey box). Parametry vstupující do modelu nejsou založeny pouze na polních měřeních a zkoumáních, ale jsou upraveny pomocí kalibračních koeficientů. (Abbott a Refsgaard 1990)

Celistvými modely jsou např. HVB model nebo TOPMODEL (Devia et al. 2015).

Fyzikálně založené (white box) modely

Modely jsou založeny na chápání fyziky hydrologických procesů (white box), které jsou zodpovědné za odpověď povodí na srážkovou událost (Lohani 2018). Fyzikální hydrologické charakteristiky povodí, jakou jsou půda, využití území a topografie jsou prostorově nekonzistentními proměnnými. V distribuovaných modelech je tato prostorová variabilita procesů, okrajových a počátečních podmínek a hydrologických charakteristik popsána skrze síť rastrových buněk (Feyen et al. 2000).

V důsledku této skutečnosti jsou modely schopny simulovat prostorovou variabilitu hydrologických podmínek v povodí, na druhou stranu mají ale vysoké nároky z hlediska výpočetního času a vstupních dat a jsou drahé na vývoj (Lohani 2018).



Obrázek 8: Dělení fyzikálně založených modelů (upraveno - Knudsen et al. 1986)

Fyzikálně založené modely je možné dále rozdělit na distribuované a semidistribuované (obrázek 8).

Semidistribuovaný model je kompromisem mezi celistvým konceptuálním přístupem a fyzikálně založenou plně distribuovanou reprezentací hydrologie povodí. Přístup v semidistribuovaných modelech zahrnuje fyzikální popis hydrologických procesů, ale i konceptuální přístup pro vybrané rutiny. (Knudsen et al. 1986)

Distribuované fyzikálně založené modely jsou modely, které se nejbližší podobají realitě. Místo toho, aby v nich např. voda proudila do jednoho místa a odtud dál, jako v případě semidistribuovaných, je tok vody (energie) přímo vypočítáván souvislými (částečně nadělenými) kontinuálními rovnicemi (Abbott a Refsgaard 1990). Jedním z plně distribuovaných fyzikálně založených modelů je model MIKE-SHE (Devia et al. 2015).

SMODERP2D je fyzikálně založený epizodní distribuovaný model a s ohledem na tuto skutečnost navazuje kapitola 2.2.2, kde jsou popsány možnosti modelování hydrologických procesů pro tento typ modelů.

Stochasticky deterministické modely

Na jedné straně mohou být důležité hydrologické procesy, které zahrnují prostorovou a časovou variabilitu hydrologických parametrů, popsány deterministickými modely. Ale na druhé straně, dostupnost těchto informací a dalších vstupů vždy bude vždy nekompletní. Málo informací je jednou z esenciálních nejistot v hydrologickém modelování. S ohledem na tuto dualitu vznikly kombinované modely. Tyto modely se skládají ze dvou hlavních částí: deterministického jádra a stochastického rámu. (Abbott a Refsgaard 1990)

2.2.2 Modelování hydrologických procesů

Základem modelů je bilancování vstupů a výstupů během simulace srážko-odtokové události. Kladným vstupem do tohoto vztahu (1) je srážka a přítékající podzemní voda a záporným odtok, evapotranspirace a výtok podzemní vody. Výsledkem této bilance je změna zásoby. Kombinací odtoku podzemní vody a odtoku hydrografickou sítí dostaneme celkový odtok z povodí (anglicky – runoff). (Dingman 2015)

$$SR + GW_{VSTUP} - (Q + ET + GW_{VYSTUP}) = \Delta S \quad (1)$$

kde:

- SR je srážka
- GW_{VSTUP} je přítok podzemní vody
- Q je odtok hydrografickou sítí
- ET je evapotranspirace
- GW_{VYSTUP} je odtok podzemní vody
- ΔS je změna zásoby

Pro modelování proudění lze nalézt mnoho matematických modelů. Jedním z nejobecnějších modelů jsou tzv. Navier-Stokesovy rovnice, které lze použít pro modelování proudění stlačitelných i nestlačitelných tekutin (Brenner 2005). V praxi, během utváření matematického modelu, dochází k mnoha zjednodušením a pro popis jevu jsou využity nejzákladnější rovnice (Crossley 1999).

Hlavními řešenými problémy v modelech jsou pak rutina proudění, infiltrace a evapotranspirace. S ohledem na skutečnost, že SMODERP2D je zaměřen primárně na povodí o malé ploše a epizodní srážku, je z této kapitoly vynechán popis přístupu k evapotranspiraci (Kavka 2017).

Model proudění

Jako se všemi proudícími tekutinami, tak i s vodou, jsou základem modelu zákony rovnice kontinuity a zákon zachování hmotnosti. Následnou aplikací těchto zákonů na klasickou fyziku dostáváme pohybovou rovnici. V případě modelování dominantního jednodimenzionálního proudění jsou velmi využívány Saint-Venantovy (SV) vztahy pro proudění v otevřených korytech. SV vztahy se skládají z rovnice kontinuity nebo zachování hmotnosti a pohybové rovnice, za použití Newtonova druhého zákona pohybu. (Crossley 1999)

SV vztahy jsou odvozeny za následujících předpokladů, které jsou nezbytné pro jejich vyjádření (Crossley 1999).

- Proudění je jednodimenzionální, rychlost je konstantní v celém průřezu a vodní hladina je horizontálně.
- Vertikální složka zrychlení kapaliny je zanedbána, čímž je změna tlaku s hloubkou hydrostatická.
- Tření a turbulence mohou být reprezentovány použitím stejných empirických zákonů pro ustálené proudění.
- Změny sklonu jsou minimální a celkový sklon je nízký, tedy cosinus úhlu mezi dnem a horizontální rovinou je přibližně stejný.

Aplikace těchto předpokladů vede na plný jednodimenzionální vztah tzv. dynamickou vlnu, která se skládá ze dvou rovnic, rovnice popisující hmotu (2) a rovnice popisující pohyb (3) (Moussa a Bocquillon 1996).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + j \right) = 0 \quad (3)$$

kde:

- $Q(x, t)$ je odtok
- $z(x, t)$ je výška ode dna po hladinu
- $A(x, t)$ je plocha průřezová plocha
- j jsou ztráty třením
- x je vzdálenost po proudu
- t je čas
- g je gravitační zrychlení

První rovnice, známá jako rovnice kontinuity, reprezentuje bilanci hmot v jednom elementu bez vtoku či výtoku. Druhá rovnice, známá jako pohybová rovnice, reprezentuje bilanci energií v jednom elementu (Ven Te Chow 1959). Dynamická vlna (neustálené proudění) je ale numericky velmi náročná na řešení a ve většině praktických aplikací dochází ke zjednodušení na tzv. difuzní vlnu nebo kinematickou vlnu (Moussa a Bocquillon 1996; Maidment 1992).

Difuzní vlnu (difuzní vlnová aproximace – ustálené nerovnoměrné proudění) získáme zjednodušením pohybové rovnice (3) tak, že předpokládáme, že zrychlení a setrvačné síly jsou zanedbatelné. Pokud zavedeme ještě jeden předpoklad, a to,

že volnou hladinu uvažujeme rovnoběžnou se dnem kanálu, získáme kinematickou vlnu (kinematickou vlnovou aproximaci – ustálené rovnoměrné proudění). (Brandner et al. 2011; Maidment 1992)

Předešlými předpoklady dojdeme k tomu, že hybnost neustáleného proudění je stejná jako ustáleného rovnoměrného proudění, které je popsáno vztahy např. Chezy, Manning atd. (Maidment 1992). Široce používanou rovnicí pro popis volného povrchového toku je Manningova rovnice (4), která může být použita pro popis ustáleného rovnoměrného proudění proudění (Manning 1891).

$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

kde:

- v rychlost ($m \cdot s^{-1}$)
- R_h hydraulický poloměr (m)
- n Manningův koeficient drsnosti ($s \cdot m^{-1/3}$)
- S sklon dna (–)
- v je rychlost toku ($m \cdot s^{-1}$)

Model infiltrace

Popis proudění v porézním prostředí je velmi důležitý a zároveň složitý úkol. Jedná se o jeden z nejkompexnějších toků v přírodě. Pro popis proudění vody v nenasyčeném porézním prostředí byla odvozena Richardsova rovnice. (Morbidelli et al. 2018)

Buckingham byl jedním z prvních, kteří se pokusili o popis chování tekutiny v malých trubičkách (kapilárách). Definoval kapilární potenciál, tedy gradient, který byl roven kapilární síle. Kapilární konduktivita skrze porézní prostředí je podobná proudění tekutin kapilárami, a to takovým způsobem, že oba jevy mohou být vyjádřeny ve formě gravitace a tlakového gradientu. (Richards 1931)

Základem Richardsovy rovnice je Darceyho zákon (5) pro proudění v úpravě pro nenasyčené půdy (Richards 1931).

$$q = -K \frac{\partial H}{\partial z} \quad (5)$$

kde:

- q je objemový tok skrze jednotkovou plochu za jednotkový čas (m^3)
- H je sací výška + gravitační složka (m)
- z je geodetická výška (m)
- K je koeficient hydraulické vodivosti ($m \cdot s^{-1}$)

Kombinací rovnice kontinuity (6) a Darceyho zákona (5) dostáváme Richardsovu rovnici (7) pro jednodimenzionální nenasyčené proudění.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

kde:

- θ je objemová vlhkost (m^3/m^3)
- t je čas (s)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D \frac{\partial \theta}{\partial z} + K \right] \quad (7)$$

kde:

- D je difuzivita půdy

Richardsova rovnice je základem infiltrace do homogenního porézního prostředí. Vzhledem k její nelinearitě ale neexistují blízká analytická řešení, krom velmi zjednodušených. Richardsova rovnice může být použita jako základ numerického modelování za specifických okrajových a počátečních podmínek, rozdělení půdního profilu do tenkých vrstev a aplikací rovnice pro každou vrstvu v malých časových krocích. Numerická řešení jsou ale často velmi náročná na výpočet a zároveň jsou pro aplikaci Richardsovy rovnice potřeba detailní data, která většinou nejsou k dispozici. Z tohoto důvodu byla vyvinuta přibližná analytická řešení Richardsovy rovnice. (Maidment 1992)

Phlipova rovnice

Jedním z prvních a velmi známých řešení je Philipova rovnice (8) (Philip 1957; 1969), který ji odvodil pro nekonečně hluboký půdní profil s jednotnou počáteční vlhkostí.

$$f(t) = \frac{1}{2} S_p t^{-1/2} + K_p \quad (8)$$

kde:

- S_p je půdní sorptivita ($m \cdot s^{-1/2}$)
- t je čas (s)
- K_p je hydraulická vodivost ($m \cdot s^{-1}$)

První člen rovnice (8) je výsledkem analytického řešení Richardsovy rovnice a projevuje se v počáteční fázi, kdy je infiltrace skoro výlučně pod kontrolou tlakového gradientu (Maidment 1992). Druhý člen je hydraulická vodivost, která se pro aplikační účely uvažuje jako nasycená hydraulická vodivost.

Půdní sorptivita je rychlost, kterou bude voda čerpána do nenasycené půdy za absence gravitačních sil (Maidment 1992).

Green-Ampt model

Dalším modelem pro pochopení esenciálních aspektů infiltračního procesu je Green-Ampt model, který je zjednodušenou reprezentací infiltračního procesu. (Green and Ampt 1911; Mein and Larson 1973).

Stejně jako Richardsova rovnice je i Green-Ampt model založen na Darcyho zákoně a rovnici kontinuity, ale ve formě přibližných konečných diferencí. V modelu jsou aplikovány idealizované počáteční podmínky a okrajové podmínky, které umožňují popisovat přímý dopad půdních charakteristik ovlivňujících infiltrační proces. (Maidment 1992)

Idealizované podmínky zahrnují homogenní půdní profil a jednotnou distribuci počáteční půdní vlhkosti. Model předpokládá, že se v půdním profilu nachází vrstva, která odděluje nasycenou a méně nasycenou zónu, kde se vlhkost rovná počáteční půdní vlhkosti. Laterální pohyb vody v půdě je zanedbáván, a to i v případě, kdy povrch není kolmý na směr gravitace. (Chen and Young 2006)

2.3 Kalibrace a validace

Hydrologické modely jsou matematické modely, do kterých vstupují parametry. Kalibrace modelu znamená odhad těchto parametrů na základě historických pozorování. Validace znamená porovnání výsledků kalibrovaného modelu na historických pozorováních, na kterých ale nebyl kalibrován. (Lohani 2018) V kapitole 2.2.1 byly modely rozděleny na deterministické a stochastické a deterministické dále až k fyzikálně založeným modelům, ke kterým se bude vázat následující text.

Hydrologické modely procházejí kalibrací a validací během vývoje i po něm. Během vývoje modelu je provedena tzv. vnitřní kalibrace modelu. Model je založen na fyzikálních vztazích, které je ale pro potřeby využití modelu v praxi nutno kalibrovat, jelikož mohou obsahovat opravné koeficienty. Vnitřní kalibrací rozumíme kalibraci a validaci těchto koeficientů. Validace během vývoje je ukázkou, že model je schopný zprostředkovat dostatečně přesné výsledky pro specifická nastavení (Anderson a Woessner 1992). Každý model má své specifické vstupní parametry a při používání modelu je tedy potřeba tyto parametry kalibrovat, jelikož mohou obsahovat nejistoty (nedostatečná přesnost dat). Tento proces můžeme nazvat vnější kalibrací, protože se již neoperuje s opravnými koeficienty. Takto kalibrovaný model je pak již možné používat.

Vnější kalibrace modelu zahrnuje manipulaci se specifickými vstupními parametry takovým způsobem, že výstupy pro modelovanou oblast jsou v určitém rozsahu přesnosti. Plně distribuované fyzikálně založené modely zahrnují vstupní parametry dostupné z polních měření, ale přesto je určitá kalibrace potřeba. V případě těchto modelů je ale variace parametrů omezena relativně úzkými intervaly. (Lohani 2018)

Jedním z problémů, se kterým se modely vypořádávají, je jejich přehlčení parametry (anglicky - overparametrization) (Jakeman a Hornberger 1993). Jednodušší modely (empirické, konceptuální), které jsou méně náročné na vstupní parametry, mohou poskytovat stejně dobré nebo lepší výsledky než komplexnější (fyzikálně založené) (Loague a Freeze 1985).

Shoda hydrogramů

Dle závěrů studie, která se zaměřovala na porovnávání měřených a modelovaných hydrogramů ve vztahu k výkonu modelů, nemohou dosud automatické metody nahradit sílu a flexibilitu lidských očí a mozku. Člověk je schopen postihnout na základě grafického porovnání jemné rozdíly, které jsou velmi těžko rozpoznatelné pro stroj. (Ewen 2011)

2.3.1 Testování hydrologických modelů

K testování hydrologických modelů lze přistupovat mnoha směry. Klemeš definoval hierarchické schéma pro systematické testování hydrologických modelů (Klemeš 1986).

- Split-sample test
- Proxy-basin test
- Differential split-sample test
- Proxy-basin differential split-sample test

Diferenciální testy jsou obdobou testů, které jsou popsány níže, ale s ohledem na změnu klimatických podmínek. (Klemeš 1986)

Split-sample Test

Dostupný záznam by měl být rozdělen na dvě části. První z nich by měla být použita pro kalibraci a druhá část pro validaci. Obě části by si měly být podobné z pohledu měřených záznamů. Pokud je dostupný záznam dostatečně dlouhý na to, aby byla kalibrace dostatečná, měl by být rozdělen na stejně velké části. (Klemeš 1986)

Proxy-basin test

Test by se měl použít v případě, že jde pouze o změnu modelované oblasti s podobnými charakteristikami. Záznam existuje pro určitá povodí, na kterých probíhá kalibrace a validace. Následně je model aplikován na povodí bez měřených dat. Pro povodí A a B existují záznamy a pro povodí C nikoli. Na povodí A by měl být model kalibrován a na povodí B validován a naopak. (Klemeš 1986)

3 Metodika

Metodika se zabývá popisem fungování modelu SMODERP2D, přiblížením modelovaných oblastí z pohledu hydrologického modelování, popisu vstupních dat a testováním modelu v lesních povodích.

Stěžejní data pro zpracování práce byla poskytnuta Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK) a Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ).

3.1 SMODERP2D

Jedná se o Simulační MModel povrchového odtoku a Erozního PRocesu (SMODERP2D). Model lze využít pro výpočet hydrologicko-erozních procesů na jednotlivých pozemcích nebo na malých povodích. Výstupy z modelu jsou primárně určeny pro stanovení odtokových poměrů v ploše povodí a parametrů opatření pro snížení odtoku z povodí a erozního ohrožení zemědělské půdy. Další aplikace modelu je při navrhování komplexnějších soustav sběrných a odváděcích prvků nebo suchých nádrží a poldrů. Model je jedním z doporučených modelů pro stanovení návrhových parametrů v praxi a je uveden jak v současných metodikách (Janeček et al. 2012), tak i technických normách a doporučených standardech. Z hlediska kategorizace se jedná o fyzikálně založený plně distribuovaný dvourozměrný epizodní model. (Kavka 2017)

Hlavními procesy probíhajícími v modelu je rychlý povrchový odtok a Philipova infiltrační rutina.

Skutečnosti popsané v kapitole 3.1 se nacházejí v manuálu k modelu SMODERP2D (Kavka 2017) a SMODERP (Vrána 2013).

Historie modelu

Model je vyvíjen od konce osmdesátých let na Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství Fakulty stavební ČVUT a od té doby byl několikrát modifikován. SMODERP1D je starší verze modelu SMODERP2D. SMODERP1D byl určen ke stanovení charakteristik plošného odtoku v 1D profilech řešeného svahu a stanovení nejdelší bezpečné odtokové dráhy.

SMODERP2D je stále vyvíjen a aktualizován, současná verze je v jazyce Python. Příprava dat a samotný výpočet v časové smyčce jsou od sebe odděleny. Příprava dat momentálně využívá nástroje z knihoven ArcGIS a další knihovny, které Python poskytuje.

3.1.1 Fyzikální báze modelu

Výpočet je řešen v pravidelné rastrové síti. Prostorová diskretizace modelu je řízena rozlišením vstupního digitálního modelu terénu. V celém řešeném prostoru je po jednotlivých buňkách v každém časovém kroku provedena bilance vstupů a výstupů a následně je vypočteno odteklé množství za daný časový úsek v buňce. V modelu jsou uvažovány dvě složky povrchového odtoku: plošný povrchový odtok a soustředěný odtok v rýhách. Soustředěný odtok v rýhách je ve SMOERP2D řešen explicitně. Vznik soustředěného odtoku je podmíněn překročením limitní rychlosti, resp. limitního tečného napětí.

Formálně se jedná o řešení metodou konečných diferencí s explicitně řešenou časovou diskretizací. V bilanční rovnici jsou řešeny tři základní složky:

- infiltrace do půdy I_{inf}
- efektivní srážka ES
- přiteklé a odteklé množství I_{tot} a O_{tot}

Odtoklé množství může být dále složeno ze tří základních typů odtoku:

- plošného povrchového odtoku
- soustředěného rýhového povrchového odtoku
- odtoku dočasnou hydrografickou sítí (tok otevřeným korytem)

V ploše povodí jsou směry odtoků odvozeny na základě odtokových algoritmů. V místě úseků hydrografické sítě je veškerý tok směřován touto sítí.

Bilance zásob

Základním řešeným vztahem je aktuální bilance celkové zásoby za daný čas.

$$\frac{dS}{dt} = I_{tot} - O_{tot} \quad (9)$$

kde:

- $\frac{dS}{dt}$ je změna zásoby ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- I_{tot} je aktuální celkový přítok ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- O_{tot} je aktuální celkový odtok ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Dle složek povrchového odtoku a dalších procesů lze I_{tot} a O_{tot} v rovnici (9) dále rozepsat na:

$$I_{tot} = ES + O^{in}$$

$$O_{tot} = Inf + O^{out}$$

kde:

- O^{in} je aktuální přítok ze sousedních buněk ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- O^{out} je aktuální odtok z buňky ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- ES je efektivní srážka ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- Inf je infiltrace ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Během řešení v modelu SMODERP2D se operuje s veličinami v podobě výšky vodního sloupce (m) a intenzit ($m \cdot s^{-1}$). Po vydělení rovnice velikostí buňky a provedení matematické operace dojdeme k rovnici:

$$h_{i,t}^{sur} = h_{i,t-1}^{sur} + \Delta t \left(es_{i,t-1} + \sum_j^m o_{j,t-1}^{in} - inf_{i,t-1} - o_{i,t-1}^{out} \right) \quad (10)$$

kde:

- h^{sur} je výška hladiny na povrchu (m)
- es je intenzita efektivní srážky ($m \cdot s^{-1}$)
- m jsou buňky, odkud vtéká voda z buňky j do buňky i
- inf je intenzita infiltrace ($m \cdot s^{-1}$)
- o^{in} je výška vtoku za čas ($m \cdot s^{-1}$)
- o^{out} je výška odtoku z buňky za čas ($m \cdot s^{-1}$)

Efektivní srážka

Srážka je hlavní příčinou srážko-odtokové události a erozního procesu. Model je epizodní a srážka se zadává v podobě konkrétní modelové srážky, které začíná prvním časovým krokem výpočtu, tzn. na začátku není nultá minuta. V modelu je zahrnut vliv intercepce, která je definována pomocí potenciální intercepce I_{POT} jako výška zachycené vody. Míra zachycení v každém časovém kroku je definována pomocí poměrné plochy listové I_{LAI} .

Infiltrace

Jako infiltrační rutina byla pro model zvolena infiltrace dle Philipa (Philip 1957) v následujícím tvaru:

$$inf = \frac{1}{2}St^{-1/2} + K_s \quad (11)$$

kde:

- inf je intenzita infiltrace ($m \cdot s^{-1}$)
- S je sorptivita půdy ($m \cdot s^{-1/2}$)
- K_s je nasycená hydraulická vodivost ($m \cdot s^{-1}$)

Dle dokumentů k modelu byla Philipova infiltrační rovnice zvolena především z důvodu relativně malého počtu vstupních parametrů. Tato zjednodušená rovnice má dva členy: nasycenou hydraulickou vodivost K_s a sorptivitu S .

Čas t ve vztahu (11) je čas od začátku srážky, který by měl být v epizodním modelu totožný s počátečním časem výpočtu. Tato nezbytná podmínka by měla být brána v potaz při přípravě vstupních dat.

Plošný povrchový odtok

Rovnice popisující plošný povrchový odtok vychází ze zjednodušení Saint-Venantových (SV) rovnic použitím teorie kinematické vlny. Použití tohoto přístupu předpokládá mělké povrchové proudění po dlouhém plochém povrchu. Za těchto podmínek lze u pohybové rovnice SV rovnic zanedbat lokální změny kinetické a potenciální energie a lokální zrychlení. Při tomto zjednodušení lze uvažovat povrchový tok jako ustálené proudění (Miller 1984).

Plošný povrchový odtok je poté možné řešit pomocí obecného mocninného vztahu:

$$q_{sur} = ah^{sur^b} \quad (12)$$

kde:

- q_{sur} je specifický plošný průtok ($m^2 \cdot s^{-1}$)
- a je parametr rovnice plošného odtoku (–)
- b je parametr rovnice plošného odtoku (–)

Parametr a je řešen dle vztahu:

$$a = XI^Y$$

kde:

- X je parametr rovnice plošného odtoku (–)
- Y je parametr rovnice plošného odtoku (–)
- I je sklon (–)

Parametry a a b respektive X a Y jsou odvozeny na základě měření (Neumann a Kavka 2015). Z vyhodnocení vyplývá, že parametr b je závislý pouze na půdním druhu. Parametr a je závislý nejen na půdním druhu, ale také na sklonu svahu I . Pokud je povrch půdy pokryt vegetací, je třeba provést korekci pomocí Manningova drsnostního součinitele pro povrchový odtok, který reprezentuje tření mezi tokem a vegetací. Parametr a je pak definován jako:

$$a = \frac{XI^Y}{100n}$$

kde:

- n je Manningův drsnostní součinitel ($s \cdot m^{1/3}$)

Určení vzniku rýh a soustředěný odtok v nich

Pro výpočet tečného napětí je v modelu SMODERP2D zavedena rutina dle Schwab (Schwab 1993):

$$\tau_{sur} = \rho g h^{sur} I K \quad (13)$$

kde:

- τ_{sur} je tečné napětí (Pa)
- ρ je hustota vody ($kg \cdot m^{-3}$)
- g je gravitační zrychlení ($m \cdot s^{-2}$)
- I je sklon (–)
- K je součinitel šířky (pro plošný povrchový odtok je roven 1)

Vlivem tekoucí vody je na povrch půdy vyvíjeno napětí. Za specifických podmínek je soudržnost půdy nižší než tečné napětí proudící vody na jejím povrchu a následně dojde k tvorbě rýhy.

Je několik způsobů, jak tento moment určit. V modelu SMODERP2D jsou implementovány dva způsoby odvození: překročením kritického tečného napětí a překročením nevymílací rychlosti. Z obou odvození je určena kritická výška hladiny povrchového odtoku h_{crit} , po jejímž překročení začne vznikat rýha.

Přepočet kritické nevymílací rychlosti na kritickou výšku hladiny je proveden dle vztahu:

$$h_{crit,v} = \frac{100n v_{crit}^{1/(b-1)}}{a} \quad (14)$$

kde:

- h_{crit} je kritická výška hladiny (m)
- v_{crit} je kritická nevymílací rychlost ($m \cdot s^{-1}$)

Výpočet kritické výšky hladiny z tečného napětí je odvozen z rovnice (14) jako:

$$h_{crit,\tau} = \frac{\tau_{crit}}{\rho g I} \quad (15)$$

kde:

- τ_{crit} je kritické napětí (Pa)

Pro každou buňku výpočetní oblasti je vypočítáno h_{crit} pomocí odvození (14) a (15). Podmínka v modelu následně vybere menší z hodnot.

Kritická nevymílací rychlost a kritické tečné napětí jsou vstupní parametry modelu.

