
SMODERP2D - UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA

SIMULAČNÍ MODEL POVRCHOVÉHO ODTOKU A EROZNÍHO PROCESU

EDITED BY

KAVKA

...

ČVUT



2017

PUBLISHER

Obsah

Obsah	ii
Seznam zkratek	iii
Úvod	1
I Popis řešení	2
1 Bilanční rovnice	3
1.1 Efektivní srážka es	4
1.2 Intenzita infiltrace inf	4
2 Povrchový odtok o^{in}, o^{out}	5
2.1 Plošný povrchový odtok	5
2.1.1 Odvozené veličiny	6
2.1.2 Určení vzniku rýhy	6
2.2 Soustředěný odtok v rýhách	7
2.3 Celková bilance	9
2.4 Poznámka nebo to dát do diskuse k článku	9
3 Odtok hydrografickou sítí	10
II Použití modelu	11
1 Instalace SMODERP2D a spištění v ArcGIS	11
1.1 Použití modelu v ArcGIS	12
2 Vstupy do modelu	14
2.1 Digitální model terénu	16
2.2 Půdní data	16
2.3 Data využití území	17
2.4 Tabulka parametrů půdy a využití území	17

2.5	Srážková data	18
2.6	Časový krok modelu a celková doba výpočtu	18
2.7	Body pro generování hydrogramů	20
2.8	Výstupní adresář	20
2.9	Hydrografická síť	20
3	Popis programu	21
3.1	Programovací jazyk Python	22
3.2	CFL podmínka - řešení nestability výpočtu	23
4	Výstupy z modelu	26
4.1	Rastrové výstupy	26
4.2	Vektorové výstupy	26
4.3	Hydrogramy	26
III	Ukázka výsledků	31
1	Porovnání metod 1D a 2D	31
Příloha		33
Seznam použitých zdrojů		36

Seznam zkratek

a	parametr rovnice plošného odtoku [?]	PS	potenciální srážka [m]
A	průtočná plocha [m^2]	O_{tot}	aktuální celkový odtok [m^3/s]
b	parametr rovnice plošného odtoku [?]	O^{in}	aktuální přítok ze sousedních buněk [m^3/s]
b	šířka dna příčného profilu hydrografické sítě [m]	o^{in}	výška vtoku za čas [m/s]
b_{rill}	šířka rýhy [m]	o_{rill}^{in}	výška vtoku v rýze za čas [m/s]
CFL	Courant-Friedrich-Lewy podmínka	O^{out}	aktuální odtok z buňky [m^3/s]
$D8$	jednosměrný odtokový algoritmus	o^{out}	výška odtoku z buňky za čas [m/s]
Δt	časový krok [s]	o_{rill}^{out}	výška odtoku v rýze za čas [m/s]
Δt_{max}	maximální časový krok [s]	$Q365$	základní průtok [m^3/s]
Δt_{mult}	multiplikátor časový krok [-]	O	omočený obvod [m]
Δx	prostorový krok [m]	I_{POT}	potencionální intercepcie
$\frac{dS}{dt}$	změna zásoby [m^3/s]	q_{rill}	průtok v rýhách [m^3/s]
ES	efektivní srážka [m^3/s]	q_{sur}	specifický plošný průtok [m^2/s]
es	intenzita efektivní srážky [m/s]	q_{stream}	průtok v otevřeném korytě [m^3/s]
l_{eff}	efektivní vrstevnice [m]	R_{rill}	hydraulický poloměr v rýze [m]
h_{crit}	výška hladiny [m]	R_{stream}	hydraulický poloměr v otevřeném korytě [m]
h^{rill}	hloubka rýhy [m]	ret	povrchová retence [m]
h^{sur}	výška hladiny na povrchu [m]	ρ	hustota [kg/m^3]
k	nasyacená hydraulická vodivost [ms^{-1}]	$rill_{ratio}$	parametr tvaru rýhy [-]
Inf	Infiltrace [m^3/s]	$ratio$	celočíselný faktor dělící časový krok při výpočtu rýhového odtoku
inf	intenzita infiltrace [m/s]	S	sorptivita půdy [$m\sqrt{s}$]
I_{tot}	aktuální celkový [m^3/s]	τ_{sur}	tečné napětí [Pa]
I	sklon [-]	τ_{crit}	kritické tečné napětí [Pa]
K	součinitel šířky (pro plošný povrchový odtok je $K = 1$)	V_{out}	objem objem odtekého [m^3]
K_s	nasyacená hydraulická vodivost [m/s]	V_{crit}	objem vody do kritické hladiny [m^3]
I_{LAI}	poměrná plocha listová [-]	v_{rill}	rychllosť proudění - rýhový odtok [m/s]
l_{rill}	délka rýhy [m]	V_{rill}	objem vody v rýze v daném elementu [m^3]
m	poměr sklonu svahů (pro obdélník je roven nule)	v_{sur}	rychllosť proudění - plošný odtok [m/s]
n	mannigfot součinitel drsnosti		

V_{tot} celkový objem vody v elementu [m^3]

v_{crit} kritická nevymíiací rychlosť [m/s]

X parametr rovnice plošného odtoku [?]

Y parametr rovnice plošného odtoku [?]

g gravitační zrychlení [m/s^2]

P plocha buňky [m^2]

Úvod

Dostává se Vám do ruky uživatelský manuál modelu SMODERP2D. Celý názvem modelu je: Simulační Model Povrchového Odtoku a Erozního Procesu. Tento 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. Model lze využít při navrhování komplexnějších soustav sběrných a odváděcích prvků