Výpočet soustředěného odtoku v rýhách, který je implementován v modelu SMODERP2D, vychází z několika předpokladů.

1) Zavedením stejných zjednodušujících předpokladů výpočtu proudění jako v případě výpočtu plošného povrchového odtoku (teorie kinematické vlny) lze řešit tok rýhou jako ustálené proudění. Při ustáleném proudění se předpokládá sklon dna I paralelní se sklonem hladiny vody v rýze a neměnná drsnost v celé délce buňky. Průtok v rýze je tedy vyjádřen pomocí Manningovy rovnice:

$$q_{rill} = v_{rill}A = A \frac{1}{n} R_{rill}^{2/3} I^{1/2} \quad (16)$$

kde:

- q_{rill} je průtok v rýhách ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- v_{rill} je rychlost proudění – rýhový odtok ($m \cdot s^{-1}$)
- A je průtočná plocha (m^2)
- n je Manningův koeficient drsnosti ($s \cdot m^{-1/3}$)
- R_{rill} je hydraulický poloměr v rýze (m)

2) V každé buňce, kde probíhá výpočet, může vzniknout pouze jedna přímá rýha bez ohledu na velikost buňky.

3) Soustředěný odtok vzniká v buňkách, kde dojde k překročení kritické výšky hladiny

4) Objem vzniklé rýhy odpovídá nadkritickému objemu vody V_{rill} , který vychází ze vztahu:

$$V_{rill} = V_{tot} - V_{crit} = MAX(0; h^{sur} - h_{crit})P$$

kde:

- V_{rill} je objem vody v rýze v daném elementu (m^3)
- V_{tot} je celkový objem vody v elementu (m^3)
- V_{crit} je objem vody do kritické hladiny (m^3)
- h_{crit} je kritická výška hladiny (m)

5) Tvar příčného profilu rýhy je reprezentován obdélníkem s pevným poměrem stran rýhy. Velikost rýhy se zvětšuje, pokud je nadkritické množství větší než objem samotné rýhy tak, aby byl splněn předpoklad v předchozím bodě. Při zvětšování rýhy se tedy výška rýhy rovná výšce vodní hladiny v rýze. Pokud začne být nadkritické množství menší, než je objem rýhy, a dochází k prázdnění rýhy, zůstává velikost rýhy konstantní a v rýze dochází pouze k poklesu hladiny. Tento mechanismus ovlivňuje odtok pomocí hydraulického poloměru, který je odvozen pro obdélníkový příčný profil.

Celková bilance

Pokud dojde k vzniku rýh, je rovnice celkové bilance (9) rozšířena o členy vyjadřující soustředěný rýhový odtok a přítok z rýh sousedních buněk následovně:

$$h_{i,t}^{sur} = h_{i,t-1}^{sur} + \Delta t \left(es_{i,t-1} + \sum_j^m o_{j,t-1}^{in} - inf_{i,t-1} - o_{i,t-1}^{out} + \sum_k^n o_{rill,k,t-1}^{in} - o_{rill,i,t-1}^{out} \right) \quad (17)$$

kde:

- o_{rill}^{in} je výška vtoku v rýze za čas ($m \cdot s^{-1}$)
- o_{rill}^{out} je výška odtoku v rýze za čas ($m \cdot s^{-1}$)
- n jsou buňky, odkud vtéká voda z rýh do buňky i

Odtok hydrografickou sítí

Hlavní použití modelu SMODERP2D spočívá především v navrhování půdo-ochranných opatření v ploše povodí. Cílem je simulovat a navrhovat odtoky i v dočasné hydrografické síti, která je tvořena přirozeným nebo častěji umělým přerušením přirozené odtokové dráhy.

Na rozdíl od výpočtu povrchového odtoku, který je prováděn v rastru buněk, se výpočet řeší v hydrografické síti po jednotlivých úsecích po skončení výpočtu povrchového odtoku. Jeden úsek hydrografické sítě zpravidla leží na několika buňkách rastru. Při výpočtu povrchového odtoku se do tohoto úseku započítá přítok ze všech buněk, které vtékají do buněk pod daným úsekem. Poté, co výpočet povrchového odtoku skončí, provede se ve stejném časovém kroku výpočet odtoků a vtoků mezi jednotlivými úseky a spočítá se nová výška hladiny ve všech úsecích najednou.

Proudění v úsecích je řešeno Manningovou rovnicí ve tvaru:

$$q_{stream} = A \frac{1}{n} R_{stream}^{2/3} I^{1/2} \quad (18)$$

kde:

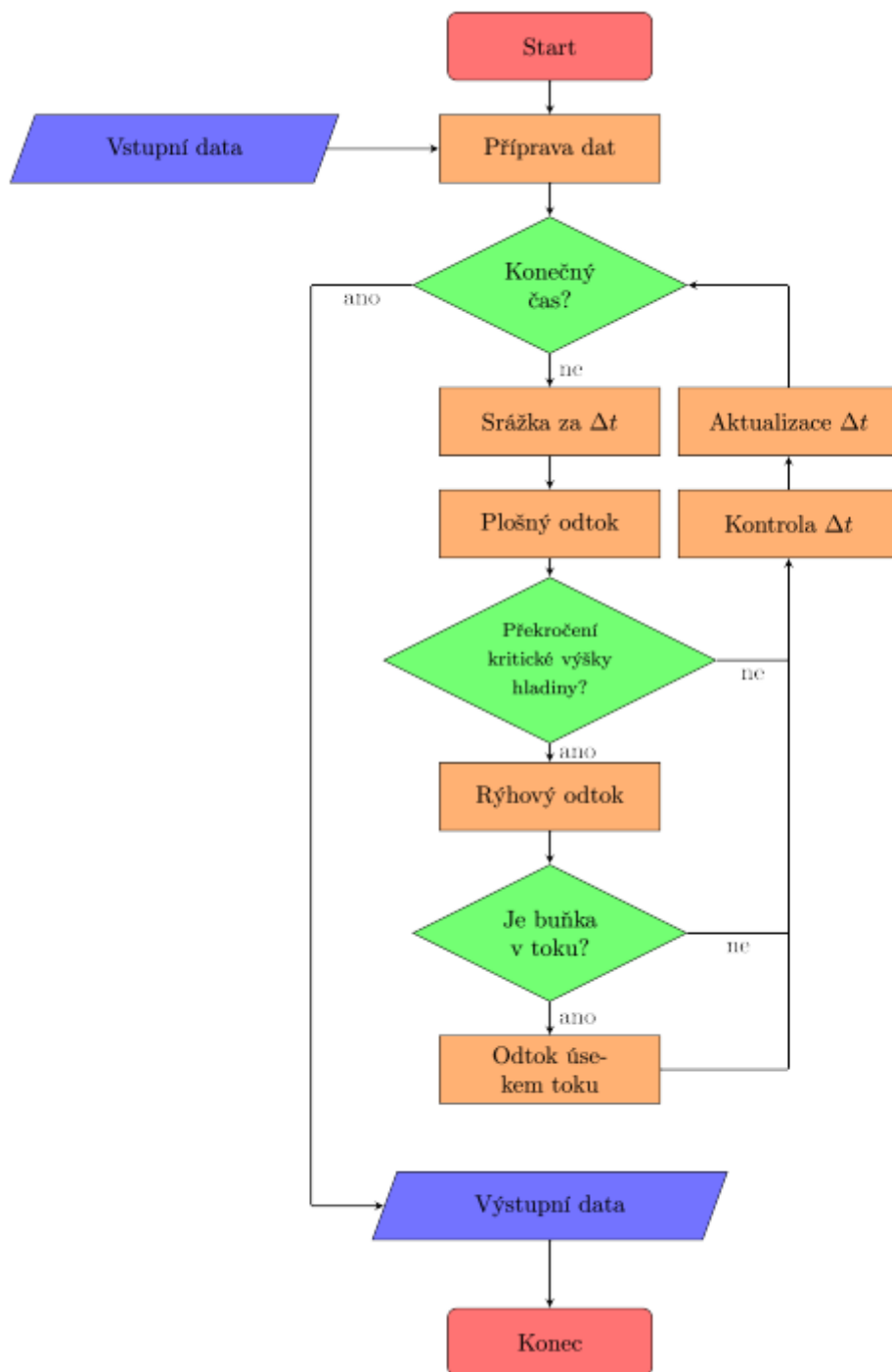
- q_{stream} je průtok v otevřeném korytě ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- A je průtočná plocha (m^2)
- n je Manningův drsnostní součinitel ($s \cdot m^{1/3}$)
- R_{stream} je hydraulický poloměr v otevřeném korytě (m)

Pro vlastní výpočet je třeba zadat typ a příčný profil daného úseku. Délka úseku a jeho sklon jsou převzaty z liniové vrstvy a z digitálního modelu terénu. Protože je model určen pro malá povodí, jsou v modelu předpokládány pouze základní tvary příčných profilů (trojúhelník, obdélník, lichoběžník, parabola).

Poznámka: Během využívání modelu v mé práci byl dostupný pouze tvar typu obdélník. Ostatní tvary byly v kódu implementovány, ale byly neaktivní.

Tok modelu SMODERP2D

Na obrázku 9 je zobrazen tok programu během simulace.



Obrázek 9: Tok programu SMODERP2D (převzato - Kavka 2017)

3.1.2 Vstupy modelu

Do modelu vstupují informace o topografii řešeného území, informace o typech půd a využití území a o jejich prostorovém rozmístění, informace o srážce, případně o geometrii dočasné hydrografické sítě. Tato data jsou zadávána ve třech formátech: rastrovém, vektorovém a textovém. Parametry modelu jsou uloženy v atributové tabulce pod specifickým názvem pole.

Digitální model terénu

Rastr digitálního modelu terénu DMT nebo reliéfu (DMR), či anglicky DTM (Digital Terrain Model) nebo DEM (Digital Elevation Model), reprezentuje souvislou morfologii určité části Země. DMT rastr je složen z jednotlivých buněk obsahujících informace o elevaci terénu. Velikost buněk se liší v závislosti na velikosti zobrazovaného území. Pro účely modelu SMODERP2D by minimální velikost buněk měla být 2 metry, optimum je však 5 metrů a více.

Půdní data

Vstupem do modelu je vektorová vrstva s vymezením jednotlivých půd. Pro určení charakteristik je nutné, aby atributová tabulka dané vrstvy obsahovala identifikátor půdního typu. Identifikátor odkazuje na půdní charakteristiky, které jsou ale uloženy v samostatné tabulce.

Data využití území

Obdobně jako u půdních dat je vstupem vektorová vrstva popisující využití území. Rozumnou volbou podrobnosti pro účely hydrologického modelování je spojení vstupních vrstev do přiměřeného množství kategorií.

Tabulka charakteristik

Další povinný vstup je tabulka, která obsahuje hodnoty jednotlivých parametrů, jež jsou detailně popsány v manuálu k modelu SMODERP2D. Na tuto tabulku se odkazují identifikátory půdních druhů a využití území definované pro jednotlivé polygony v atributových tabulkách vektorových vstupů.

Srážková data

Dalším vstupem je soubor obsahující srážková data. Srážky se zadávají jako textový soubor se dvěma sloupci. V levém sloupci je časový interval v minutách, v pravém sloupci je kumulativní úhrn za daný časový interval v milimetrech.

Časový krok a doba výpočtu

Časový krok modelu Δt je hodnota v sekundách. Jako vstupní parametr se zadává maximální časový krok. Tento časový krok je rovněž počáteční časový krok. Časový krok Δt je v průběhu výpočtu upravován podle Courant-Friedrich-Lewy (*CFL*) podmínky tak, aby byla zachována numerická stabilita. Délka časového kroku závisí na rychlosti povrchového odtoku a na velikosti prostorového kroku (velikosti buňky DMT). Maximální časový krok záleží na požadovaném detailu výstupních dat, zejména při dotoku srážkové epizody, kdy jsou již rychlosti proudění nižší a kdy by *CFL* kritérium povolovalo příliš velký časový krok. Implementace Courant podmínky je blíže popsána v manuálu k modelu SMODERP2D.

Pozorované body zápisu výstupů

Jedná se o volitelnou bodovou vektorovou vrstvu. V těchto bodech se ukládají časové řady počítaných veličin (hydrogramy).

Hydrografická síť

Hydrografickou sítí jsou myšleny nejen vodní toky, ale i prvky dočasné hydrografické sítě jako jsou příkopy, průlehy, cesty s příkopy apod. Výpočet v modelu probíhá po jednotlivých úsecích pomocí Manningovy rovnice pro výpočet průtoku. Prostorové umístění jednotlivých úseků je definované pomocí liniové vrstvy. Charakteristiky jednotlivých úseků jsou definovány v samostatné tabulce.

3.1.3 Výstupy modelu

Kumulativní nebo maximální hodnoty veličin v jednotlivých buňkách jsou na konci výpočtu uloženy v rastrovém formátu. Průnik polygonů prostorové distribuce druhu půd a využití území jsou uloženy ve vektorovém formátu. Pokud model SMODERP2D počítá i úseky hydrografické sítě, jsou kumulativní nebo maximální hodnoty veličin jednotlivých úseků vypsány v atributové tabulce vektorové vrstvy úseků. Prostorové rozložení jednotlivých úseků je uloženo také jako jeden z rastrů. Volitelné výstupy hydrogramů v bodech jsou ve formě časových řad. Další nadstandardní výstupy lze získat úpravami ve zdrojovém kódu.

Rastrové výstupy

V rastroch jsou uloženy maximální a kumulativní hodnoty vybraných veličin v jednotlivých buňkách řešeného území. Velmi užitečnými výstupy, týkající se odtoku, jsou kumulativní infiltrace (cinfil_m3.asc), kumulativní srážka (crain_m3.asc), kumulativní povrchový odtok (cvsur_m3.asc) a maximální povrchový průtok (mqsur_m3_s.asc). Výše popsané výstupy byly použity pro rychlý náhled srážko-odtokové situace v povodích.

Vektorové výstupy

Výstupní vektorová data jsou tři. Jedná se topologicky upravenou vrstvu úseků hydrografické sítě, kde jsou do její atributové tabulky doplněny kumulativní a maximální hodnoty vybraných veličin. Druhým vektorovým výstupem je vrstva, která zobrazuje průnik prostorového rozložení druhu půdy a využití území. Při preprocessingu jsou z bodové vrstvy pro zápis hydrogramů smazány body, které jsou mimo výpočetní oblast.

Hydrogramy

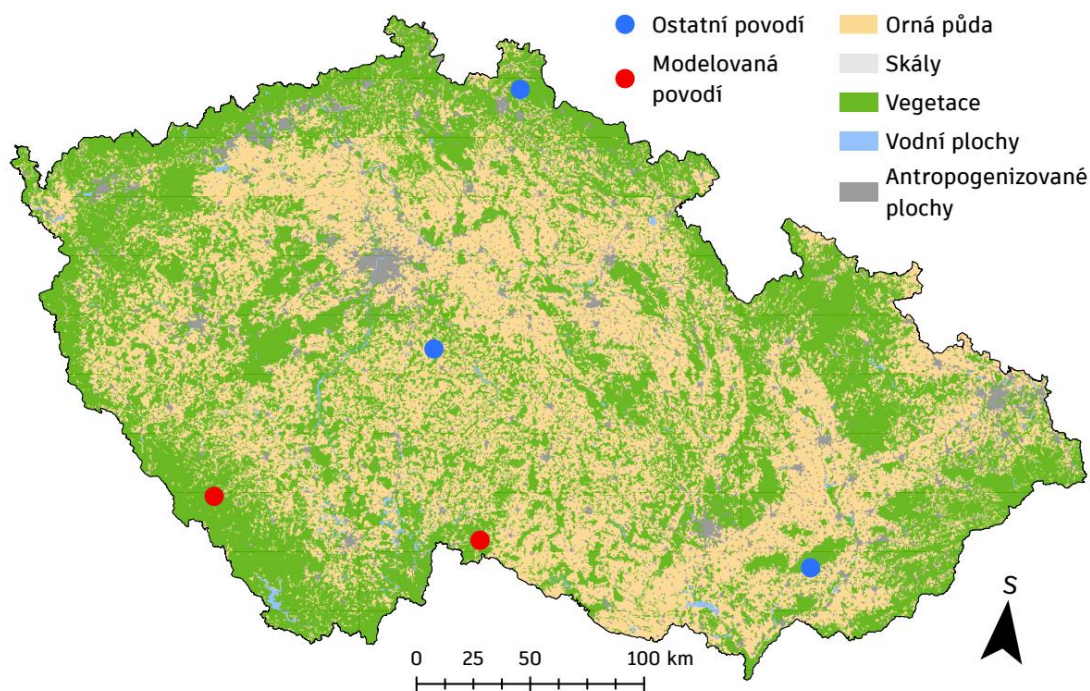
Pokud jsou do vstupů zadány body pro výpis hydrogramů, vypíší se do textových soubor. Vypsání veličiny jsou závislé na typu odtokového procesu. Pokud je bod v buňce úseku hydrografické sítě, vypisují se hodnoty tohoto celého úseku, přestože tento bod není na konci úseku. Model v současné verzi uvažuje, že pokud je v buňce úsek hydrografické sítě, zabírá úsek celou buňku, přestože je jeho šířka menší než šířka samotné buňky.

3.2 Modelované oblasti

Aplikace modelu SMODERP2D pro účely této práce proběhla v rámci projektu QK1910029 „Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích“. Na obrázku 10 jsou zobrazena modelovaná povodí vlevo Spůlka (CHP_14_S - 1-08-02-0100-0-00-60) a vpravo Pstruhovec (CHP_14_S - 4-14-01-0650-1-00-50). Jedná se o povodí 4. řádu. Původně těchto povodí bylo více, ale z důvodu nemožnosti porovnání a časové náročnosti výpočtu byla vybrána tato dvě povodí. Jedná se o povodí, která jsou pozorována Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ).

Data využití území jsou výsledkem automatizovaného propojení vrstev LPIS (identifikace půdy dle uživatelských vztahů) a ZABAGED® (základní báze geografických dat). Výsledný dataset využití území je vhodný pro odvozování vstupních vrstev fyzikálně založených modelů. (Devátý 2018)

Půdní data vycházejí z experimentálních půdních map, které vznikly na ČVUT FSv Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství v rámci projektu TJ02000234 „Fyzikální a hydrologické vlastnosti půd ČR“.



Obrázek 10: Umístění modelovaných oblastí (červeně) v České republice

3.2.1 Porovnání modelovaných povodí

Před začátkem modelování byla všechna povodí porovnána z pohledu zastoupení půdních druhů, nasycené hydraulické vodivosti, využití území, sklonových poměrů a celkové plochy.

Srovnání dle ploch půdních druhů

V tabulce 1 jsou plochy jednotlivých půdních druhů v povodích a v tabulce 2 jsou korelace povodí na základě těchto ploch. Z této tabulky vyplývá, že všechna povodí si jsou velmi podobná, co se týče zastoupeních půdních druhů.

Tabulka 1: Plochy půdních druhů v m² v povodích

Povodí / Půda	Býkovice	Pstruhovec	Hruškovice	Spůlka	Černá Nisa
Jílovitá hlína	-	-	75 549	-	-
Prachovitá hlína	252 878	-	16 467	-	-
Hlína	1 505 358	47 590	1 947 844	859 239	-
Písečná hlína	8 019 744	8 308 154	9 600 122	11 143 950	2 725 474
Hlinitý písek	-	274	-	49 161	-

Tabulka 2: Korelace ploch půdních druhů v povodích (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 1)

Povodí	Býkovice	Pstruhovec	Hruškovice	Spůlka	Černá Nisa
Býkovice	1,0				
Pstruhovec	0,98445	1,0			
Hruškovice	0,99923	0,98085	1,0		
Spůlka	0,99398	0,99761	0,99192	1,0	
Černá Nisa	0,98348	0,99998	0,97976	0,99721	1,0

Srovnání dle průměrných hodnot nasycené hydraulické vodivosti

Dále byla povodí porovnána na základě hodnot průměrné nasycené hydraulické vodivosti (K_{sat}) pro jednotlivé půdní druhy. Výchozí hodnoty jsou k nahlédnutí v tabulce 3 a korelace povodí jsou v tabulce 4. Z tabulky je patrné, že nejlépe spolu korelují povodí Pstruhovec a Spůlka.

Tabulka 3: Průměrné hodnoty K_{sat} ($mm.h^{-1}$) pro jednotlivé půdní druhy v povodích

Povodí / Půda	Býkovice	Černá Nisa	Hruškovice	Pstruhovec	Spůlka
Jílovitá hlína	0,00	0,00	9,78	0,00	0,00
Prachovitá hlína	9,92	0,00	7,79	0,00	0,00
Hlína	13,18	16,10	11,63	14,37	0,00
Písčitá hlína	20,51	31,73	22,95	46,27	24,89
Hlinitý písek	0,00	43,13	0,00	51,65	0,00

Tabulka 4: Korelace průměrných hodnot K_{sat} pro jednotlivé druhy půd v povodích (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 1)

Povodí	Býkovice	Pstruhovec	Hruškovice	Spůlka	Černá Nisa
Býkovice	1,0				
Pstruhovec	0,10269	1,0			
Hruškovice	0,84165	-0,05236	1,0		
Spůlka	0,18015	0,98380	0,06993	1,0	
Černá Nisa	0,74564	0,39458	0,84507	0,53316	1,0

Srovnání dle využití území

Následně byla povodí porovnána z pohledu využití území (LU – landuse). Celkové rozlohy jednotlivých kategorií LU jsou v tabulce 5. Dle korelace (tabulka 6) jsou si povodí z pohledu LU velmi podobná až na Býkovice. Důvodem je, že v ostatních případech se jedná převážně o lesní povodí a Býkovice jsou spíše zemědělským.

Tabulka 5: Plochy využití území v m² v povodích

Povodí / LU	Býkovice	Černá Nisa	Hruškovice	Pstruhovec	Spůlka
AZP	328 890	98 710	104 558	268 477	13 489
ETK	585 612	83 624	598 906	343 943	-
ITK	108 556	-	91 617	31 657	-
LP	1 402 520	7 573 462	9 543 494	8 577 730	2 716 157
OP	6 047 427	13 432	359 088	1 129	-
TP	1 262 287	580 293	941 216	2 827 738	-
VP	48 107	30 031	7 254	7 400	-

Tabulka 6: Korelace ploch využití území pro jednotlivá povodí (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 1)

Povodí	Býkovice	Pstruhovec	Hruškovice	Spůlka	Černá Nisa
Býkovice	1,0				
Pstruhovec	-0,00539	1,0			
Hruškovice	0,01945	0,99850	1,0		
Spůlka	-0,02351	0,96842	0,96897	1,0	
Černá Nisa	-0,00009	0,99737	0,99534	0,94786	1,0

Kategorie využití území odpovídají obrázkům 12 a 15. AZP jsou antropogenní a zpevněné plochy, ETK jsou extenzivní smíšené porosty, ITK jsou intenzivní smíšené porosty, LP jsou lesní porosty, OP jsou plochy s ornou půdou, TP jsou travnaté porosty a VP jsou vodní plochy.

Porovnání dle sklonových poměrů

V povodích byly spočítány průměrné sklony nad modelem DMR4G v rozlišení 5 x 5 m planární metodou (tabulka 7). V tabulce 8 se nachází porovnání sklonů, čím blíže k hodnotě 1, tím více jsou si povodí z pohledu sklonů podobná. Z tabulky 8 lze vyčíst, že nejpodobnější si jsou Černá Nisa a Spůlka, Černá Nisa a Pstruhovec a také Hruškovice a Býkovice. Dobře podobná jsou si Pstruhovec a Býkovice a zároveň Pstruhovec a Spůlka.

Tabulka 7: Průměrné sklony v povodích

Povodí	Sklon (%)
Býkovice	16,16
Černá Nisa	12,06
Hruškovice	18,50
Pstruhovec	9,05
Spůlka	10,74

Tabulka 8: Porovnání sklonů v povodích, poměr sklonů jednotlivých povodí (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 1)

Povodí	Býkovice	Pstruhovec	Hruškovice	Spůlka	Černá Nisa
Býkovice	1,0				
Pstruhovec	1,34	1,0			
Hruškovice	0,87	0,65	1,0		
Spůlka	1,79	1,33	2,04	1,0	
Černá Nisa	1,50	1,12	1,72	0,84	1,0

Vybraná povodí

Pro předchozí srovnání bylo pro každé povodí sečteno skóre vyjadřující míru podobnosti (tabulka 9), čím blíže je k hodnotě 3, tím více jsou si povodí podobná. Na základě tohoto skóre, s přihlédnutím k porovnání sklonů, byla vybrána povodí Pstruhovec a Spůlka.

Tabulka 9: Podobnost povodí, součet korelací (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 3)

Povodí	Býkovice	Pstruhovec	Hruškovice	Spůlka	Černá Nisa
Býkovice	3,0				
Pstruhovec	1,08	3,0			
Hruškovice	1,86	1,93	3,0		
Spůlka	1,15	2,95	2,03	3,0	
Černá Nisa	1,73	2,39	2,82	2,48	3,0

3.2.2 Pstruhovec

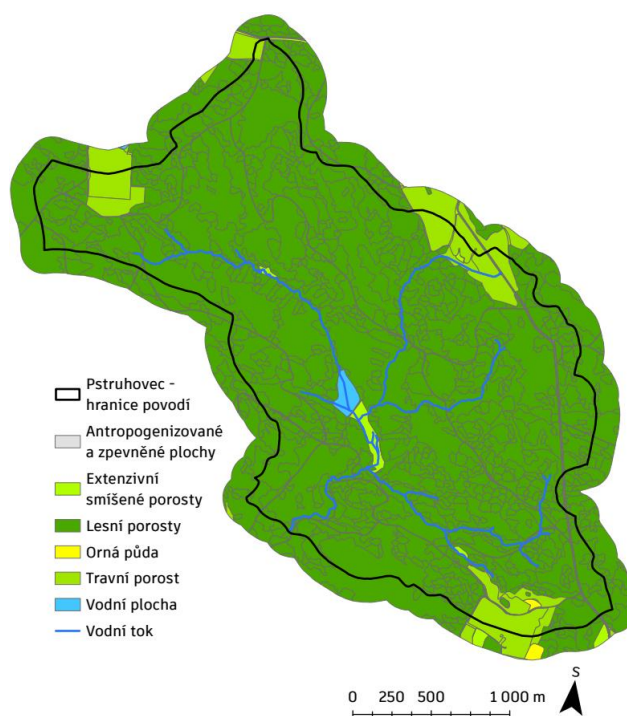
Povodí (obrázek 11) se nachází blízko hranice necelých 20 kilometrů od Jindřichova Hradce směrem na jihovýchod s celkovou plochou 6,36 km². Vějířovité povodí je převážně lesnatého charakteru se smíšenými porosty. Přibližně ve středu povodí se nachází vodní nádrž Pstruhovec. Vodní tok protékající povodím ústí do vodárenské nádrže Landštejn.



Obrázek 11: Vodní nádrž Pstruhovec (červen 2021 - Petr Kavka)

Využití území z pohledu modelování

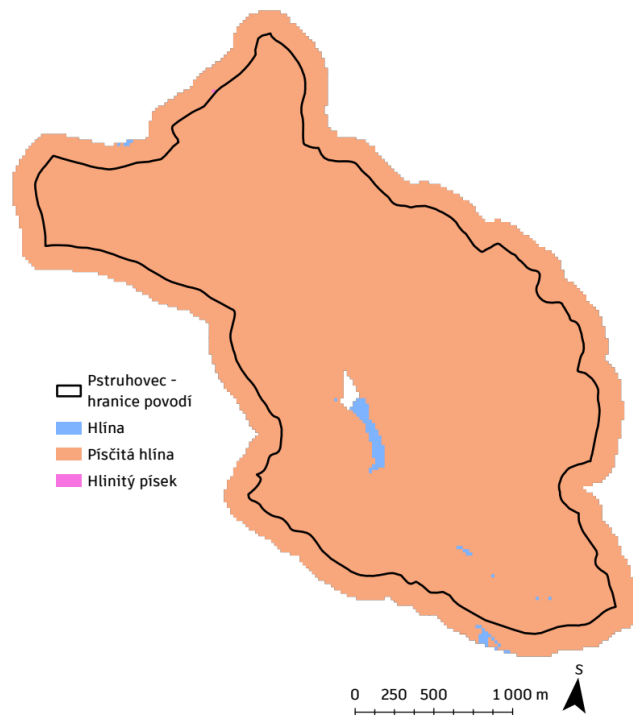
Využití území z pohledu hydrologického modelování v povodí Pstruhovec je zobrazeno na obrázku 12. Černou linií je vyznačena hranice povodí. Závěrový profil hydrografické sítě se nalézá na jihozápadním okraji povodí, kde je umístěna měrná stanice.



Obrázek 12: Využití území povodí Pstruhovec z pohledu hydrologického modelování

Půdní druhy

Z obrázku 13 můžeme vyčíst, že v území je zastoupena téměř výhradně písčité hlína. Ve středu povodí leží místo bez dat (bílá ploška). Pro účely modelování byla chybějící data nahrazena půdou druhu hlína dle kategorizace USDA-NCSS.



Obrázek 13: Půdní druhy nacházející se na povodí Pstruhovec

3.2.3 Spůlka

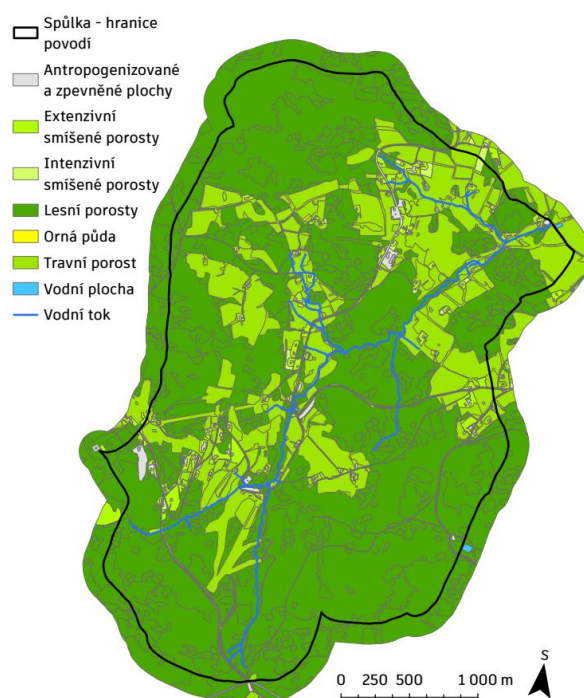
Šumavské povodí (obrázek 14) leží necelých 10 kilometrů západně od města Vimperk a zaujímá plochu 9,98 km². Jedná se o lesní povodí v kombinaci s travními pozemky s rozestou drobnou zástavbou a má protáhlý tvar.



Obrázek 14: Povodí Spůlka pohled od závěrového profilu (srpen 2021)

Využití území z pohledu modelování

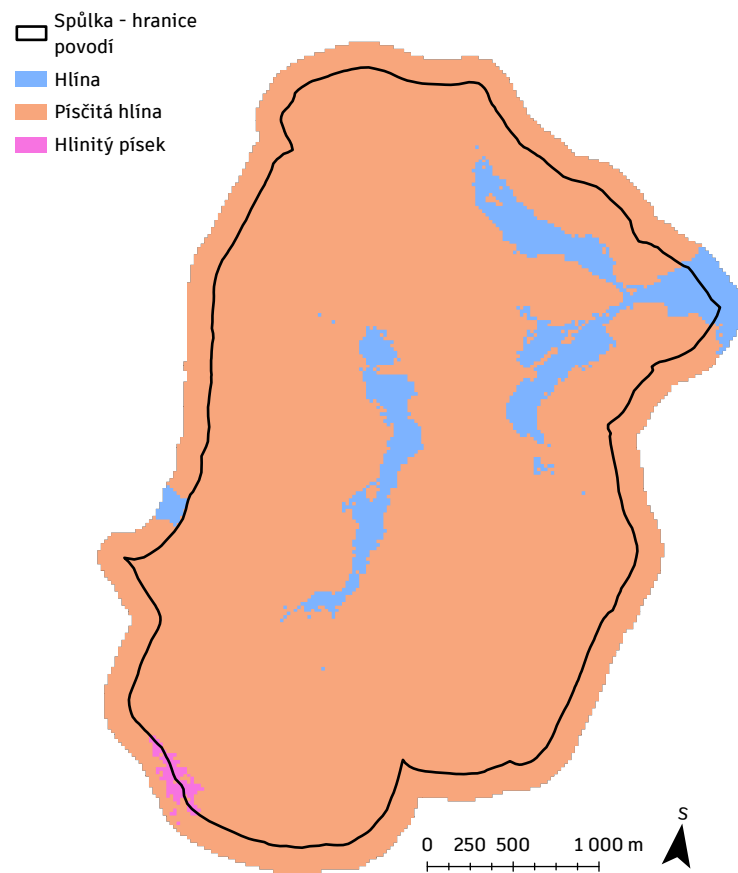
Na obrázku 15 je zobrazeno využití území v povodí Spůlka z pohledu hydrologického modelování. Černou linií je zobrazena hranice modelovaného povodí. Závěrový profil hydrografické sítě je na severovýchodě povodí, kde se nachází měrná stanice.



Obrázek 15: Využití území povodí Spůlka z pohledu hydrologického modelování

Půdní druhy

Na obrázku 16 je zobrazena mapa půdních druhů nacházející se v povodí Spůlka dle klasifikace USDA-NCSS. Na většině území převládá hlinitý písek.



Obrázek 16: Půdní druhy nacházející se na povodí Spůlka

3.3 Modelování oblastí

Po výběru povodí pro testování modelu SMODERP2D začaly probíhat simulace. Model je spustitelným nástrojem v produktech ESRI, během modelování bohužel nebylo možné současnou verzi modelu spustit v ArcGIS Pro, a proto výpočty probíhaly v ArcMap. Program neumožňuje simultánní běh nástrojů, pro každý scénář byla spuštěna samostatná instance programu ArcMap Catalog, kde běžely simulace v dávkách po scénářích.

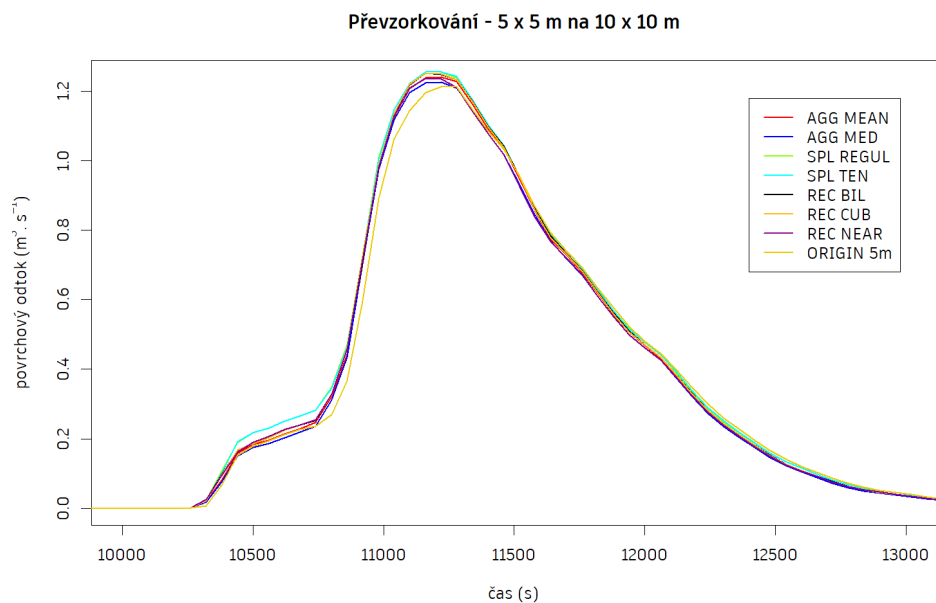
Testování modelu probíhalo metodou hrubé síly (brute-force) a částečným využitím Proxy-basin testu, který je detailněji popsán v kapitole 2.3.1. Během modelování bylo nutné přejít na simulaci podpovodí a snížit počet simulovaných epizod.

Za účelem urychlení procesu zpracování a porovnání hydrogramů bylo využito prostředí Rstudio (Allaire 2009), v němž byly vytvořeny grafické výstupy.

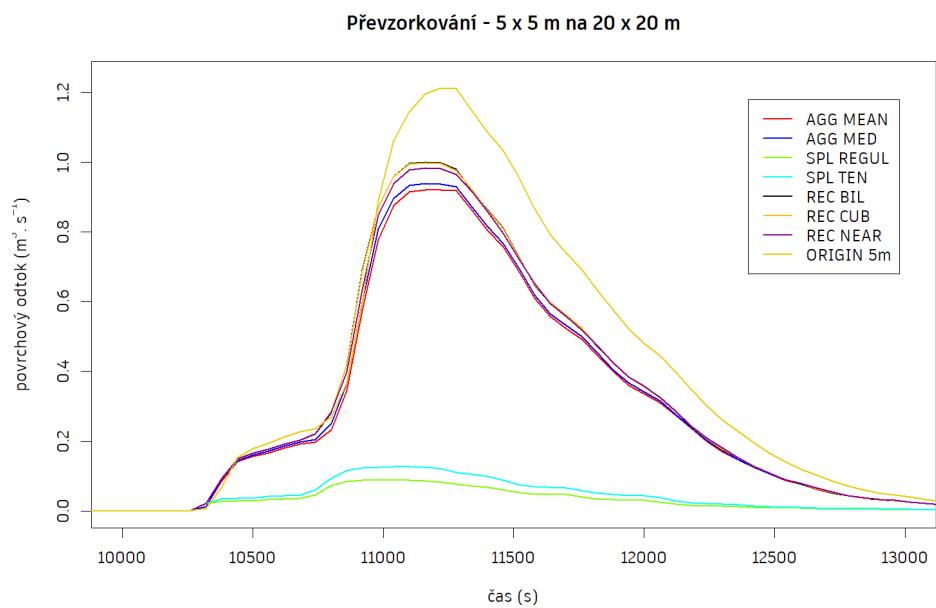
3.3.1 Digitální model reliéfu

Digitální model reliéfu 4. generace (DMR4G) představuje zobrazení zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě diskrétních bodů v pravidelné mřížce (5 x 5 m) se souřadnicemi X, Y, Z (S-JTSK) a H, kde H představuje nadmořskou výšku v systému Balt po vyrovnání (Bpv). Model je vygenerován pro stejná data jako DMR5G a je v návaznosti na něj aktualizován. (ČÚZK-1 2021).

Před začátkem modelování byla provedena jednoduchá zkouška modelu SMODERP2D s různými rozlišeními zobrazení reliéfu DMR4G. Na menší zachytané ploše byly testovány různé převzorkovací metody DMR4G v porovnání s poskytovanými výsledky modelu SMODERP2D. Na obrázcích 17 a 18 jsou hydrogramy pro příslušné metody převzorkování a rozlišení DMR4G. Při změně rozlišení z 5 x 5 m na 10 x 10 m (obrázek 17) není mezi výsledky jednotlivých metod velký rozdíl. Jedině metoda Spline TEN se trochu odlišuje. Pokud se podíváme na obrázek 18, je zde již patrný rozdíl v kulminaci, kde obě Spline metody selhávají (pravděpodobně přílišné vyhlazení). Patrný rozdíl je mezi maximální kulminací pro původní DMR4G a ostatní převzorkované DMR4G. Nejspíše je způsoben tím, že SMODERP2D odstraňuje vnější buňky při předzpracování dat a je tedy možné, že zvětšením plochy jednotlivých buněk dojde ke ztrátě informací. Na základě těchto testů byla použita pro převzorkování metoda Aggregate mean, která zachovává těžiště buněk.



Obrázek 17: Úsek hydrogramu v době kulminace na malé záchytné ploše DMR4G 10 x 10 m pro různé metody převzorkování



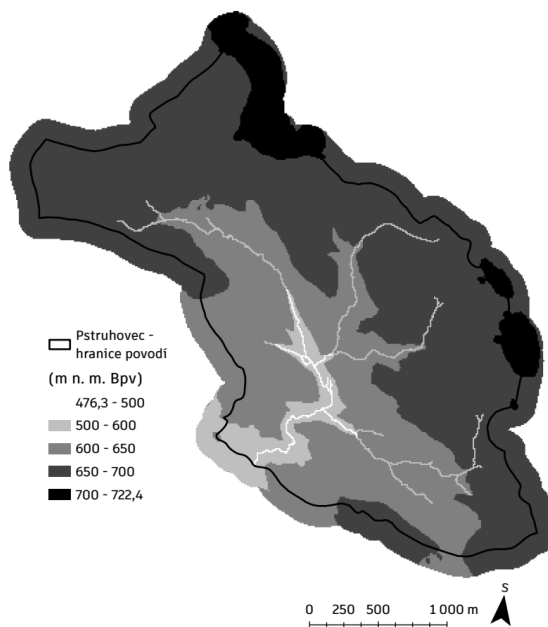
Obrázek 18: Úsek hydrogramu v době kulminace na malé záchytné ploše DMR4G 20 x 20 m pro různé metody převzorkování

3.3.2 Vstupní data

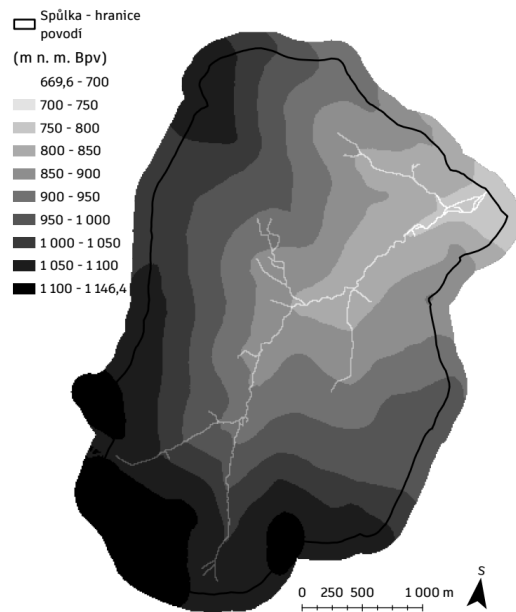
Vstupní data jsou velmi důležitou součástí modelování a jejich důkladná příprava má velký vliv na kvalitu výstupů. Bohužel ne vždy jsou dostupné dostatečně kvalitní informace a už zde vznikají určité nejistoty modelování.

Model reliéfu

Pro modelování byl použit model DMR4G v rozlišení 10 x 10 m. V místech, kde se nacházely vodní toky, došlo k umělému zahloubení vodotečí o 100 m, aby byl zajištěn správný směr povrchového odtoku (obrázek 19 a 20). Digitální model reliéfu slouží jako podklad pro výpočet sklonů, směru a akumulace odtoku.



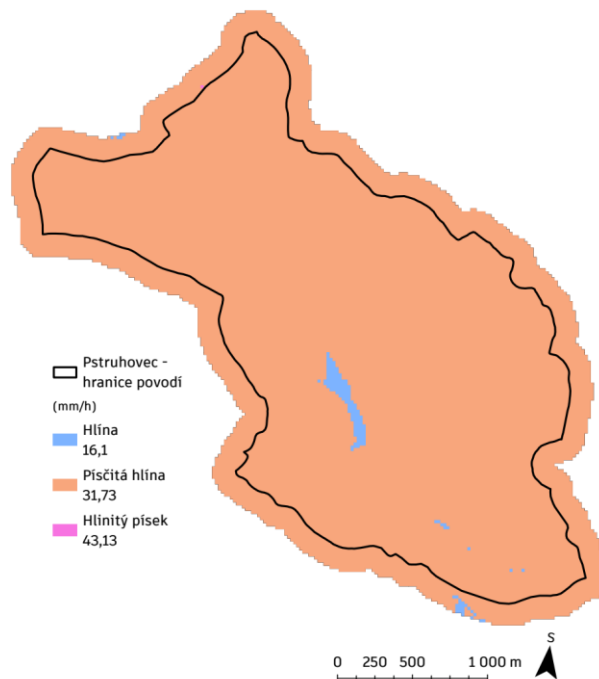
Obrázek 19: Vstupní model terénu do SMODERP2D se zahloubenými vodními toky pro povodí Pstruhovec



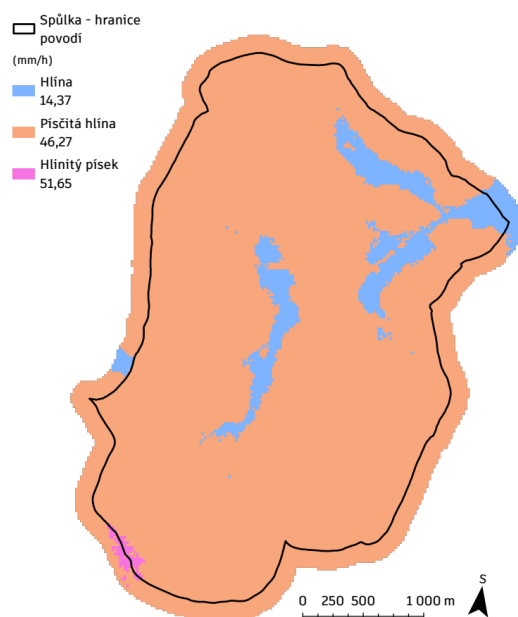
Obrázek 20: Vstupní model terénu do SMODERP2D se zahloubenými vodními toky pro povodí Spůlka

Půdní data

Půdní data jsou odvozena z experimentálních map nasycených hydraulických vodivostí odvozených pomocí pedotransferových funkcí. Do modelu vstupuje pouze jedna průměrná hodnota K_{sat} pro půdní druh. Na obrázcích 21 a 22 je zobrazeno prostorové rozložení půdních druhů v povodích společně s hodnotami K_{sat} .



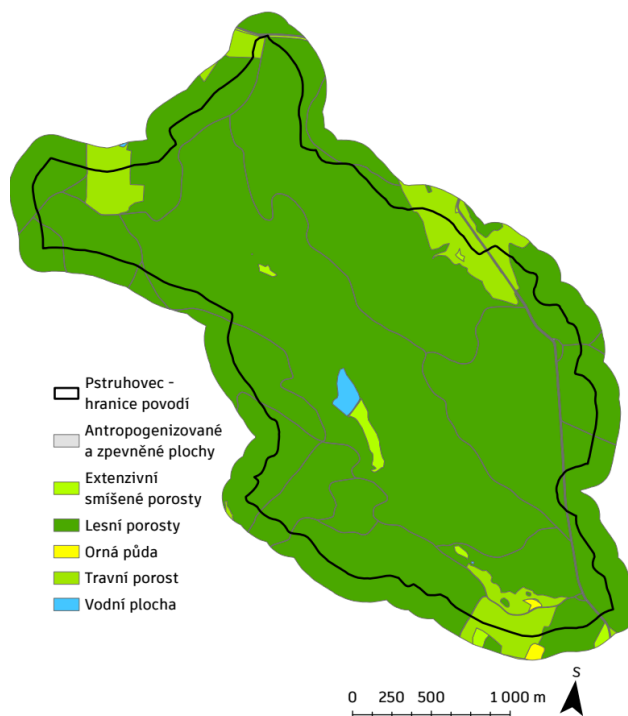
Obrázek 21: Průměrné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti dle půdního druhu v povodí Pstruhovec



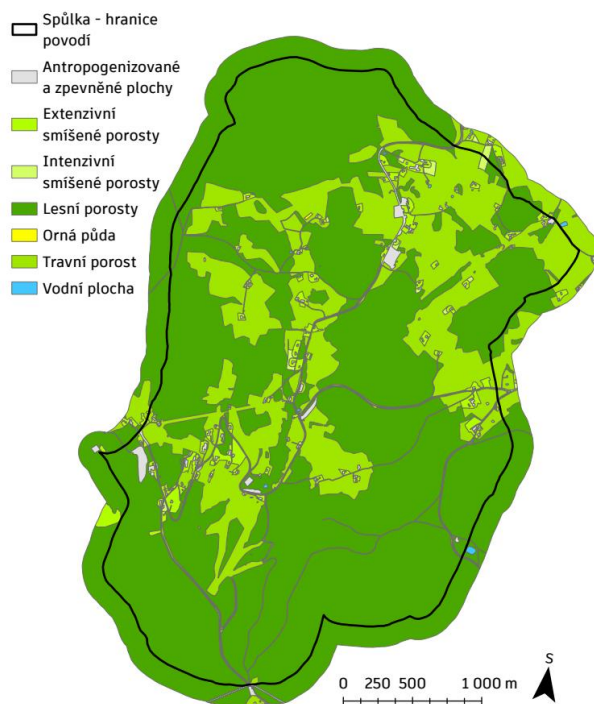
Obrázek 22: Průměrné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti dle půdního druhu v povodí Spůlka

Data využití území

Využití území je automatizovanou kombinací vrstev ZABAGED® a Lpis. Pro účely hydrologického modelování došlo k zjednodušení kategorizace do výsledné vstupní podoby (obrázek 23 a 24).



Obrázek 23: Využití území použité pro modelování pro povodí Pstruhovec



Obrázek 24: Využití území použité pro modelování pro povodí Spůlka

Srážková data

Do modelu vstupují srážky v kumulativní podobě. Srážková data byla v rámci projektu poskytnuta ČHMÚ. Záznamy srážek vznikly radarově a dále byly srážky adjustovány do podoby časových řad v 10minutovém kroku. Spolu se srážkovými daty byly dodány časové řady měřených hydrogramů v hodinovém kroku.

Výchozím bodem bylo 5 pozorovaných srážko-odtokových událostí. Vzhledem k tomu, že SMODERP2D je epizodním modelem, byly tyto události rozloženy na jednotlivé epizody. Pro každé povodí vzniklo 8 srážko-odtokových epizod. V tabulce 10 se nachází datum, celkový úhrn a intenzita těchto epizod.

Tabulka 10: Celkové úhrny dešťových srážek pro jednotlivé epizody v modelovaných povodích

Pstruhovec	Úhrn (mm)	Int (mm.h ⁻¹)	Spůlka	Úhrn (mm)	Int (mm.h ⁻¹)
06.08.2002	72,82	1,20	06.08.2002	122,69	2,60
11.08.2002	82,91	1,17	11.08.2002	166,83	3,44
29.06.2006	107,54	3,89	20.08.2005	104,02	1,40
26.06.2009	35,74	6,50	22.06.2009	82,82	3,98
27.06.2009	11,15	0,64	24.06.2009	23,38	1,65
29.06.2009	14,21	2,13	27.06.2009	45,60	4,49
23.06.2013	76,25	1,52	17.07.2010	76,04	3,33
22.07.2014	25,61	0,52	01.06.2013	106,42	2,49

Průběhy veškerých srážkových epizod jsou k nahlédnutí v příloze A1 a A2. Přes skutečnost, že je SMODERP2D epizodním modelem, byly některé srážky záměrně vybrány s dvěma maximy, aby byl model otestován i za této situace.

Hydrografická síť a pozorovací body

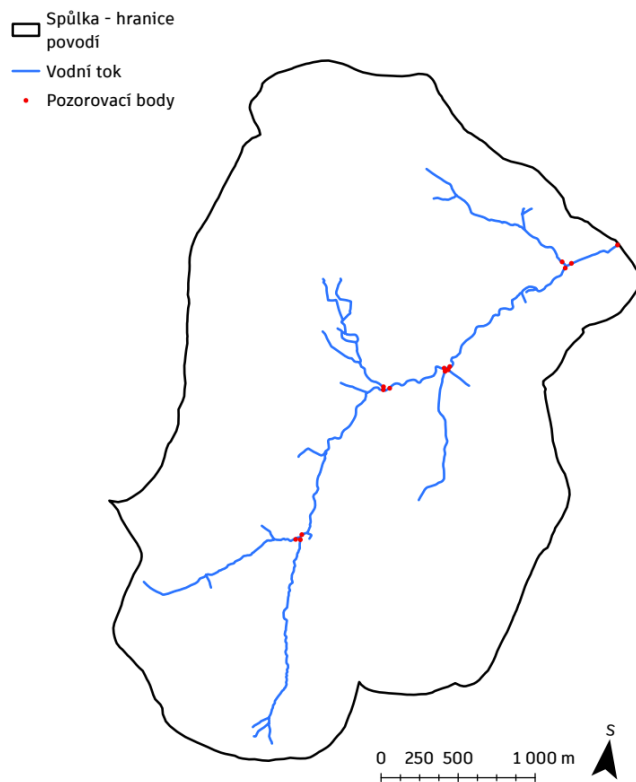
Polohopis hydrografické sítě byl převzat z vrstev ZABAGED®. Jako tvar vodního toku byl zvolen lichoběžník¹, jelikož ostatní tvary byly v době modelování nedostupné (vypnuté). V závěrových profilech povodí byly do vodních toků umístěny pozorovací body (obrázek 25 a 26). Další pozorovací body byly umístěny v místech soutoku dvou větví vodních toků.

Vodní toky byly oproti realitě mírně upraveny tak, že pokud se vodní tok větvil a zase spojil, došlo k odstranění jedné z větví. Tato úprava byla nutná, jelikož model nebyl schopen takto větvíci se a zase se spojující vodní toky simulovat.

Prohloubení modelu terénu DMR4G bylo provedeno pro originální polohopis vodních toků.



Obrázek 25: Hydrografická síť a pozorovací body v povodí Pstruhovec



Obrázek 26: Hydrografická síť a pozorovací body v povodí Spůlka

Matice vstupních charakteristik

Velmi důležitým vstupem jsou hydraulické charakteristiky vodního toku, půdy a využití území. Tyto vstupy v podstatě řídí celé chování modelu.

Vstupem jsou dvě tabulky. První obsahující informace o geometrii a drsnosti povrchu vodních toků a druhá, která obsahuje kombinaci půdních charakteristik a využití území. Na druhou tabulku se nadále bude referovat jako *SoilVeg tabulka* (soil – půda, veg – vegetace).

Tabulka charakteristik vodních toků (tabulka 11) obsahuje:

- *smoderp* – spojovací kód
- *tvar* – typ tvaru
- *b* – šířka dna příčného profilu v (*m*)
- *m* – poměr sklonu svahů (obdélník = 0)
- *n* – Manningův koeficient drsnosti ($s \cdot m^{-1/3}$)
- *Q365* – základní průtok ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Tabulka 11: Ukázka výchozích vstupních parametrů charakterizujících vodní toky

smoderp	tvar	b	m	n	Q365
lichobeznik1	1	0,2	2,0	0,035	0,0
trojuhelnik1	2	0	2,0	0,070	0,0

SoilVeg tabulka (tabulka 12) charakterizující půdu a typ pokryvu obsahuje:

- *SoilVeg* – spojovací kód
- *k* – nasycená hydraulická vodivost ($m \cdot s^{-1}$)
- *s* – sorptivita půdy ($m \cdot s^{-1/2}$)
- *n* – Manningův koeficient drsnosti ($s \cdot m^{-1/3}$)
- *pi* – potenciální intercepce (*mm*)
- *ppl* – poměrná plocha listová (–)
- *ret* – povrchová retence (*mm*)
- *b, x a y* – 3krát parametr rovnice plošného odtoku
- *tau* – kritické tečné napětí (*Pa*)
- *v* – kritická nevymílací rychlost ($m \cdot s^{-1}$)

Tabulka 12: Ukázka výchozích vstupních parametrů charakterizujících půdu a vegetaci

SoilVeg	k	s	n	pi	ppl	ret	b	x	y	tau	v
HHTP	1,67E-04	1,29E-04	0,05	1	0,4	8	1,7385	10,0841	0,5613	10,79	0,248
HHVP	1,67E-04	1,29E-04	0,02	0	0	0	1,7385	10,0841	0,5613	10,79	0,248

3.3.3 Testování modelu SMODERP2D

Z mnoha vstupních parametrů, které model obsahuje, byly vybrány Mannigův koeficient drsnosti, sorptivita a nasycená hydraulická vodivost pro testování. Důvodem pro volbu těchto parametrů byl jejich velký vliv na infiltrační a odtokovou rutinu. Během simulací byly upravovány vstupní parametry a vizuálně ověřována shoda modelovaných a měřených hydrogramů. Testování modelu probíhalo metodou brute-force (hrubou silou).

V tabulce 13 jsou uvedeny výchozí hodnoty těchto parametrů pro půdní druhy, které se vyskytovaly v povodích Pstruhovec a Spůlka.

Tabulka 13: Výchozí hodnoty pro půdní druhy nacházejících se v povodích Pstruhovec a Spůlka (barevně označeny upravované parametry)

Druh půdy	$k (m.s^{-1})$	$s (m.s^{-1/2})$	$b (-)$	$x (-)$	$y (-)$	$\tau (Pa)$	$v (m.s^{-1})$
Hlína	1,67E-06	1,29E-04	1,7385	10,0841	0,5613	10,79	0,248
Hlinitý písek	1,00E-06	1,29E-04	1,8165	8,8133	0,3661	10,66	0,245
Písčitá hlína	5,14E-06	9,75E-05	1,7925	9,2043	0,4622	10,66	0,245
Bez půdy	0	0	0	0	0	100	3

V následující tabulce 14 jsou uvedeny hodnoty výchozích parametrů a kategorie využití území.

Tabulka 14: Výchozí hodnoty pro jednotlivé kategorie využití území (barevně označeny upravované parametry)

Druh vegetace	$n (s.m^{-1/3})$	$p_i (mm)$	$ppl (-)$	$ret (mm)$
Antropogenní plochy	0,011	0,0	0,0	2
Křoviny	0,12	1,0	0,4	8
Lesní porost	0,09	1,8	0,9	10
Orná půda	0,035	0,16	0,13	5
Ostatní zeleň	0,12	1,0	0,4	8
Sady	0,12	1,0	0,4	8
Travní porost	0,05	1,0	0,4	8
Vodní plocha	0,02	0,0	0,0	0
Zahrada	0,075	1,1	0,4	8

Pro obě povodí byly vytvořeny nové SoilVeg tabulky. Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti byly převzaty z experimentálních map vytvořených na Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství na Fakultě stavební ČVUT.

Sorptivita pro tyto půdy byla určena dle Angelaki, Argyrokastritis a Kerkides (Angelaki et al. 2021; Argyrokastritis and Kerkides 2003). Poslední kalibrační parametr Manningův drsnostní koeficient vychází z tabelovaných hodnot dle Akan a Chow (Akan 2006; Ven Te Chow 1959). Všechny ostatní parametry byly ponechány ve výchozím stavu.

V nulté simulaci byly spuštěny výpočty pro všechny srážkové epizody s výchozími parametry, změněna byla pouze hodnota K_{sat} dle půdních map. Z těchto simulací došlo jen k minimálnímu nebo žádnému odtoku hydrografickou sítí. Výstupy z nulté simulace pro povodí Pstruhovec a Spůlka jsou k nahlédnutí v přílohách A1 a A2.

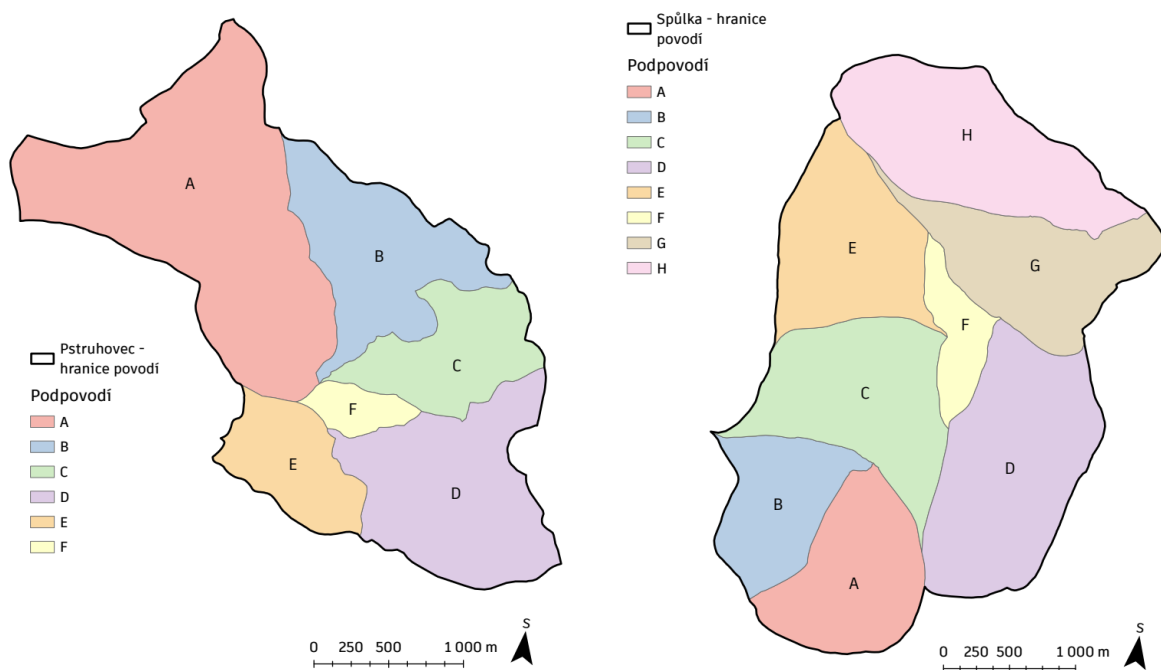
Při změně vstupních parametrů tak, aby došlo k odtoku, se nutná výpočetní doba prodloužila natolik (obrázek 27), že nebylo možné provést simulace v rozumném čase.

```
-----  
Total time      [secs]: 16029.65  
Time step      [secs]: 8.77e-01  
Time iterations      : 1  
Percentage done   [%]: 20.55  
Time to end      [mins]: 44687.33  
-----  
-----  
Total time      [secs]: 36254.27  
Time step      [secs]: 4.46e-01  
Time iterations      : 1  
Percentage done   [%]: 18.31  
Time to end      [mins]: 76402.96  
-----
```

Obrázek 27: Odhadovaný čas dokončení výpočtu pro dvě simulace (time to end) cca 31 dní a 53 dní

Přechod k podpovodím

Z předchozích důvodů byla povodí rozdělena na jednotlivá podpovodí a další simulace proběhly na každém z nich (obrázek 28). V tabulce 15 a 16 jsou uvedeny plochy jednotlivých podpovodí a jejich podíl z celkové plochy povodí.



Obrázek 28: Rozdělení povodí Pstruhovec (vlevo) a Spůlka (vpravo) na podpovodí

Tabulka 15: Plocha dílčích podpovodí v povodí Spůlka (barevně označeno vybrané podpovodí)

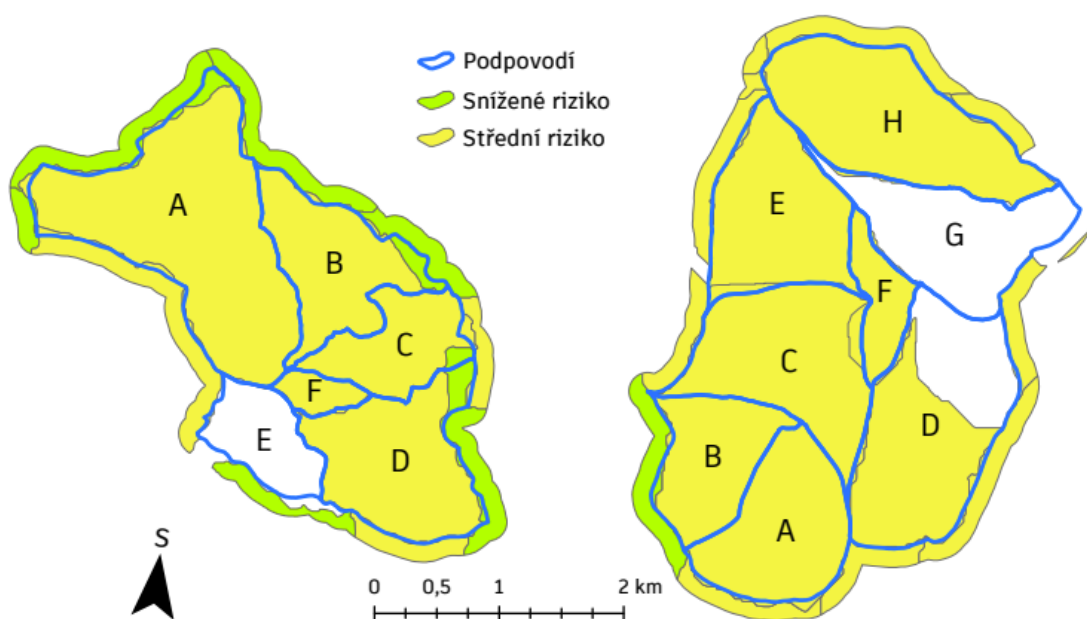
Spůlka - podpovodí	Plocha (m ²)	Podíl z plochy (%)
A	1 152 426	11,5
B	865 252	8,7
C	1 469 661	14,7
D	1 861 017	18,6
E	1 298 776	13,0
F	391 087	3,9
G	1 247 348	12,5
H	1 703 731	17,1

Tabulka 16: Plocha dílčích podpovodí v povodí Pstruhovec (barevně označeno vybrané podpovodí)

Pstruhovec - podpovodí	Plocha (m ²)	Podíl z plochy (%)
A	2 509 591	39,44
B	1 055 287	16,59
C	726 108	11,41
D	1 320 999	20,76
E	567 982	8,93
F	182 463	2,87

I přes takto upravený přístup výpočetní časy dosahovaly několika dnů a v rozumném čase nebylo možné simulovat na všech podpovodích všechny epizody kvůli limitacím výpočetního výkonu. V návaznosti na tuto skutečnost došlo k další změně přístupu.

Dle závěru studie, která se zabývala vymezením malých horních povodí a klasifikací z hlediska rizika odtoku, spadají podpovodí v povodí Pstruhovec a Spůlka (obrázek 29) do kategorie se středním rizikem (Kavka 2021).



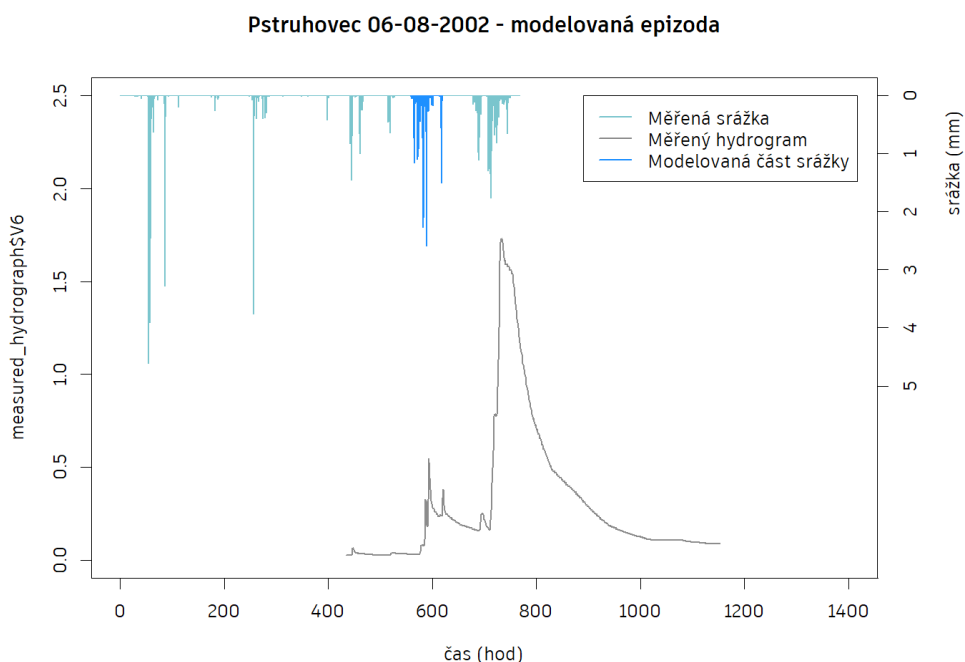
Obrázek 29: Riziko vzniku odtoku v podpovodích v povodích Pstruhovec (vlevo) a Spůlka (vpravo) (upraveno - Kavka 2021)

Jelikož všechna podpovodí v povodích Pstruhovec a Spůlka spadají do stejné rizikové kategorie, byla vybrána podpovodí pro další simulace.

V povodí Pstruhovec bylo vybráno podpovodí C, kde se výpočetní časy pohybovaly v desítkách hodin, a další simulace probíhaly na tomto podpovodí. Aby bylo možné provést porovnání s povodím Spůlka, bylo zvoleno pro simulace podpovodí A. Spůlka A splňovala požadavky z hlediska výpočetních časů a velikosti. Simulovanými epizodami byly 06082002 (obrázek 30 a 31) a 11082002 (obrázek 32 a 33). Z hydrogramů je patrné, že hydrologická odpověď srážkové epizody 11082002 reaguje na předchozí nasycení povodí z předešlé epizody 06082002. V tabulce 17 se nachází číselný popis zvolených epizod.

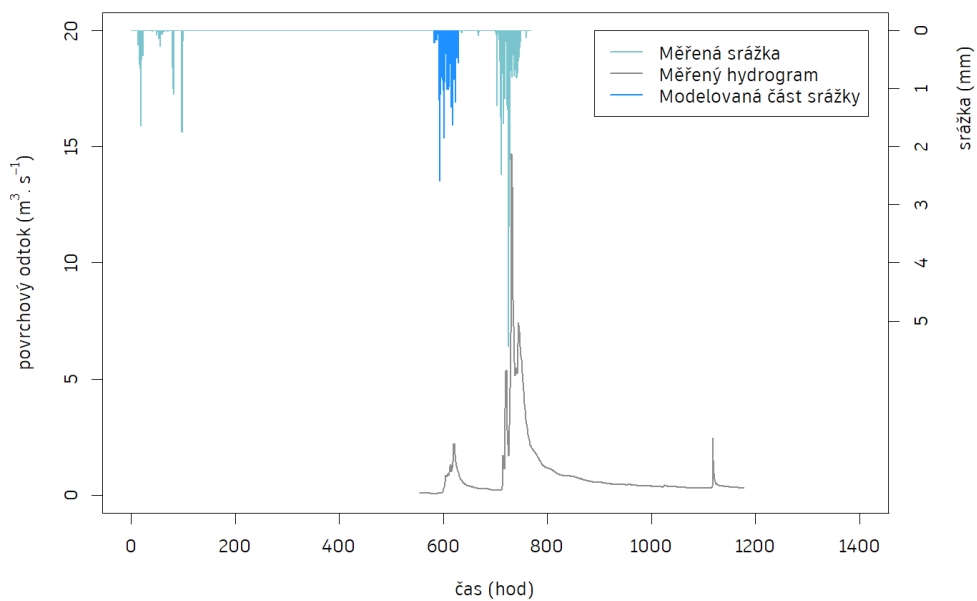
Tabulka 17: Přehled modelovaných epizod, jejich celkového úhrnu a maximálního úhrnu za 20 minut

Podpovodí	Pstruhovec		Spůlka	
Epizoda	06082002	11082002	06082002	11082002
Úhrn (mm)	72,82	82,91	122,69	166,83
Max. úhrn za 20 min (mm)	4,56	3,46	5,06	9,50



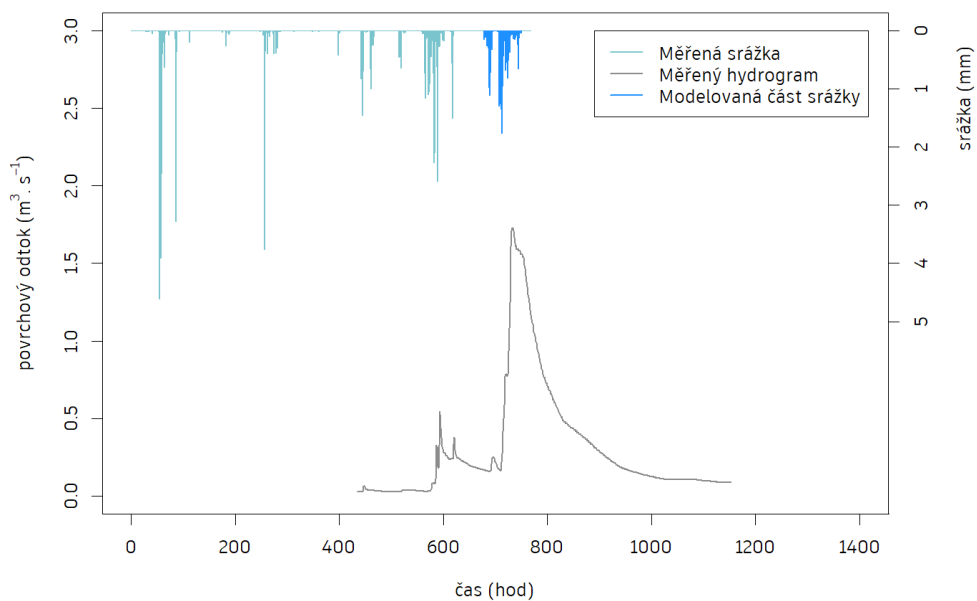
Obrázek 30: Epizoda 06082002 pro podpovodí Pstruhovec C a příslušný hydrogram v závěrovém profilu celého povodí Pstruhovec

Spůlka 06-08-2002 - modelovaná epizoda



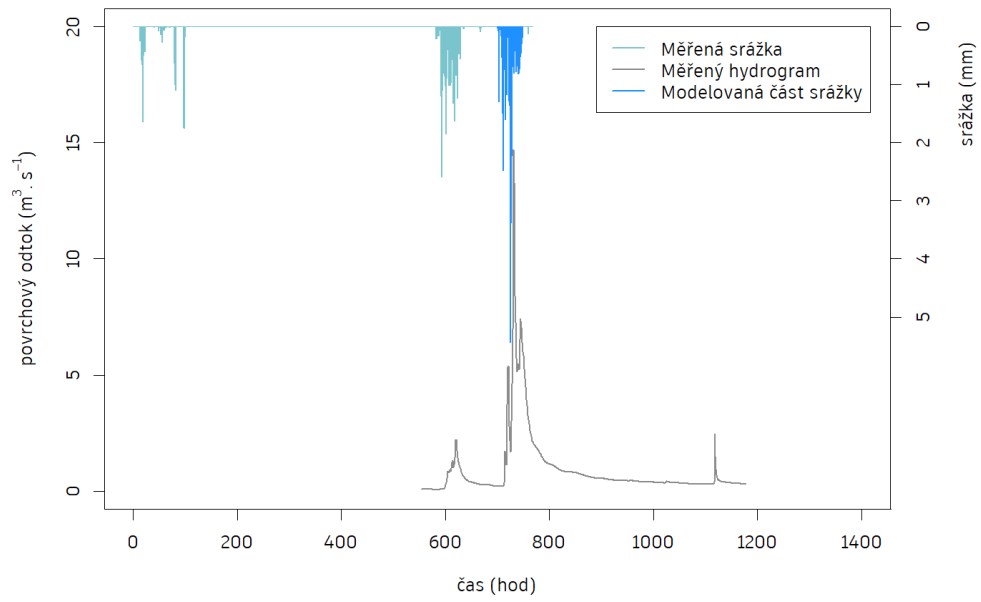
Obrázek 31: Epizoda 06082002 pro podpovodí Spůlka A a příslušný hydrogram v závěrovém profilu celého povodí Spůlka

Pstruhovec 11-08-2002 - modelovaná epizoda



Obrázek 32: Epizoda 11082002 pro podpovodí Pstruhovec C a příslušný hydrogram v závěrovém profilu celého povodí Pstruhovec

Spůlka 11-08-2002 - modelovaná epizoda



Obrázek 33: Epizoda 11082002 pro podpovodí Spůlka A a příslušný hydrogram v závěrovém profilu celého povodí Spůlka

Modifikace hydrogramů a separace základního odtoku

V návaznosti na kategorizaci podpovodí z hlediska rizika vzniku odtoku došlo k modifikaci odtokového hydrogramu škálováním dle dílčích ploch podpovodí. Vzhledem k tomu, že hydrogramy byly modifikovány a k simulacím docházelo na horních povodích, bylo upuštěno od přesného porovnávání každé simulace a hydrogramy byly porovnávány vizuálně.

Z modifikovaných hydrogramů byl vypočten celkový odteklý objem vody ($V_{out,scaled}$), který byl porovnáván s modelovaným odteklým objemem ($V_{out,modeled}$), jež model poskytuje jako jeden z výstupů. Stejným měřítkem byl škálován maximální průtok ($Q_{out,scaled}$) pro s modelovaným maximálním průtokem ($Q_{out,modeled}$). Výpočet celkového odteklého objemu ze srážkové události byl proveden dle rovnice 19. Byl určen základní odtok a průtok na sestupné větvi ve chvíli, kdy byl již pokles minimální. Od celkového odteklého objemu byl oddělen odteklý objem způsobený základním odtokem. Takto získaný odteklý objem byl modifikován dle dílčí plochy povodí ($V_{out,scaled}$), který se nachází v tabulce 18. Výsledkem této operace jsou i celkové modifikované měřené hydrogramy na obrázku 34 a 35.

$$V_{out} = \sum_0^i \left[\left(\frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} - Q_b \right) (t_{i+1} - t_i) \right] - \frac{(Q_{end} - Q_b)(t_{end} - t_b)}{2} \quad (19)$$

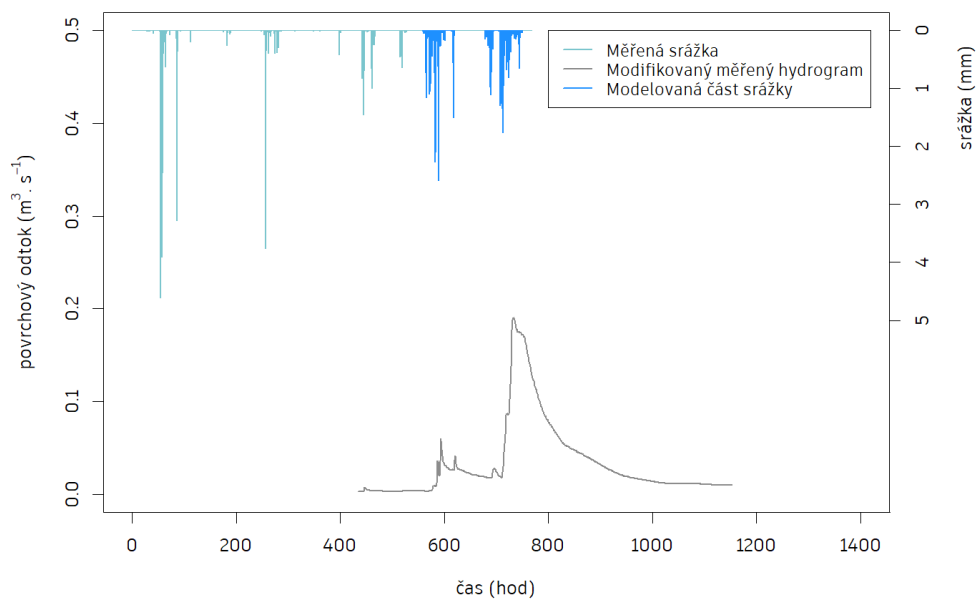
kde:

- V_{out} je celkový odteklý objem (m^3)
- Q je měřený průtok ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- Q_b je určený základní průtok ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- Q_{end} je průtok na sestupné větvi hydrogramu ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- t je časový krok měření (s)
- t_b je čas základního odtoku (s)
- t_{end} je čas odtoku na sestupné větvi hydrogramu (s)

Tabulka 18: Celkový odteklý objem (V_{out}) v závěrových profilech povodí Pstruhovec a Spůlka spolu s modifikovaným odteklým objemem ($V_{out,scaled}$) pro podpovodí C a A z vybraných událostí

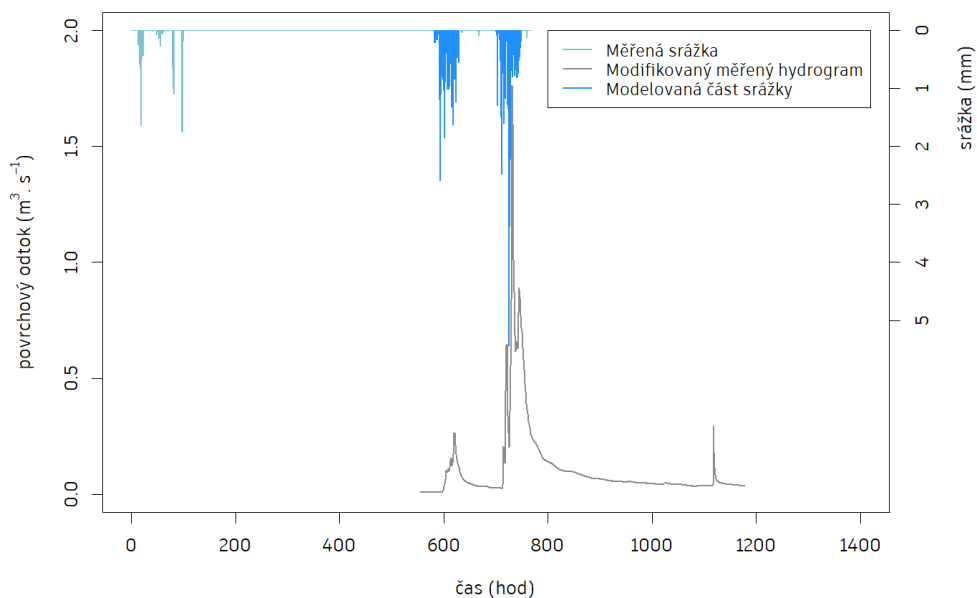
Povodí	Epizoda	V_{out} (m^3)	Měřítko	$V_{out,scaled}$ (m^3)
Pstruhovec	06082002	12 034,8	0,114	1 372,0
	11082002	128 773,8	0,114	14 680,2
Spůlka	06082002	87 710,4	0,115	10 086,7
	11082002	811 800,0	0,115	93 357,0

Pstruhovec 2002 - modifikovaný hydrogram



Obrázek 34: Modifikovaný hydrogram povodí Pstruhovec dle dílčí plochy subpovodi C pro rok 2002

Spůlka 2002 - modifikovaný hydrogram



Obrázek 35: Modifikovaný hydrogram povodí Spůlka dle dílčí plochy subpovodi A pro rok 2002

4 Výsledky

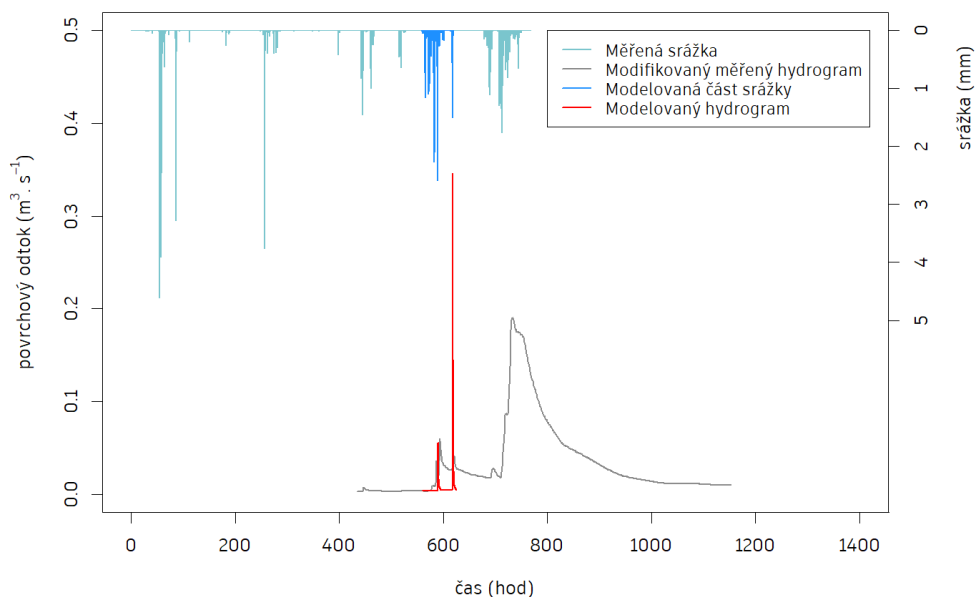
Celkově proběhlo přes 510 unikátních simulací, včetně testovacích anebo přerušovaných. Většina simulací proběhla pro podpovodí Pstruhovec C a Spůlka A (cca 320 simulací). Z těchto simulací byly výsledné takové scénáře, jejichž modelované hydrogramy byly podobné modifikovaným pozorovaným hydrogramům. Změny charakteristik vodních toků měly jen minimální vliv na testování a byl změněn pouze Manningův koeficient drsnosti a pro všechny simulace byla tato tabulka totožná (viz. tabulka 33).

Během testování byly nejprve upraveny parametry nasycené hydraulické vodivosti, která vycházela z experimentálních map, poté byl upraven Manningův drsnostní koeficient a nakonec došlo k úpravám sorptivity. V případě nasycené hydraulické vodivosti došlo k pohybu v rozmezí jednoho řádu. Manningův drsnostní koeficient byl upraven pro všechny kategorie využití území. Jelikož je Sorptivita zatížena velkou nejistotou byly zvoleny hranice a docházelo k posunům až o 2 řády oproti tabelovaným hodnotám.

Pstruhovec C – epizoda 06082002

Na obrázku 36 a 37 jsou zobrazeny modelované hydrogramy 14. generace SoilVeg tabulek pro podpovodí Pstruhovec C v kombinaci se srážkovou epizodou 06082002. Při zkoumání obrázku 36 došlo k vizuálnímu porovnání s modifikovaným hydrogramem a na základě tohoto porovnání bylo usouzeno, že verze SoilVeg tabulky 014f je pro tento scénář uspokojivá. Na základě tohoto posudku byly pro generaci 13 a 14 porovnány celkové oteklé objemy z modelované epizody $V_{out,modeled}$, jež jsou v tabulce 19. Z tabulky vyplývá, že nejpodobnější celkový objem byl pro verzi SoilVeg tabulky 14d (obrázek 37). V tabulce 20 se nachází porovnání maximálního modelovaného průtoku ($Q_{out,modeled}$). Z tabulky plyne, že model hůře zvládá srážky s dvěma maximy.

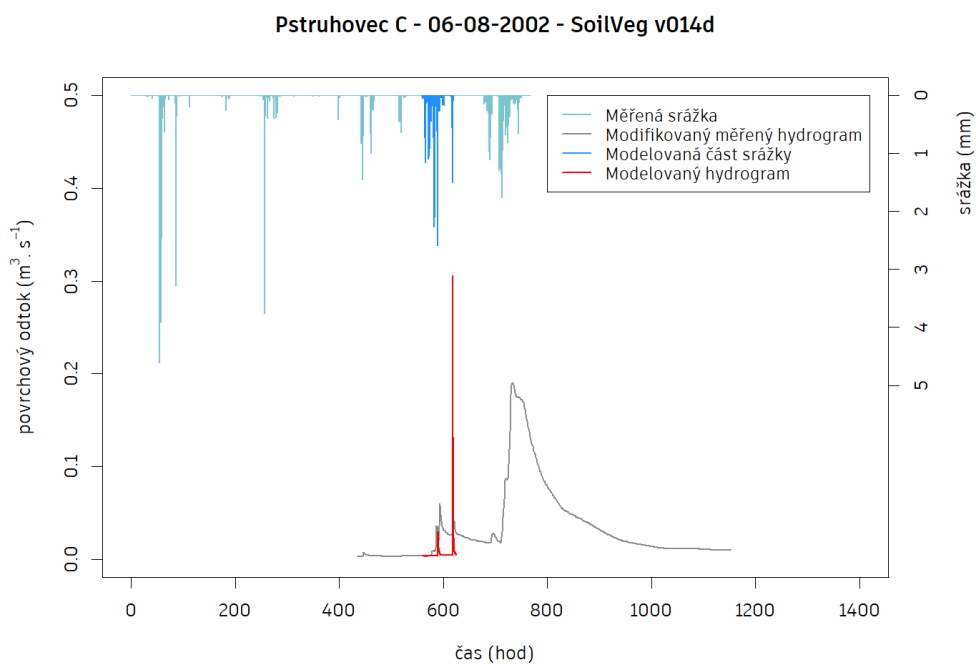
Pstruhovec C - 06-08-2002 - SoilVeg v014f



Obrázek 36: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 14. generace verze f

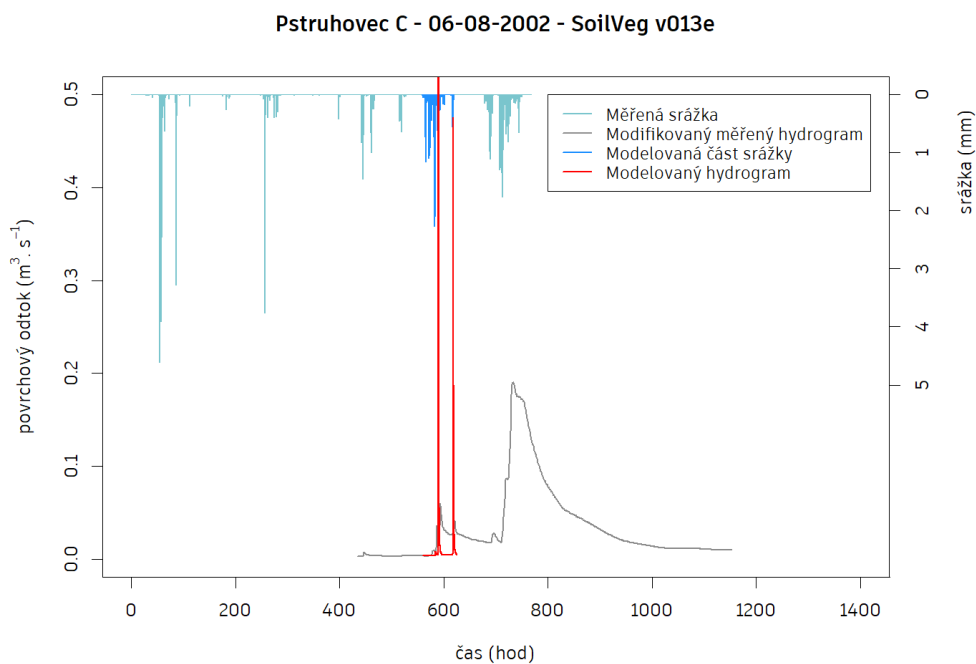
Tabulka 19: Podobnost celkového objemu modifikovaného ($V_{out,scaled}$) a modelovaného hydrogramu ($V_{out,modeled}$) podpovodí Pstruhovec C pro vybrané scénáře a srážkovou epizodu 06082002 (čím blíže 1, tím podobnější)

Podpovodí	Epizoda	SoilVeg	$V_{out,modeled}$ (m ³)	$V_{out,scaled}$ (m ³)	Podobnost
Pstruhovec C	6082002	v013a	2167.0	1372.0	1.58
		v013b	2345.0		1.71
		v013c	2563.0		1.87
		v013d	2791.0		2.03
		v013f	3263.0		2.38
		v013g	3501.0		2.55
		v013h	3761.0		2.74
		v013i	4026.0		2.93
		v014a	1112.0		0.81
		v014b	1254.0		0.91
		v014d	1399.0		1.02
		v014e	1563.0		1.14
		v014f	1652.0		1.20
		v014g	1782.0		1.30
		v014h	1941.0		1.41
v014i	2082.0	1.52			



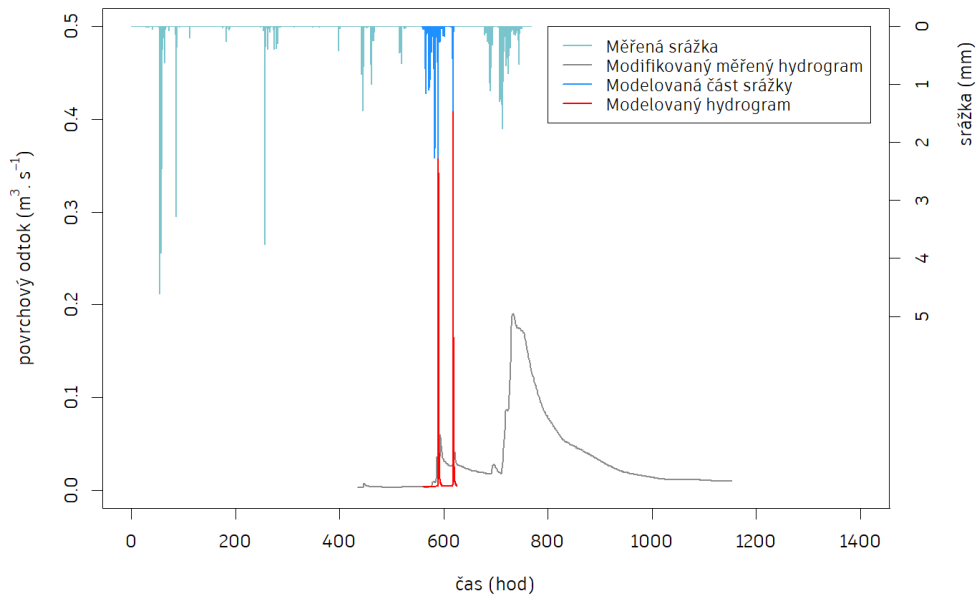
Obrázek 37: Modelovaný hydrogram v podpododí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 14. generace verze d

Z obrázků 36, 37, 38 a 39 vyplývá, že došlo k ovlivnění infiltrační rutiny změnou sorptivity a model již nebyl schopen alespoň přibližně modelovat reálnou odpověď dvouhrbé srážky.



Obrázek 38: Modelovaný hydrogram v podpododí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 13. generace verze e

Pstruhovec C - 06-08-2002 - SoilVeg v013d



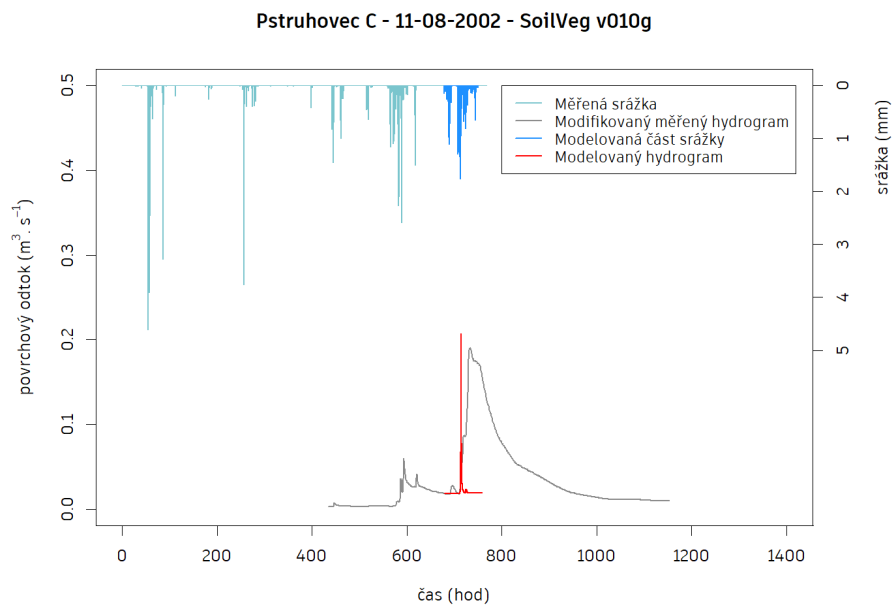
Obrázek 39: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 13. generace verze d

Tabulka 20: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out,scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out,modeled}$) v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 (čím blíže 1, tím podobnější)

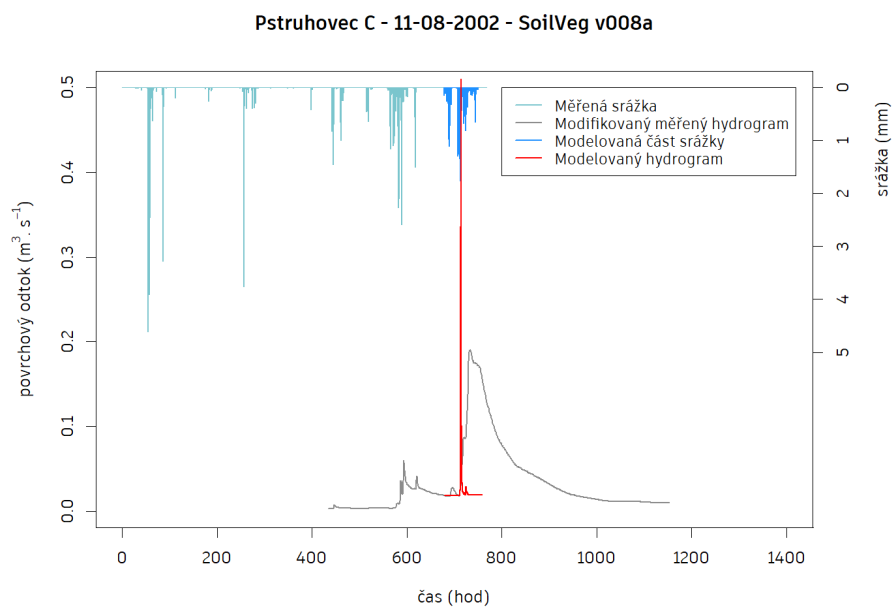
Podpovodí	Epizoda	SoilVeg	$Q_{out,scaled} (m^3.s^{-1})$	$Q_{out,modeled} (m^3.s^{-1})$	Podobnost
Pstruhovec C	06082002	v013a	0,06	0,37	6,24
		v013b		0,38	6,41
		v013c		0,39	6,57
		v013d		0,41	6,76
		v013f		0,50	8,34
		v013g		0,58	9,64
		v013h		0,66	11,03
		v013i		0,74	12,38
		v014a		0,23	3,87
		v014b		0,27	4,47
		v014d		0,30	5,05
		v014e		0,33	5,55
		v014f		0,34	5,72
		v014g		0,35	5,87
		v014h		0,36	6,02
		v014i		0,37	6,17

Pstruhovec C – epizoda 11082002

Na obrázku 40 a 41 se nacházejí hydrogramy 10. a 8. generace SoilVeg tabulek pro podpovodí Pstruhovec C a srážkovou epizodou 11082002. Během simulací bylo usouzeno, že verze 010g je uspokojivá. V tabulce 21 je porovnání celkových odteklých objemů ze simulovaných ($V_{out,modeled}$) a modifikovaných hydrogramů ($V_{out,scaled}$) pro 10. a 8. generaci.



Obrázek 40: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 11082002 10 generace verze g



Obrázek 41: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 11082002 8 generace verze a

Tabulka 21: Podobnost celkového objemu modifikovaného ($V_{out,scaled}$) a modelovaného hydrogramu ($V_{out,modeled}$) podpovodí Pstruhovec C pro vybrané scénáře a srážkovou epizodu 11082002 (čím blíže 1, tím podobnější)

Podpovodí	Epizoda	SoilVeg	$V_{out,modeled}$ (m ³)	$V_{out,scaled}$ (m ³)	Podobnost
Pstruhovec C	11082002	v008a	2835,0	14680,2	0,19
		v008b	2742,0		0,19
		v008c	2651,0		0,18
		v008d	2562,0		0,17
		v008e	2476,0		0,17
		v008f	2388,0		0,16
		v008g	2279,0		0,16
		v008h	2187,0		0,15
		v010a	574,2		0,04
		v010b	668,3		0,05
		v010c	734,7		0,05
		v010d	801,0		0,05
		v010e	875,5		0,06
		v010f	948,5		0,06
		v010g	1023,0		0,07
		v010h	1098,0		0,07
		v010i	1173,0		0,08

V tabulce 22 se nachází hodnoty maximálního modelovaného průtoku ($Q_{out,modelled}$). Z porovnání tabulek 21 a 22 plyne, že kulminace výrazně převyšuje nad modifikovanou ($Q_{out,scaled}$), ale celkovým objemem stále nedostačuje.

Tabulka 22: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out,scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out,modelled}$) v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 11082002 (čím blíže 1, tím podobnější)

Podpovodi	Epizoda	SoilVeg	$Q_{out,scaled} (m^3.s^{-1})$	$Q_{out,modelled} (m^3.s^{-1})$	Podobnost
Pstruhovec C	11082002	v008a	0,19	0,49	2,59
		v008b		0,51	2,67
		v008c		0,53	2,77
		v008d		0,55	2,88
		v008e		0,57	2,98
		v008f		0,59	3,08
		v008g		0,60	3,18
		v008h		0,62	3,28
		v008i		0,64	3,38
		v010a		0,08	0,40
		v010b		0,10	0,51
		v010c		0,11	0,59
		v010d		0,13	0,69
		v010e		0,15	0,79
		v010f		0,17	0,89
		v010g		0,19	0,99
		v010h		0,21	1,10
		v010i		0,23	1,21

Spůlka A – epizoda 06082002

Z obrázku 42 a 43 můžeme rozpoznat obdobný problém jako v případě předchozí epizody. Modelovaná kulminace na obrázku 42 částečně odpovídá modifikovanému měřenému hydrogram, ale celkový odteklý objem je značně podhodnocen. Vzhledem k této skutečnosti byla vybrána verze SoilVeg tabulky 012i. V tabulce 23 se nachází porovnání simulovaného odteklého objemu ($V_{out,modelled}$) z 12. a 13. generace SoilVeg tabulek a modifikovaného celkového odteklého objemu. Tabulka 24 obsahuje porovnání maximálního modelovaného ($Q_{out,modelled}$) a modifikovaného průtoku ($Q_{out,scaled}$).

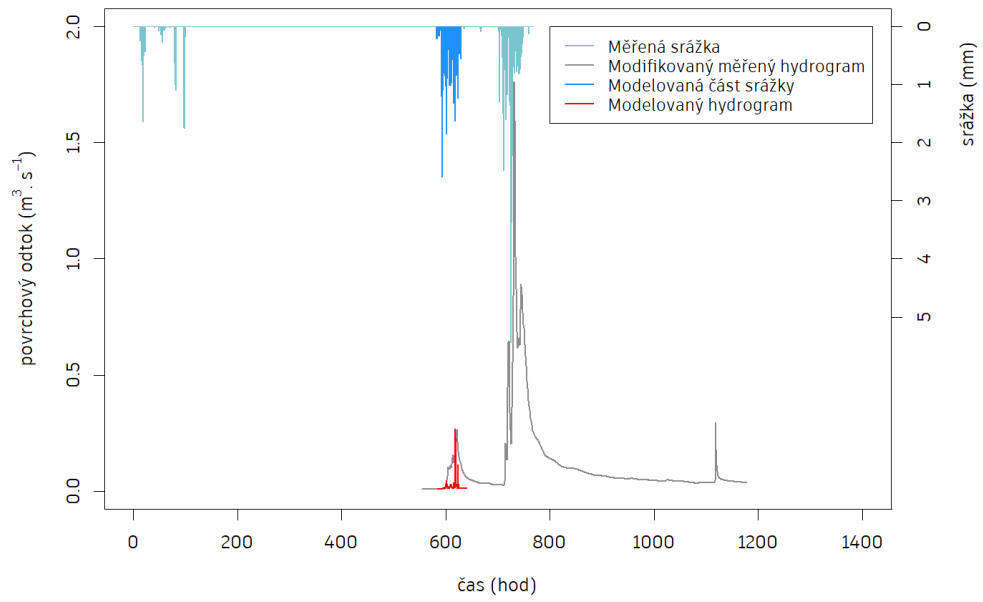
Tabulka 23: Podobnost celkového objemu modifikovaného ($V_{out,scaled}$) a modelovaného hydrogramu ($V_{out,modelled}$) podpovodí Spůlka A pro vybrané scénáře a srážkovou epizodu 06082002 (čím blíže 1, tím podobnější)

Podpovodí	Epizoda	SoilVeg	$V_{out,modelled}$ (m ³)	$V_{out,scaled}$ (m ³)	Podobnost
Spůlka A	06082002	v012a	1471,00	10086,7	0,15
		v012b	1511,00		0,15
		v012c	1550,00		0,15
		v012d	1604,00		0,16
		v012e	1703,00		0,17
		v012f	1861,00		0,18
		v012g	820,50		0,08
		v012h	2216,00		0,22
		v012i	2561,00		0,25
		v013a	2830,00		0,28
		v013b	3120,00		0,31
		v013c	3460,00		0,34
		v013d	3790,00		0,38
		v013e	4100,00		0,41
		v013f	4110,00		0,41
		v013g	4130,00		0,41
		v013h	4150,00		0,41
		v013i	4160,00		0,41

Tabulka 24: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out,scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out,modeled}$) v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 06082002 (čím blíže 1, tím podobnější)

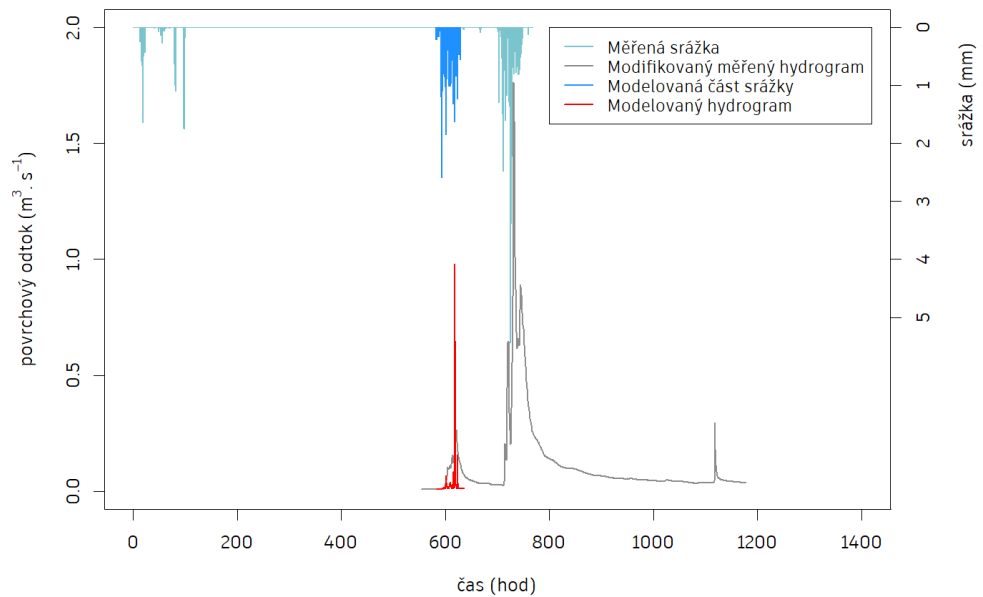
Podpovodi	Epizoda	SoilVeg	$Q_{out,scaled}$ ($m^3.s^{-1}$)	$Q_{out,modeled}$ ($m^3.s^{-1}$)	Podobnost
Spůlka A	06082002	V012a	0,27	0,10	0,37
		v012b		0,106	0,40
		v012c		0,117	0,44
		v012d		0,128	0,48
		v012e		0,14	0,53
		v012f		0,16	0,59
		v012g		0,03	0,13
		v012h		0,26	0,98
		v012i		0,38	1,44
		v013a		0,50	1,88
		v013b		0,628	2,37
		v013c		0,759	2,86
		v013d		0,879	3,31
		v013e		0,966	3,64
		v013f		0,97	3,65
		v013g		0,97	3,65
		v013h		0,97	3,66
		v013i		0,97	3,67

Spůlka A - 06-08-2002 - SoilVeg v012h



Obrázek 42: Modelovaný hydrogram v podpododí Spůlka A pro srážkovou epizodu 06082002 12. generace verze h

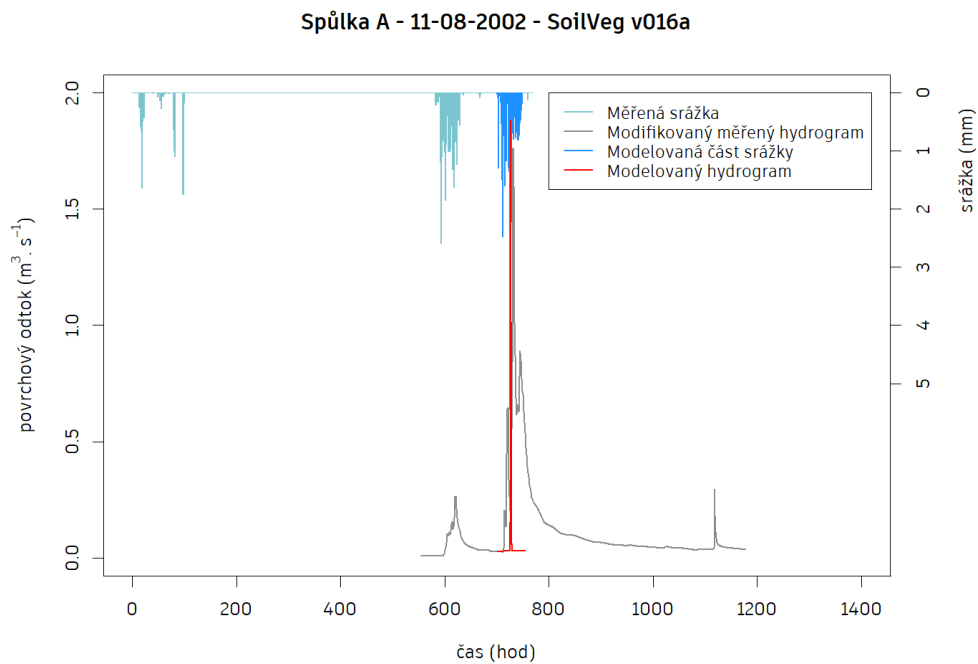
Spůlka A - 06-08-2002 - SoilVeg v013i



Obrázek 43: Modelovaný hydrogram v podpododí Spůlka A pro srážkovou epizodu 06082002 13. generace verze i

Spůlka A – epizoda 11082002

V tabulce 25 se nachází porovnání simulovaného odteklého objemu ($V_{out,modeled}$) z 6. a 16. generace SoilVeg tabulek a modifikovaného celkového odteklého objemu ($V_{out,scaled}$). Z tabulky je jasné, že objemově se 16. generace velmi vzdaluje od reality, proto je zde i ukázka z 6. generace, která je cca na polovině objemu, ale její kulminace je mnohonásobně vyšší (obrázek 45). Dle vizuálního srovnání (obrázek 44) byla verze 016a shledána uspokojivou. V tabulce 26 jsou hodnoty modelovaného ($Q_{out,modeled}$) a modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out,scaled}$).



Obrázek 44: Modelovaný hydrogram v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 11082002 16. generace verze a

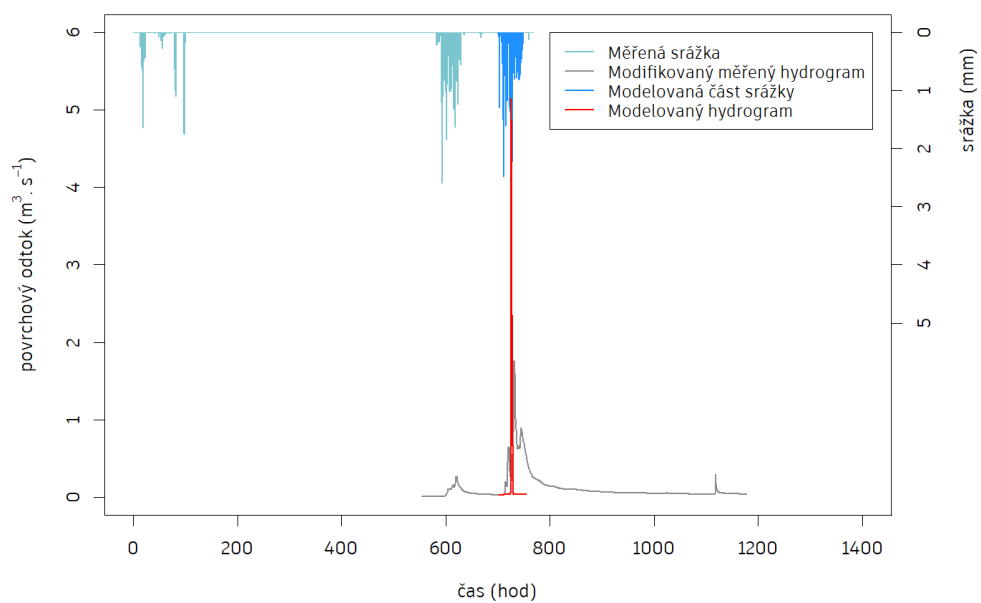
Tabulka 25: Podobnost celkového objemu modifikovaného ($V_{out,scaled}$) a modelovaného hydrogramu ($V_{out,modeled}$) podpovodí Spůlka A pro vybrané scénáře a srážkovou epizodu 11082002 (čím blíže 1, tím podobnější)

Podpovodí	Epizoda	SoilVeg	$V_{out,modeled}$ (m ³)	$V_{out,scaled}$ (m ³)	Podobnost
Spůlka A	1182002	V006a	31260,00	93357,0	0,33
		v016a	7550,00		0,08
		v016b	8270,00		0,09
		v016c	9010,00		0,10
		v016d	9710,00		0,10
		v016e	10400,00		0,11
		v016f	11100,00		0,12
		v016g	11800,00		0,13
		v016h	12600,00		0,13
		v016i	13400,00		0,14

Tabulka 26: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out,scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out,modeled}$) v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 11082002 (čím blíže 1, tím podobnější)

Podpovodí	Epizoda	SoilVeg	$Q_{out,scaled}$ (m ³ .s ⁻¹)	$Q_{out,modeled}$ (m ³ .s ⁻¹)	Podobnost
Spůlka A	11082002	V006a	1,76	5,127	2,91
		V016a		1,86	1,05
		v016b		1,96	1,11
		v016c		2,06	1,17
		v016d		2,06	1,17
		v016e		2,12	1,20
		v016f		2,17	1,23
		v016g		2,24	1,27
		v016h		2,38	1,35
		v016i		2,51	1,42

Spůlka A - 11-08-2002 - SoilVeg v006a



Obrázek 45: Modelovaný hydrogram v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 11082002 6. generace verze a

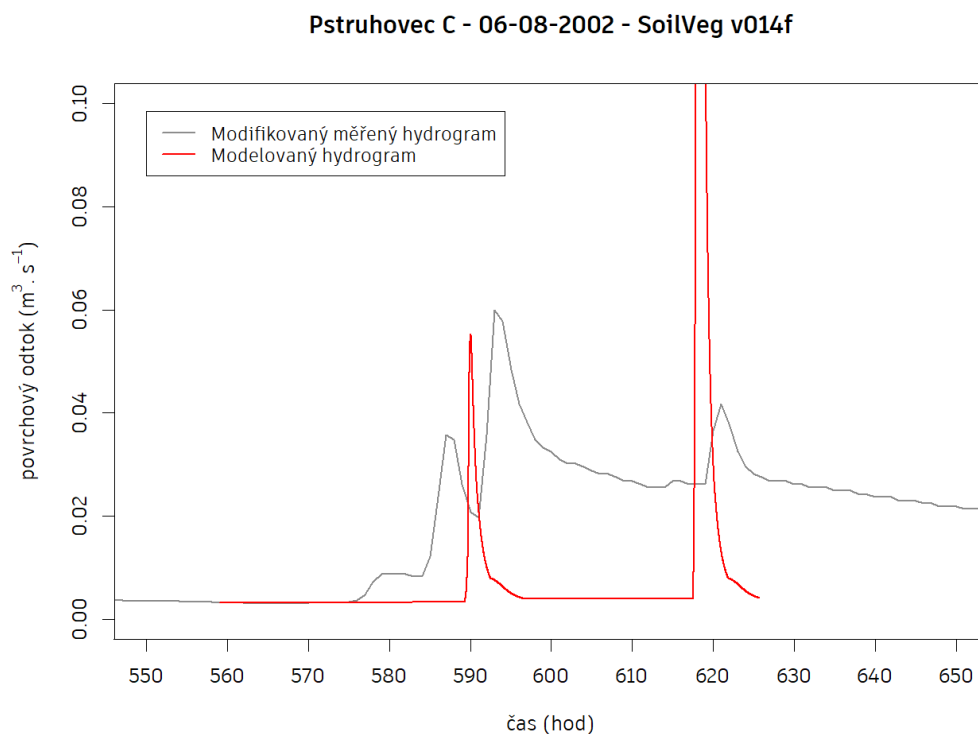
4.1.1 Výsledek analýzy hydrologické odezvy

Následuje bodové shrnutí výsledných verzí pro podpovodí Pruhovec C a Spůlka A. V tabulce 27 se nachází porovnání kulminace modelovaných ($Q_{out,modeled}$) a modifikovaných ($Q_{out,scaled}$) hydrogramu pro výsledné verze tabulek SoilVeg. Z tabulky 27 vyplývá že v případě kdy srážka nemá více maxim, panuje mezi průtoku příznivá shoda.

- Pstruhovec C – epizoda 06082002: SoilVeg v014f (obrázek 46)
- Pstruhovec C – epizoda 11082002: SoilVeg v010g (obrázek 47)
- Spůlka A – epizoda 06082002: SoilVeg v012i (obrázek 48)
- Spůlka A – epizoda 11082002: SoilVeg v016a (obrázek 49)

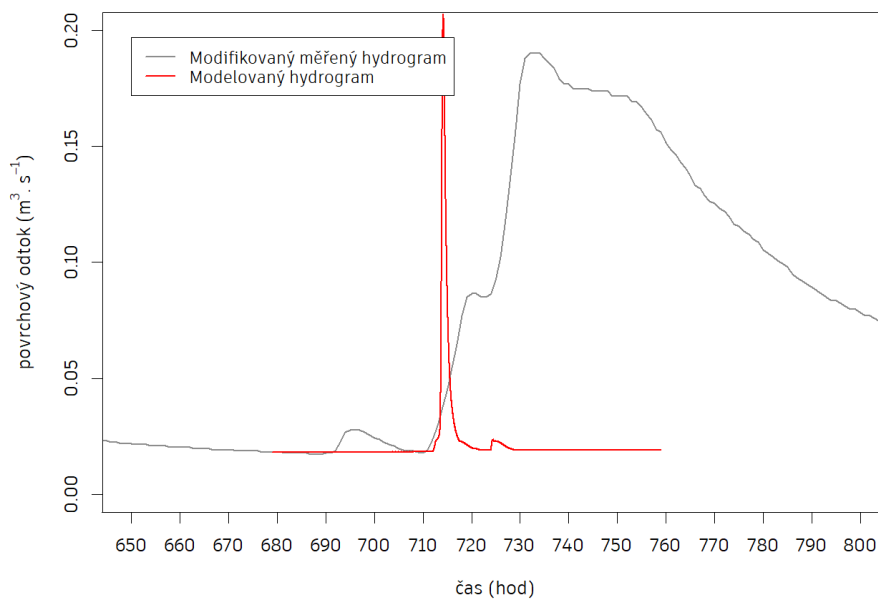
Tabulka 27: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out,scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out,modeled}$) (čím blíže 1, tím podobnější) pro výsledné SoilVeg tabulky

Podpovodí	Epizoda	SoilVeg	$Q_{out,scaled}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	$Q_{out,modeled}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Podobnost
Pstruhovec C	06082002	v014f	0,06	0,34	0,17
	11082002	v010g	0,19	0,19	1,01
Spůlka A	06082002	v012i	0,27	0,38	0,69
	11082002	v016f	1,76	1,86	0,95



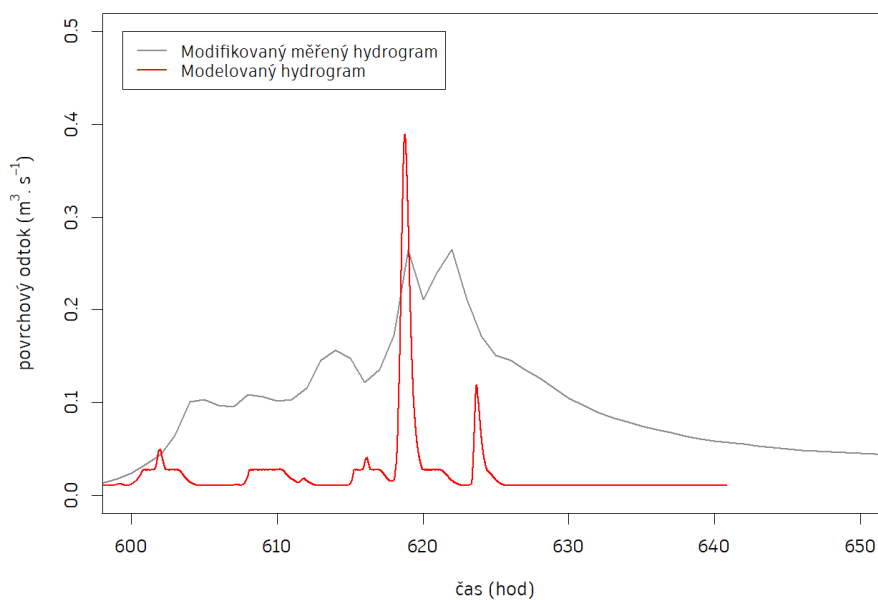
Obrázek 46: Přibližné zobrazení hydrogramů podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 06082002 výsledné SoilVeg tabulky 014f

Pstruhovec C - 11-08-2002 - SoilVeg v010g



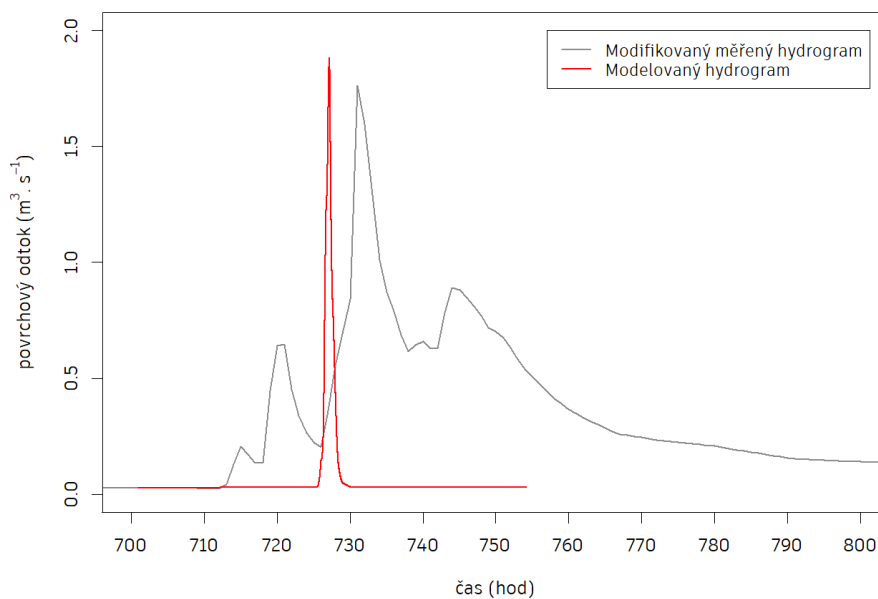
Obrázek 47: Přibližné zobrazení hydrogramů podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 11082002 výsledné SoilVeg tabulky 010g

Spůlka A - 06-08-2002 - SoilVeg v012i



Obrázek 48: Přibližné zobrazení hydrogramů podpovodí Spůlka A pro epizodu 06082002 výsledné SoilVeg tabulky 012i

Spůlka A - 11-08-2002 - SoilVeg v016a



Obrázek 49: Přibližné zobrazení hydrogramů podpovodí Spůlka A pro epizodu 11082002 výsledné SoilVeg tabulky 016a

Pro tyto výsledné kombinace vstupních parametrů charakteristik půdy a vegetace byly simulovány scénáře v duchu Proxy-basin testu, které se nacházejí v přílohách D2 a D3 spolu se SoilVeg tabulkami.

Hydrogramy vybraných generací v tabulkách 19, 21, 23 a 25 jsou k nahlédnutí v přílohách B1 až C2. Některé verze v jednotlivých generacích chybí z důvodu neočekávané chyby (pád programu) nebo chyby ve vstupních datech.

4.1.2 Výsledek Proxy-basin testu

Pro výsledné tabulky jednotlivých podpovodí byly provedeny simulace v duchu Proxy-basin testu. Zobrazení jednotlivých hydrogramů pro výsledné verze tabulek SoilVeg je na obrázcích 50, 51, 52, 53, 54, 55 a 56. V tabulce 28 se nachází porovnání z hlediska maximálního průtoku a objemu odteklé vody výsledných SoilVeg tabulek a výsledků Proxy-basin testu.

Z tabulky 28 plyne, že lepšího výsledku dosáhla SoilVeg tabulka v010g v podpovodí Spůlka A, ale pouze z hlediska odteklého objemu. V ostatních případech prohození SoilVeg tabulky předkládá horší výsledky.

Výsledkem analýzy jsou dvě SoilVeg tabulky, a to SoilVeg tabulka v010g a SoilVeg tabulka v014f.

SoilVeg tabulka v010g je vhodná použít v případě, že před simulací nedošlo k žádné významné srážko-odtokové události. SoilVeg tabulka v014f reflektuje možné předchozí nasycení povodí předešlou srážko-odtokovou událostí.

Tabulka 28: Podobnost maximálního odtoku a celkového objemu výsledných SoilVeg tabulek (Origin SoilVeg) a výsledků Proxy-basin testu (Proxy SoilVeg) ($V_{out,scaled}$ – maximální modifikovaný objem, $V_{out,modeled,origin}$ – maximální objem pro výsledné tabulky, $V_{out,modeled,proxy}$ – maximální objem Proxy-basin testu, $Q_{out,scaled}$ – maximální modifikovaný průtok, $Q_{out,modeled,origin}$ – maximální odtok pro výsledné tabulky, $Q_{out,modeled,proxy}$ – maximální odtok Proxy-basin testu)

Podpovodí	Pstruhovec C				Spůlka A			
	06082002		11082002		06082002		11082002	
Epizoda	v014f		v010g		v012i		v016a	
Origin SoilVeg	S_v012i S_v016a		S_v012i S_v016a		P_v010g P_v014f		P_v010g P_v014f	
$V_{out,scaled} (m^3)$	1371,97		14680,21		10086,70		93357,00	
$V_{out,modeled,origin} (m^3)$	1652,00		1023,00		2561,00		7550,00	
$V_{out,modeled,proxy} (m^3)$	3725,00	10,34	225,30	12,20	6517,00	737,10	45560,00	737,10
$Q_{out,scaled} (m^3.s^{-1})$	0,06		0,19		0,27		1,76	
$Q_{out,modeled,origin} (m^3.s^{-1})$	0,34		0,19		0,38		1,86	
$Q_{out,modeled,proxy} (m^3.s^{-1})$	0,74	0,00	0,01	0,00	1,07	0,04	6,24	0,04
Podobnost $V_{scaled,origin}$	1,20		0,07		0,25		0,08	
Podobnost $V_{scaled,proxy}$	2,72	0,01	0,02	0,00	0,65	0,07	0,49	0,01
Podobnost $Q_{scaled,origin}$	5,71		0,99		1,44		1,05	
Podobnost $Q_{scaled,proxy}$	12,36	0,00	0,08	0,00	4,02	0,14	3,54	0,02

V následujících tabulkách se nacházejí hodnoty charakteristik půdy a vegetace, které byly použity při tvorbě SoilVeg tabulky v010g (tabulka 29 a tabulka 30) a SoilVeg tabulky v014f (tabulka 31 a tabulka 32). Pod těmito tabulkami jsou v tabulce 33 hodnoty vstupních parametrů pro vodní toky.

Tabulka 29: Půdní charakteristiky pro SoilVeg tabulku v010g

Druh půdy	k (m.s ⁻¹)	s (m.s ^{-1/2})	b (-)	x (-)	y (-)	τ (Pa)	v (m.s ⁻¹)
Hlína	4,47E-07	2,58E-04	1,74	10,08	0,56	10,79	0,25
Písčitá hlína	8,81E-07	1,60E-04	1,79	9,20	0,46	10,66	0,25
Hlinitý písek	1,20E-06	6,50E-05	1,82	8,81	0,37	10,66	0,25
Bez půdy	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	3,00

Tabulka 30: Vegetační charakteristiky pro SoilVeg tabulku v010g

Druh vegetace	n (s.m ^{-1/3})	pi (mm)	ppl (-)	ret (mm)
Antropogenní plochy	0,01	0,00	0,00	2,00
Extenzivní zeleň	0,07	1,20	0,40	8,00
Intenzivní zeleň	0,04	1,00	0,40	8,00
Lesní porost	0,20	1,80	0,90	10,00
Orná půda	0,03	0,16	0,13	5,00
Travní porost	0,04	1,00	0,40	8,00
Vodní plocha	0,02	0,00	0,00	0,00

Tabulka 31: Půdní charakteristiky pro SoilVeg tabulku v014f

Druh půdy	k (m.s ⁻¹)	s (m.s ^{-1/2})	b (-)	x (-)	y (-)	τ (Pa)	v (m.s ⁻¹)
Písčitá hlína	8,81E-07	4,48E-04	1,79	9,20	0,46	10,66	0,25
Hlinitý písek	1,20E-06	1,82E-04	1,82	8,81	0,37	10,66	0,25
Bez půdy	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	3,00

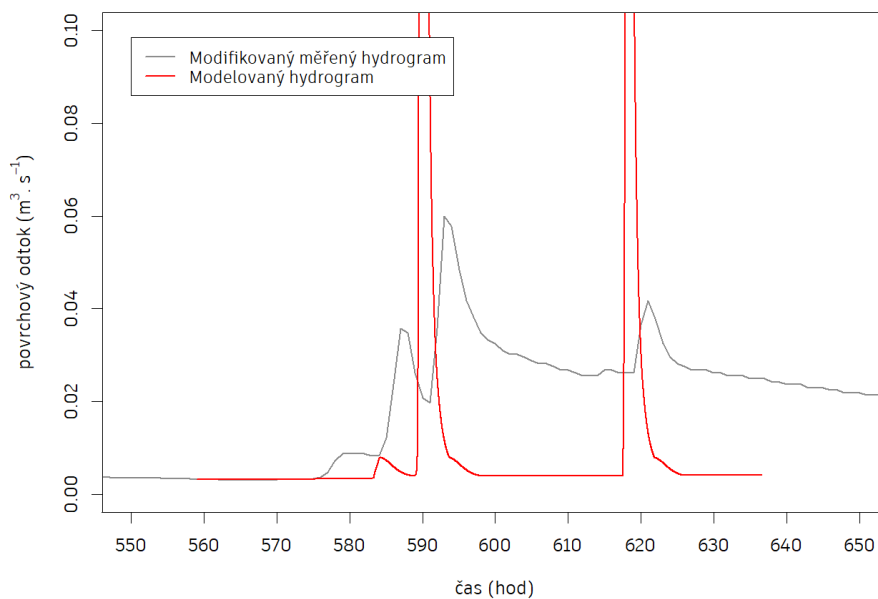
Tabulka 32: Vegetační charakteristiky pro SoilVeg tabulku v014f

Druh vegetace	n (s.m^{-1/3})	pi (mm)	ppl (-)	ret (mm)
Antropogenní plochy	0,01	0,00	0,00	2,00
Extenzivní zeleň	0,07	1,20	0,40	8,00
Intenzivní zeleň	0,04	1,00	0,40	8,00
Lesní porost	0,13	1,80	0,90	10,00
Orná půda	0,03	0,16	0,13	5,00
Travní porost	0,04	1,00	0,40	8,00
Vodní plocha	0,02	0,00	0,00	0,00

Tabulka 33: Vstupní charakteristiky vodních toků

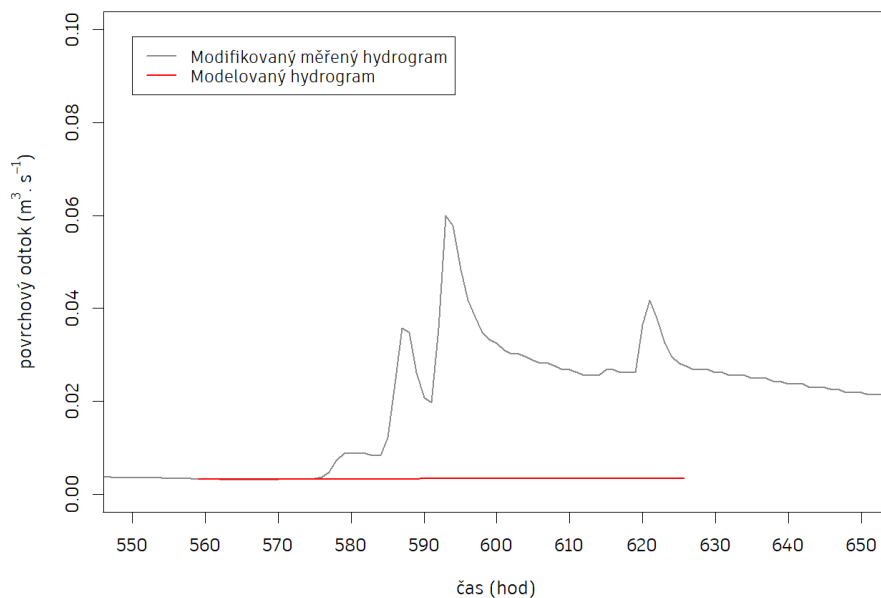
smoderp	shapetype	b (m)	m (m)	n (s.m^{-1/3})	q365 (m³.s⁻¹)
lichobeznik1	1	0,200	2,000	0,045	0,00

Pstruhovec C - 06-08-2002 - Proxy SoilVeg v012i



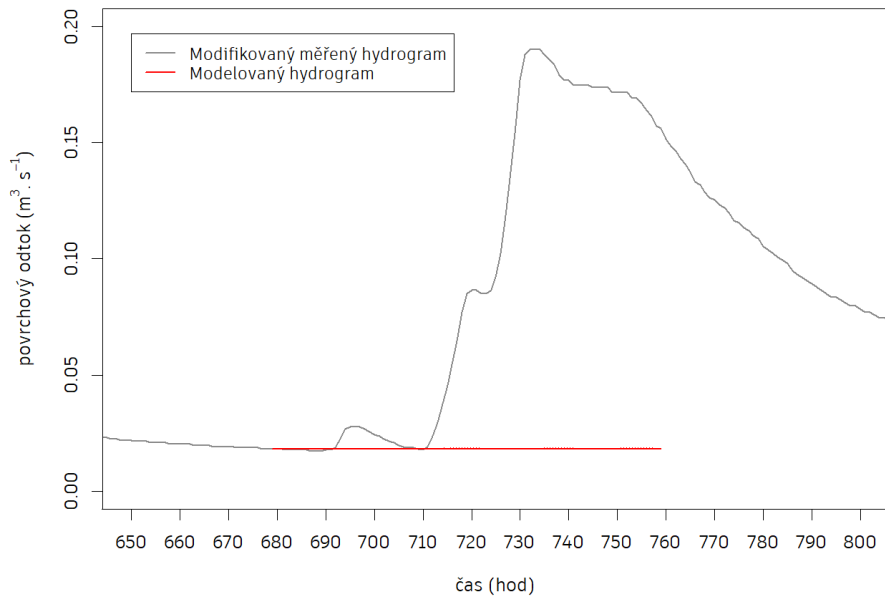
Obrázek 50: Přibližné zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 012i

Pstruhovec C - 06-08-2002 - Proxy SoilVeg v016a



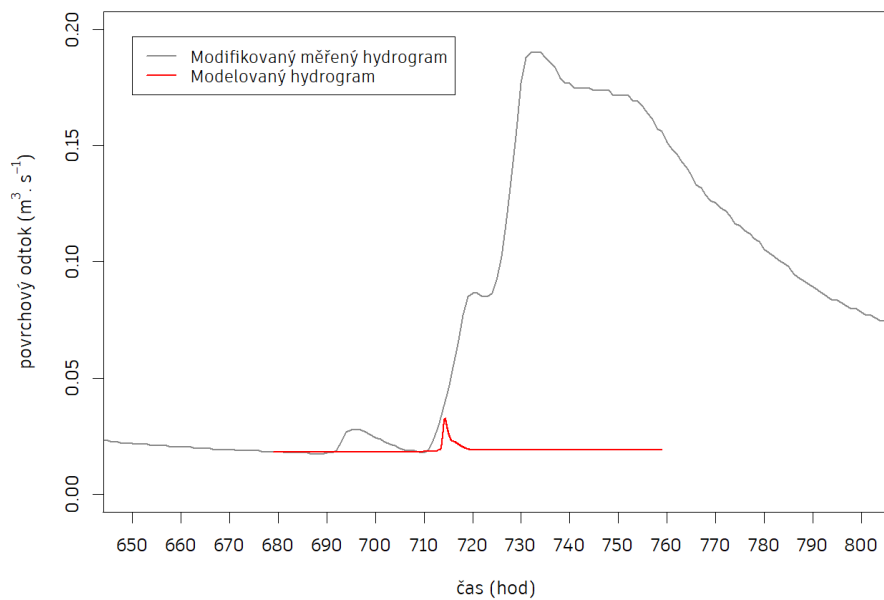
Obrázek 51: Přibližné zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 016a

Pstruhovec C - 11-08-2002 - Proxy SoilVeg v016a



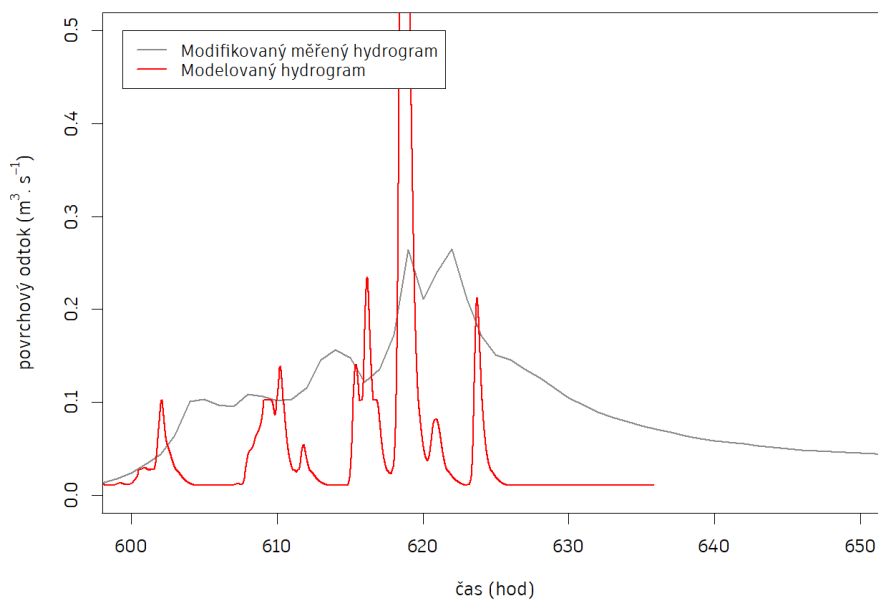
Obrázek 52: Přibližné zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 016a

Pstruhovec C - 11-08-2002 - Proxy SoilVeg v012i



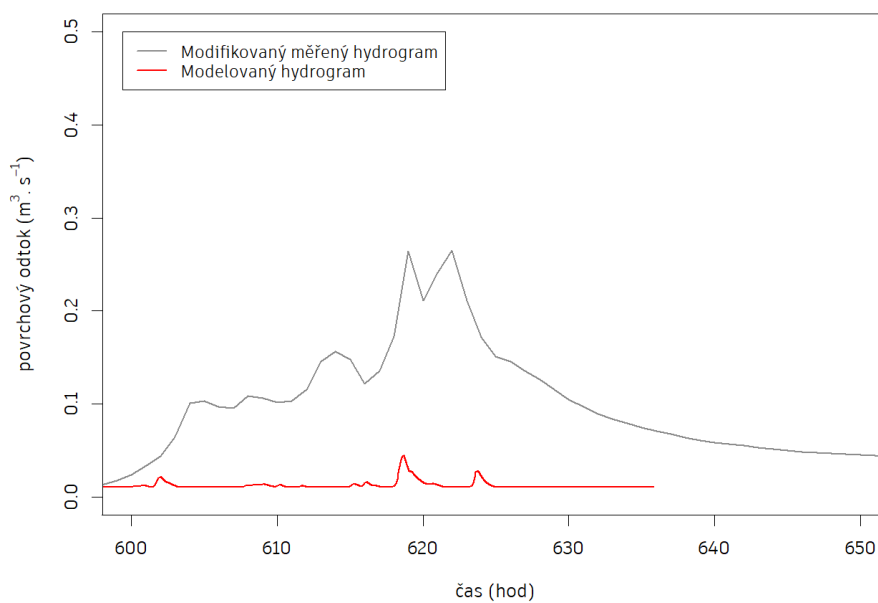
Obrázek 53: Přibližné zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 11082002 SoilVeg tabulky 012i

Spůlka A - 06-08-2002 - Proxy SoilVeg v010g



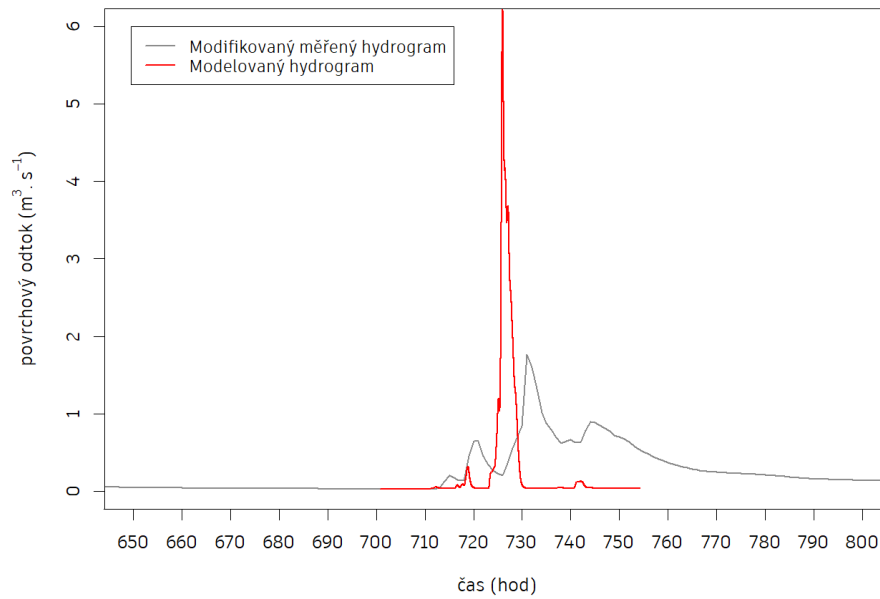
Obrázek 54: Přibližné zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Spůlka A pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 010g

Spůlka A - 06-08-2002 - Proxy SoilVeg v014f



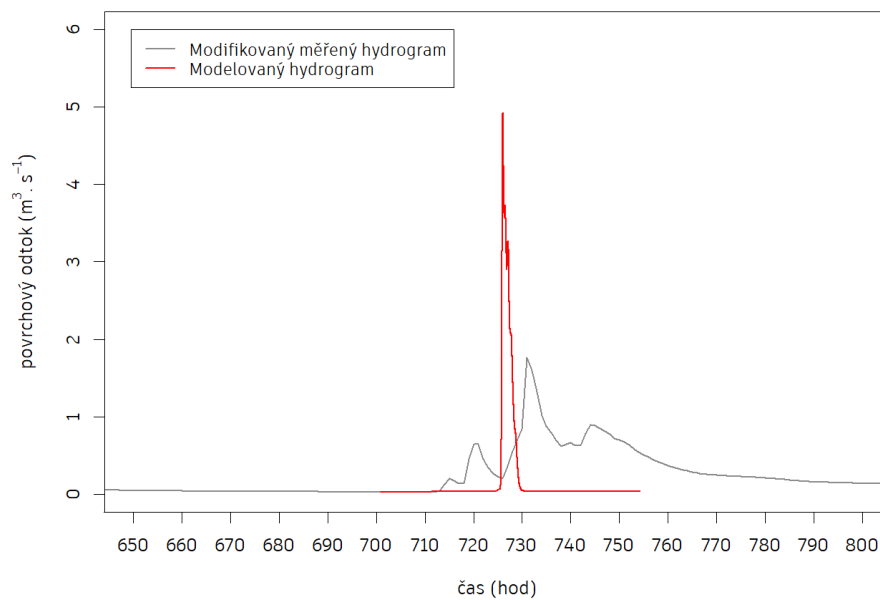
Obrázek 55: Přibližné zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Spůlka A pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 014f

Spůlka A - 11-08-2002 - Proxy SoilVeg v010g



Obrázek 56: Přibližné zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Spůlka A pro epizodu 11082002 SoilVeg tabulky 010g

Spůlka A - 11-08-2002 - Proxy SoilVeg v014f



Obrázek 57: Přibližné zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Spůlka A pro epizodu 11082002 SoilVeg tabulky 014f

5 Diskuze

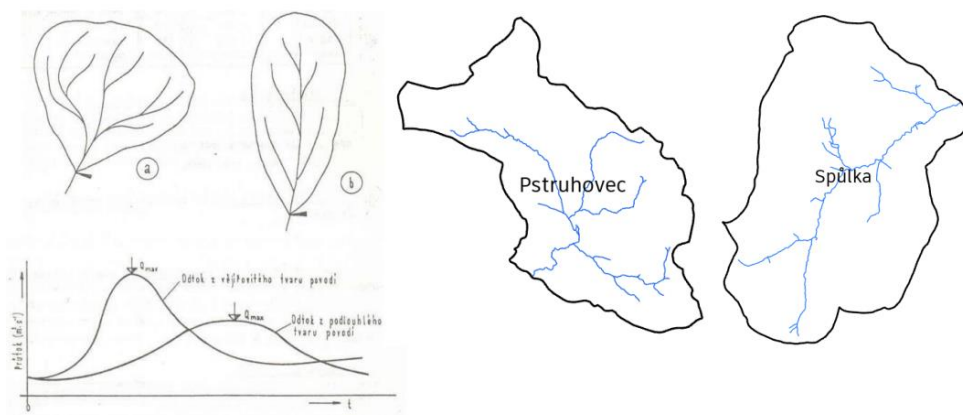
Možným řešením, jak zkrátit výpočetní čas, by bylo rozdělit podpovodí ještě na další úroveň a pokusit se jednotlivé hydrogramy sčítat mimo model SMODERP2D.

Proxy-basin test proběhl pouze pro malé množství srážkových epizod a bylo by vhodné provést více simulací pro kvalitnější vnější kalibraci a validaci. Rozdíly v celkovém průběhu měřeného a modelovaného hydrogramu mohou být zapříčiněny jemným časovým krokem modelu. Časový krok modelu se během simulace může zkrátit až na setiny sekundy, ale měřený hydrogram je v hodinovém kroku.

Model není schopen postihnout regeneraci infiltrace během simulace, což vyplývá z omezení Philipovy infiltrační rovnice. Nabízí se tedy možnost implementace Green-Amptovy infiltrační rutiny rozdělením simulovaného prostoru na vrstvy.

Maximální denní úhrny modelovaných epizod, vyjma epizodu 11082002 pro povodí Spůlka, odpovídají odhadem 10 až 20leté době opakování návrhových srážek a obdobně pro maximální 6hodinové úhrny na povodích IV. řádu (RAIN-2 2021; RAIN-1 2021). Srážková epizoda 11082002 se pohybuje okolo hranice 100letého opakování. Maximální průtoky dle měrných profilů ČHMÚ odpovídají 1 až 10letým průtokům. Výjimkou je epizoda pro 11082002 pro povodí Spůlka, jejíž odtok se nachází někde mezi 10 a 50letým průtokem (ČHMÚ-2 2021; ČHMÚ-1 2021).

Porovnávání hydrogramů člověkem je velmi subjektivní přístup a záleží na zkušenostech daného jedince a jeho porozumění problematice. Pokud ale využíváme matematické a statistické metody, je potřeba také myslet na jejich limitace a z jakých dat vycházejí. Často se jedná o empirické porovnávání, které bylo odvozeno pro větší povodí a nelze je tedy uplatnit na takto malých povodích. Například hydrologická odezva v závislosti na tvaru povodí se pro zkoumaná povodí lišila oproti empirickým poučkám (obrázek 58). Tato skutečnost vybízí k prozkoumání závislosti hydrologické odezvy na tvaru malých povodí a jejich následné kategorizaci. Odlišnosti mohou být způsobeny i dalšími vlastnostmi např. celkovou drsností povodí.



Obrázek 58: Demonstrace závislosti tvaru povodí a hydrologické odezvy (upraveno - Havlík 2019)

Budoucnost modelu SMODERP2D

Model naráží na problémy optimalizace, které je potřeba vyřešit, pokud má být využíván jako nástroj pro krajinné inženýry. Důsledkem horší optimalizace jsou velmi dlouhé výpočetní časy, které pro modelovaná povodí přesahují i týdny.

Dalším úskalím je uživatelská zkušenost. V případě problému se většinou objeví jen chybová hláška v podobě odkazu na řádek kódu, což sice podporuje otevřenost celého modelu, ale ne vždy je jasné, kde nastala chyba.

Model velmi trpí nedostatkem testování a velmi často se objevují chyby, na které nemá uživatel vliv. Například v případě implementace tvarů vodních toků je v manuálu uvedeno několik typů tvarů, ale jsou často mimo provoz. Na obrázku 59 je část kódu, která popisuje parabolu, červené řádky jsou vypnutá část kódu.

```
# Function calculates the discharge in parabola shaped reach of a stream.
#
def parabola(reach, dt):
    raise NotImplementedError('Parabola shaped stream reach has not \
        been implemented yet')
    # a = reach.b # vzd ohniska od vrcholu
    # u = 3.0 # (h=B/u B=F(a))
    # Vp = reach.g365*dt
    # hp = math.pow(Vp**3/(2*reach.length*u),0.5)
    # B = u*hp # siska hladiny # B = 3*a/(2*h)
    # reach.h = math.pow((reach.V_in_from_field + reach.vol_rest)/(2*reach.length*math.pow(hp,0.5))+math.pow(hp,1.5),0.6666) # h = (dV/2.L.hp^0,5+hp^1,5)^0,666
    # H = hp + reach.h
    # Bb = u*H
    # O = Bb+8*H*(3*Bb)
    # S = 2/3*Bb*H
    # dS = S - 2/3*B*hp
    # dV = dS*reach.length
    # R = S/O
    # reach.Q_out = S*math.pow(R,0.66666)*math.pow(reach.slope,0.5)/(reach.roughness) # Vo=Qo.dt=S.R^2/3.1^1/2/(m).dt
    # reach.V_out = reach.Q_out*dt
    # if reach.V_out > dV:
    #     reach.V_out = dV
    #     reach.Q_out = dV/dt
    # reach.vs = math.pow(R,0.66666)*math.pow(reach.slope,0.5)/(reach.roughness) #v
    # reach.vol_rest = dV - reach.V_out
    # reach.h = H
```

Obrázek 59: Část zdrojového kódu modelu SMODERP2D pro popis tvaru vodního toku typu parabola (červené řádky jsou vypnutá část kódu)

Vítaným rozšířením by byla implementace rozlišení Manningova drsnostního koeficientu zvlášť pro odtok v rýhách a povrchový odtok. Důsledkem současného nastavení je možnost vzniku rýh v lese, což může být ošetřeno přenastavením maximálního tečného napětí a maximální nevymláčí rychlosti na vyšší hodnoty.

Tímto zásahem však může dojít k situaci, že v lese i při povodňových průtocích nebude vznikat eroze.

Na druhou stranu je velkou výhodou otevřenost celého modelu (open-source), který je volně stažitelný z git-hubu <https://github.com/storm-fsv-cvut> (prosinec 2021) včetně veškerých editovatelných zdrojových kódů a je tedy možný uživatelský zásah.

6 Závěr

Z výsledků plyne, že v lesních povodích je značná redistribuce srážkové epizody mezi jednotlivé odtokové procesy. Jelikož model obsahuje popis pouze rychlého povrchového odtoku, nebylo možné dosáhnout roztažení modelovaného hydrogramu, protože k zploštění dochází vlivem proudění vody pod povrchem.

Během simulací byl model velmi citlivý na maximální srážkový úhrn, což odráží nedostatečnost Philipovy infiltrační rutiny a simulaci pouze rychlého povrchového odtoku pro použití na lesních povodích. Dále sorptivita, která výrazně ovlivňuje chování modelu, je nejistým parametrem a je potřeba provést měření pro ověření její hodnoty. Během simulací bylo zjištěno, že změnou sorptivity je možné částečně popisovat stav nasycení modelovaného povodí. V případě použití modelu SMODERP2D by měl být kladen důraz na správné uplatnění sorptivity a vhodně ji měnit, pokud chceme reflektovat předchozí nasycenost povodí. Jestliže modelujeme nasycené povodí, tak je potřeba hodnotu sorptivity zmenšit a naopak, pokud modelujeme nenasyčené povodí.

Model bylo možné nastavit tak, že pro určité srážkové epizody byl schopen postihnout kulminaci nebo objem odteklé vody s uspokojivou shodou. Konečným výsledkem jsou dvě SoilVeg tabulky, které vznikly během simulací na podpovodí Pstruhovec C (SoilVeg v010g a SoilVeg v014f) a s dostatečnou mírou přesnosti byly validovány Proxy-basin testem na podpovodí Spůlka A. SoilVeg tabulku v010g je vhodné použít v případě, že před simulací nedošlo k žádné významné srážko-odtokové události. SoilVeg tabulka v014f popisuje možné předchozí nasycení povodí předešlou srážko-odtokovou událostí. Konkrétní nastavení výsledných SoilVeg tabulek (příloha E1) se nachází v digitální podobě na přiloženém CD ve formátu .txt a .dbf (ArcGis). V případě využití tabulek je doporučena jejich další úprava dle lokálních podmínek.

Otevřenost celého modelu SMODERP2D a jeho dostupnost je velkou výhodou, o kterou může přijít vlivem implementací nových a složitějších procesů (např. difuzní vlna, Green-Amptův infiltrační model, přechod na TIN). Plně distribuované fyzikálně založené modely, které obsahují složitější popis hydrologických procesů, jsou velmi finančně a znalostně náročné. Většina těchto softwarů je dostupná jako doživotní licence nebo v dnešní době hojně využívané měsíční (roční) předplatné. Dva z těchto modelů jsou MIKE-SHE (plně integrovaný hydrologický model) a HGS (HydroGeoSphere). Oba tyto modely jsou v porovnání s SMODERP2D velmi pokročilé a popisují procesy mnohem složitějšími vztahy, ale jsou finančně velmi náročné. Měsíční předplatné pro MIKE-SHE je 13 999 Kč (Mike 2021) a HGS, včetně doporučeného doprovodného programu pro generování domény, činí 24 200 Kč (HGS 2021). Finanční nároky těchto modelů jsou jedním z důvodů potřeby vývoje dalších dostupnějších modelů.

V současné době se v České republice v praxi využívají převážně empirické modely pro určení maximálního průtoku a objemu odtoku. Použití těchto modelů ve většině případů přesahuje své původní určení. Některé modely byly upraveny pro použití v ČR, ale jejich vývoj probíhal za jiných geomorfologických a klimatických podmínek. Model SMODERP2D je od počátku vyvíjen pro použití v České republice a je testován na zemědělských záchytných plochách. Je důležité si uvědomit, že fyzikální model je pouze nástroj a může dojít k jeho nesprávnému použití. Aby byl model SMODERP2D využitelný v praxi a umožňoval popis odtoku z lesních povodí, je nutné rozšíření jeho rutin tak, aby byl schopen postihnout i další procesy.

Seznam zkratk

K_{sat}	- Nasycená hydraulická vodivost
SMODERP2D	- Simulační model povrchového odtoku a erozního procesu
SV	- Saint-Venant
DMT	- Digitální model terénu
DTM	- Digital terrain model
DEM	- Digital elevation model
DMR	- Digitální model reliéfu
ČHMÚ	- Český hydrometeorologický ústav
ZABAGED®	- Základní báze geografických dat
LPIS	- Identifikace půdy dle uživatelských vztahů
DMR4G	- Digitální model reliéfu 4. generace
TIN	- Nepravidelná trojúhelníková síť
HGS	- HydroGeoSphere
ČÚZK	- Český úřad zeměměřický a katastrální

Seznam obrázků

Obrázek 1: Velký hydrologický cyklus (upraveno - Trenberth et al. 2007)	12
Obrázek 2: Třídídimenzionální schematické zobrazení povodí, SR = srážka, ET = evapotranspirace, R = rozvodnice, H = hydrografická síť, S = zásoba, Q = odtok, GW_{vstup} = přítok podzemní vody, $GW_{výstup}$ = odtok podzemní vody (upraveno - Dingman 2015)	13
Obrázek 3: Příklad totalizátoru (napravo) a překlápávacího srážkoměru (nalevo) 14	
Obrázek 4: Laserový disdrometr OTT Parsivel ²	15
Obrázek 5: Evropský klasifikační diagram dle textury (HYPRES) – soiltexture.R....	17
Obrázek 6: Americký klasifikační diagram dle textury (USDA-NCSS) – soiltexture.R	17
Obrázek 7: Základní dělení hydrologických modelů (upraveno - Abbott a Refsgaard 1990)	22
Obrázek 8: Dělení fyzikálně založených modelů (upraveno - Knudsen et al. 1986)	23
Obrázek 9: Tok programu SMODERP2D (převzato - Kavka 2017)	42
Obrázek 10: Umístění modelovaných oblastí (červeně) v České republice	46
Obrázek 11: Vodní nádrž Pstruhovec (červen 2021 - Petr Kavka).....	52
Obrázek 12: Využití území povodí Pstruhovec z pohledu hydrologického modelování	52
Obrázek 13: Půdní druhy nacházející se na povodí Pstruhovec	53
Obrázek 14: Povodí Spůlka pohled od závěrového profilu (srpen 2021)	54
Obrázek 15: Využití území povodí Spůlka z pohledu hydrologického modelování .	54
Obrázek 16: Půdní druhy nacházející se na povodí Spůlka	55
Obrázek 17: Úsek hydrogramu v době kulminace na malé záchytné ploše DMR4G 10 x 10 m pro různé metody převzorkování.....	57
Obrázek 18: Úsek hydrogramu v době kulminace na malé záchytné ploše DMR4G 20 x 20 m pro různé metody převzorkování	57
Obrázek 19: Vstupní model terénu do SMODERP2D se zahloubenými vodními toky pro povodí Pstruhovec	58

Obrázek 20: Vstupní model terénu do SMODERP2D se zahloubenými vodními toky pro povodí Spůlka.....	59
Obrázek 21: Průměrné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti dle půdního druhu v povodí Pstruhovec	59
Obrázek 22: Průměrné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti dle půdního druhu v povodí Spůlka.....	60
Obrázek 23: Využití území použité pro modelování pro povodí Pstruhovec	60
Obrázek 24: Využití území použité pro modelování pro povodí Spůlka	61
Obrázek 25: Hydrografická síť a pozorovací body v povodí Pstruhovec	62
Obrázek 26: Hydrografická síť a pozorovací body v povodí Spůlka.....	63
Obrázek 27: Odhadovaný čas dokončení výpočtu pro dvě simulace (time to end) cca 31 dní a 53 dní.....	66
Obrázek 28: Rozdělení povodí Pstruhovec (vlevo) a Spůlka (vpravo) na podpovodí	67
Obrázek 29: Riziko vzniku odtoku v podpovodích v povodích Pstruhovec (vlevo) a Spůlka (vpravo) (upraveno - Kavka 2021)	68
Obrázek 30: Epizoda 06082002 pro podpovodí Pstruhovec C a příslušný hydrogram v závěrovém profilu celého povodí Pstruhovec	69
Obrázek 31: Epizoda 06082002 pro podpovodí Spůlka A a příslušný hydrogram v závěrovém profilu celého povodí Spůlka.....	70
Obrázek 32: Epizoda 11082002 pro podpovodí Pstruhovec C a příslušný hydrogram v závěrovém profilu celého povodí Pstruhovec	70
Obrázek 33: Epizoda 11082002 pro podpovodí Spůlka A a příslušný hydrogram v závěrovém profilu celého povodí Spůlka.....	71
Obrázek 34: Modifikovaný hydrogram povodí Pstruhovec dle dílčí plochy subpovodí C pro rok 2002.....	73
Obrázek 35: Modifikovaný hydrogram povodí Spůlka dle dílčí plochy subpovodí A pro rok 2002.....	73
Obrázek 36: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 14. generace verze f.....	75

Obrázek 37: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 14. generace verze d.....	76
Obrázek 38: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 13. generace verze e.....	76
Obrázek 39: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 13. generace verze d.....	77
Obrázek 40: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 11082002 10 generace verze g.....	78
Obrázek 41: Modelovaný hydrogram v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 11082002 8 generace verze a.....	78
Obrázek 42: Modelovaný hydrogram v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 06082002 12. generace verze h.....	83
Obrázek 43: Modelovaný hydrogram v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 06082002 13. generace verze i.....	83
Obrázek 44: Modelovaný hydrogram v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 11082002 16. generace verze a.....	84
Obrázek 45: Modelovaný hydrogram v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 11082002 6. generace verze a.....	86
Obrázek 46: Přiblížené zobrazení hydrogramů podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 06082002 výsledné SoilVeg tabulky 014f.....	87
Obrázek 47: Přiblížené zobrazení hydrogramů podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 11082002 výsledné SoilVeg tabulky 010g.....	88
Obrázek 48: Přiblížené zobrazení hydrogramů podpovodí Spůlka A pro epizodu 06082002 výsledné SoilVeg tabulky 012i.....	88
Obrázek 49: Přiblížené zobrazení hydrogramů podpovodí Spůlka A pro epizodu 11082002 výsledné SoilVeg tabulky 016a.....	89
Obrázek 50: Přiblížené zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 012i.....	93
Obrázek 51: Přiblížené zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 016a.....	93
Obrázek 52: Přiblížené zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 016a.....	94

Obrázek 53: Přiblížené zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Pstruhovec C pro epizodu 11082002 SoilVeg tabulky 012i	94
Obrázek 54: Přiblížené zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Spůlka A pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 010g	95
Obrázek 55: Přiblížené zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Spůlka A pro epizodu 06082002 SoilVeg tabulky 014f	95
Obrázek 56: Přiblížené zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Spůlka A pro epizodu 11082002 SoilVeg tabulky 010g	96
Obrázek 57: Přiblížené zobrazení hydrogramů Proxy-basin testu podpovodí Spůlka A pro epizodu 11082002 SoilVeg tabulky 014f.....	96
Obrázek 58: Demonstrace závislosti tvaru povodí a hydrologické odezvy (upraveno - Havlík 2019).....	98
Obrázek 59: Část zdrojového kódu modelu SMODERP2D pro popis tvaru vodního toku typu parabola (červené řádky jsou vypnutá část kódu).....	98

Seznam tabulek

Tabulka 1: Plochy půdních druhů v m ² v povodích	47
Tabulka 2: Korelace ploch půdních druhů v povodích (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 1)	47
Tabulka 3: Průměrné hodnoty K_{sat} (mm.h ⁻¹) pro jednotlivé půdní druhy v povodích	48
Tabulka 4: Korelace průměrných hodnot K_{sat} pro jednotlivé druhy půd v povodích (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 1)	48
Tabulka 5: Plochy využití území v m ² v povodích.....	49
Tabulka 6: Korelace ploch využití území pro jednotlivá povodí (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 1)	49
Tabulka 7: Průměrné sklony v povodích.....	50
Tabulka 8: Porovnání sklonů v povodích, poměr sklonů jednotlivých povodí (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 1)	50
Tabulka 9: Podobnost povodí, součet korelací (čím zelenější, tím podobnější a blíže hodnotě 3).....	51
Tabulka 10: Celkové úhrny dešťových srážek pro jednotlivé epizody v modelovaných povodích	61
Tabulka 11: Ukázka výchozích vstupních parametrů charakterizujících vodní toky	64
Tabulka 12: Ukázka výchozích vstupních parametrů charakterizujících půdu a vegetaci.....	64
Tabulka 13: Výchozí hodnoty pro půdní druhy nacházejících se v povodích Pstruhovec a Spůlka (barevně označeny upravované parametry).....	65
Tabulka 14: Výchozí hodnoty pro jednotlivé kategorie využití území (barevně označeny upravované parametry).....	65
Tabulka 15: Plocha dílčích podpovodí v povodí Spůlka (barevně označeno vybrané podpovodí)	67
Tabulka 16: Plocha dílčích podpovodí v povodí Pstruhovec (barevně označeno vybrané podpovodí).....	68

Tabulka 17: Přehled modelovaných epizod, jejich celkového úhrnu a maximálního úhrnu za 20 minut	69
Tabulka 18: Celkový odteklý objem (V_{out}) v závěrových profilech povodí Pstruhovec a Spůlka spolu s modifikovaným odteklým objemem ($V_{out, scaled}$) pro podpovodí C a A z vybraných událostí.....	72
Tabulka 19: Podobnost celkového objemu modifikovaného ($V_{out, scaled}$) a modelovaného hydrogramu ($V_{out, modeled}$) podpovodí Pstruhovec C pro vybrané scénáře a srážkovou epizodu 06082002 (čím blíže 1, tím podobnější).....	75
Tabulka 20: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out, scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out, modeled}$) v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002 (čím blíže 1, tím podobnější).....	77
Tabulka 21: Podobnost celkového objemu modifikovaného ($V_{out, scaled}$) a modelovaného hydrogramu ($V_{out, modeled}$) podpovodí Pstruhovec C pro vybrané scénáře a srážkovou epizodu 11082002 (čím blíže 1, tím podobnější).....	79
Tabulka 22: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out, scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out, modeled}$) v podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 11082002 (čím blíže 1, tím podobnější).....	80
Tabulka 23: Podobnost celkového objemu modifikovaného ($V_{out, scaled}$) a modelovaného hydrogramu ($V_{out, modeled}$) podpovodí Spůlka A pro vybrané scénáře a srážkovou epizodu 06082002 (čím blíže 1, tím podobnější).....	81
Tabulka 24: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out, scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out, modeled}$) v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 06082002 (čím blíže 1, tím podobnější).....	82
Tabulka 25: Podobnost celkového objemu modifikovaného ($V_{out, scaled}$) a modelovaného hydrogramu ($V_{out, modeled}$) podpovodí Spůlka A pro vybrané scénáře a srážkovou epizodu 11082002 (čím blíže 1, tím podobnější).....	85
Tabulka 26: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out, scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out, modeled}$) v podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 11082002 (čím blíže 1, tím podobnější).....	85
Tabulka 27: Porovnání měřeného modifikovaného maximálního průtoku ($Q_{out, scaled}$) a modelovaného maximálního průtoku ($Q_{out, modeled}$) (čím blíže 1, tím podobnější) pro výsledné SoilVeg tabulky	87
Tabulka 28: Podobnost maximálního odtoku a celkového objemu výsledných SoilVeg tabulek (Origin SoilVeg) a výsledků Proxy-basin testu (Proxy SoilVeg)	

($V_{out,scaled}$ – maximální modifikovaný objem, $V_{out,modeled,origin}$ – maximální objem pro výsledné tabulky, $V_{out,modeled,proxy}$ – maximální objem Proxy-basin testu, $Q_{out,scaled}$ – maximální modifikovaný průtok, $Q_{out,modeled,origin}$ – maximální odtok pro výsledné tabulky, $Q_{out,modeled,proxy}$ – maximální odtok Proxy-basin testu)	90
Tabulka 29: Půdní charakteristiky pro SoilVeg tabulku v010g	91
Tabulka 30: Vegetační charakteristiky pro SoilVeg tabulku v010g.....	91
Tabulka 31: Půdní charakteristiky pro SoilVeg tabulku v014f	91
Tabulka 32: Vegetační charakteristiky pro SoilVeg tabulku v014f	92
Tabulka 33: Vstupní charakteristiky vodních toků	92

Seznam rovnic

(1) Bilance v povodí.....	25
(2) Saint-Venantův vztah pro popis zachování hmoty (rovnice kontinuity)	26
(3) Saint-Venantův vztah pro popis pohybu	26
(4) Manningova rovnice proudění.....	27
(5) Darceyho zákon	28
(6) Rovnice kontinuity.....	28
(7) Richardsova rovnice pro 1D proudění podzemní vody.....	28
(8) Philipova infiltrační rovnice	29
(9) Základní bilance modelu SMODERP2D.....	34
(10) Detailní bilance modelu SMODERP2D	35
(11) Philipova infiltrační rovnice modelu SMODERP2D	36
(12) Rovnice plošného povrchového odtoku modelu SMODERP2D.....	37
(13) Vztah pro výpočet tečného napětí modelu SMODERP2D	38
(14) Přepočet kritické nevymílací rychlosti na výšku modelu SMODERP2D	38
(15) Výpočet kritické výšky hradiny z tečného napětí modelu SMODERP2D	38
(16) Manningova rovnice pro proudění v rýhách modelu SMODERP2D	39
(17) Celková bilance povrchového odtoku modelu SMODERP2D.....	40
(18) Manningova rovnice pro odtok hydrografickou sítí modelu SMODERP2D	41
(19) Výpočet separovaného celkového odteklého objemu	72

Seznam příloh

Příloha A - 1: Nultá simulace povodí Pstruhovec

Příloha A - 2: Nultá simulace povodí Spůlka

Příloha B - 1: 13. gen podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002

Příloha B - 2: 14. gen podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 06082002

Příloha B - 3: 10. gen podpovodí Pstruhovec C pro srážkovou epizodu 11082002

Příloha C - 1: 12. gen podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 06082002

Příloha C - 2: 16. gen podpovodí Spůlka A pro srážkovou epizodu 11082002

Příloha D - 1: Hydrogramy Proxy-basin testu

Příloha D - 2: SoilVeg tabulky Pstruhovec

Příloha D - 3: SoilVeg tabulky Spůlka

Příloha E - 1: Výsledné SoilVeg tabulky a tabulka charakteristik pro vodní toky

Seznam literárních a jiných zdrojů

ABBOTT, M. B. a J. C. REFSGAARD, 1990. Terminology, Modelling Protocol And Classification of Hydrological Model Codes.

AKAN, A. Osman, 2006. *Open channel hydraulics*.

ALLAIRE, J. J., 2009. *RStudio | Open source & professional software for data science teams - RStudio* [online] [navštíveno.2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.rstudio.com/>

ANDERSON, Mary P. a William W. WOESSNER, 1992. *The role of the postaudit in model validation*.

ANGELAKI, A., P. SIHAG, M. SAKELLARIOU-MAKRANTONAKI a C. TZIMOPOULOS, 2021. The effect of sorptivity on cumulative infiltration. *Water Science and Technology: Water Supply* [online]. **21**(2), 606–614. ISSN 16070798. Dostupné z: doi:10.2166/ws.2020.297

ARGYROKASTRITIS, I. a P. KERKIDES, 2003. *A Note to the Variable Sorptivity Infiltration Equation*.

BEGUERÍA, Santiago, Marta ANGULO-MARTÍNEZ, Leticia GASPAS a Ana NAVAS, 2015. Detachment of soil organic carbon by rainfall splash: Experimental assessment on three agricultural soils of Spain. *Geoderma* [online]. **245–246**, 21–30. ISSN 00167061. Dostupné z: doi:10.1016/j.geoderma.2015.01.010

BRANDNER, Marek, Jiří EGERMAIER a Hana KOPINCOVÁ, 2011. *Numerické modelování v hydrologii*.

BRENNER, Howard, 2005. Navier-Stokes revisited. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. **349**(1–2), 60–132. ISSN 03784371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2004.10.034

BROOKS, R. H. a A. T. COREY, 1964. *Hydraulic properties of porous media*.

BURDINE, N. T., 1953. *Relative permeability calculations from pore size distribution data* [online]. Dostupné z: <http://onepetro.org/JPT/article-pdf/5/03/71/2238194/spe-225-g.pdf/1>

CLARKE, R. T., 1973. *A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use*.

CROSSLEY, Amanda Jane, 1999. *Accurate and efficient numerical solutions for the Saint Venant equations of open channel flow*.

ČHMÚ-1, 2021. *Staré Město pod Landštejnem* [online] [navštíveno. 2021-12-31]. Dostupné z: https://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfdyn.php?seq=26597509

ČHMÚ-2, 2021. *Nový Dvůr* [online] [navštíveno. 2021-12-31]. Dostupné z: https://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfdyn.php?seq=35263642

ČÚZK-1, 2021. *ČÚZK: Geoportál* [online] [navštíveno. 2021-12-02]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(1tpjnzs3m4jhxsotmiqlrazr\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&metadataXSL=Full&side=vyskopis](https://geoportal.cuzk.cz/(S(1tpjnzs3m4jhxsotmiqlrazr))/Default.aspx?mode=TextMeta&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&metadataXSL=Full&side=vyskopis)

DE VRIES, Jacobus J. a Ian SIMMERS, 2002. Groundwater recharge: An overview of process and challenges. *Hydrogeology Journal* [online]. **10**(1), 5–17. ISSN 14312174. Dostupné z: doi:10.1007/s10040-001-0171-7

DEVÁTÝ, Jan, 2018. *Landscape classification for soil erosion models by GIS based on publicly available data*.

DEVIA, Gayathri K., B. P. GANASRI a G. S. DWARAKISH, 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia* [online]. **4**, 1001–1007. ISSN 2214241X. Dostupné z: doi:10.1016/j.aqpro.2015.02.126

DINGMAN, S. L., 2015. *Physical hydrology*. ISBN 1478611189.

EWEN, John, 2011. Hydrograph matching method for measuring model performance. *Journal of Hydrology* [online]. **408**(1–2), 178–187. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2011.07.038

Feng, Xiaoming, Yafeng Wang, Liding Chen, Bojie Fu a Gangshuan Bai, 2010. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology* [online]. **118**(3–4), 239–248. ISSN 0169555X. Dostupné z: doi:10.1016/j.geomorph.2010.01.004

FEYEN, L., R. VÁZQUEZ, K. CHRISTIAENS, O. SELS a J. FEYEN, 2000. Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*. **4**(1), 47–63.

FRASSON, Renato Prata de Moraes, Luciana Kindl DA CUNHA and Witold F. KRAJEWSKI, 2011. Assessment of the Thies optical disdrometer performance.

Atmospheric Research [online]. **101**(1–2), 237–255. ISSN 01698095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2011.02.014

GREEN, W. H. a G. A. AMPT, 1911. Studies on soil physics, 1: The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*. **4**, 1–24.

HAVLÍK, Aleš, 2019. Základy hydrologie - přednáška z předmětu VIZP k141, Fakulta stavební ČVUT v Praze Katedra hydrauliky a hydrologie [online]. [navštíveno. 2021-12-25]. Dostupné z: <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/prednasky.htm>

HGS, 2021. *Pricing – aquanty* [online] [navštíveno. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.aquanty.com/hgspricing>

CHEN, Li a Michael H. YOUNG, 2006. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces. *Water Resources Research* [online]. **42**(7). ISSN 00431397. Dostupné z: doi:10.1029/2005WR004468

JAKEMAN, A. J. a G. M. HORNBERGER, 1993. *How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-Runoff Model?*

JANEČEK, Miroslav a et al., 2012. *Ochrana zemědělské půdy před erozí.*

JENÍČEK, Michal, 2009. *Modelování průběhu extrémních povodní v kontextu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany.*

KAVKA, Petr, 2017. *SMODERP2D - uživatelská příručka.*

KAVKA, Petr, 2021. Spatial Delimitation of Small Headwater Catchments and Their Classification in Terms of Runoff Risks. *Water* [online]. **13**(23), 3458. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w13233458

KLEMEŠ, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* [online]. **31**(1), 13–24 [navštíveno. 2021-08-09]. ISSN 2150-3435. Dostupné z: doi:10.1080/02626668609491024

KNUDSEN, J., A. THOMSEN aj. CHR. REFSGAARD, 1986. *WATBAL A Semi-Distributed, Physically Based Hydrological Modelling System* [online]. Dostupné z: <http://iwaponline.com/hr/article-pdf/17/4-5/347/17330/347.pdf>

LE BISSONNAIS. Y., 2016. *Landmark Papers Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology.*

LOAGUE, Keith M. a R. Allan FREEZE, 1985. *A Comparison of Rainfall-Runoff Modeling Techniques on Small Upland Catchments*.

LOHANI, Kumar Anil, 2018. *Rainfall-Runoff Analysis and Modelling*.

MAIDMENT, David R., 1992. *Handbook of hydrology*.

MANNING, R., 1891. On the flow of water in open channels and pipes, Transactions, Institution of Civil Engineers of Ireland.

MEIN, R. G. a C. L. LARSON, 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*. **9**, 384–394.

MIKE, 2021. *Integrated Catchment Modelling - Subscription* [online] [navštíveno. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.mikepoweredbydhi.com/pricing/integrated-catchment-modelling-package>

MILLER, J. E., 1984. Basic concepts of kinematic-wave models, Technical report.

MISHRA, Surendra Kumar a Vijay P. SINGH, 2003. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands. Water Science and Technology Library. ISBN 978-90-481-6225-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-017-0147-1

MORBIDELLI, Renato, Corrado CORRADINI, Carla SALTALIPPI, Alessia FLAMMINI, Jacopo DARI and Rao S. GOVINDARAJU, 2018. *Rainfall infiltration modeling: A review* [online]. 18. December 2018. B.m.: MDPI AG. ISSN 20734441. Dostupné z: doi:10.3390/w10121873

MOUSSA, R. a C. BOCQUILLON, 1996. *Algorithms for solving the diffusive wave flood routing equation*.

MUALEM, Yechezkel, 1976. *A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media*.

NASH, J E, 1959. *Systematic Determination of Unit Hydrograph Parameters*.

NEUMANN, M. a P. KAVKA, 2015. Využití dvou metod měření rychlosti povrchového odtoku ke kalibraci srážko-odtokových modelů. *Voda a krajina* 2015. 81–89.

PATIL, Nitin Gorakh a Surendra Kumar SINGH, 2016. Pedotransfer Functions for Estimating Soil Hydraulic Properties: A Review. *Pedosphere* [online]. **26**(4), 417–430. ISSN 10020160. Dostupné z: doi:10.1016/S1002-0160(15)60054-6

PHILIP, J.-R., 1957. The theory of infiltration: 1. the infiltration equation and its solution. *Soil science*. **83**(5), 345–358.

PHILIP, J.R., 1969. Theory of Infiltration. In: [online]. p. 215–296. Dostupné z: doi:10.1016/b978-1-4831-9936-8.50010-6

RAIN-1, 2021. *Nástroj na vyčíslení návrhové srážky pro lokalitu zadanou uživatelem v podobě bodu*. [online] [navštíveno. 2021-12-31]. Dostupné z: <https://rain1.fsv.cvut.cz/webapp/d-rain-point/>

RAIN-2, 2021. *Průběhy 6hodinových návrhových srážek na povodí IV. řádu* [online] [navštíveno. 2021-12-31]. Dostupné z: <https://rain1.fsv.cvut.cz/?PROJECT=rain/rain6h/webapp>

RICHARDS, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics* [online]. **1**(5), 318–333. ISSN 01486349. Dostupné z: doi:10.1063/1.1745010

RITARI, A. a E. STROMMER, 1985. *Determining the temperature and water vapour pressure gradient of the ambient air using a reversing two-sensor system*.

SALLES, Christian, Jean POESEN and Gerard COVERS, 2000. Statistical and physical analysis of soil detachment by raindrop impact: Rain erosivity indices and threshold energy. *Water Resources Research* [online]. **36**(9), 2721–2729. ISSN 00431397. Dostupné z: doi:10.1029/2000WR900024

SHUTTLEWORTH, W. J., 1979. *Evaporation*.

SCHWAB, G. O., 1993. *Soil and water conservation engineering*.

SSSNNE, 2009. *Ksat values for New Hampshire soils* [online]. Dostupné z: <http://soils.usda.gov/technical/handbook/contents/part618ex.html>

TRENBERTH, Kevin E., Lesley SMITH, Taotao QIAN, Aiguo DAI a John FASULLO, 2007. *Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model Data* [online]. August 2007. ISSN 1525755X. Dostupné z: doi:10.1175/JHM600.1

US ARMY, 2021. *Basic Concepts of the Unit Hydrograph Model* [online] [navštíveno. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/surface-runoff/basic-concepts-of-the-unit-hydrograph-model>

VAN GENUCHTEN, Rien, 1978. *Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with new closed-form analytical model.*

VEN TE CHOW, 1959. *Open-channel hydraulics.*

VRÁNA, Karel, 2013. *Manuál k programu SMODERP* [online]. Dostupné z: http://storm.fsv.cvut.cz/smoderp/?page_id=19

WOLOCK, D. M., 2003. Base-Flow Index Grid for the Conterminous United States. Open-File Report 03-263. Washington, DC: US Geological Survey.

WOOLHISER, David A, 1973. *Hydrologic and Watershed Modeling - State of the Art.*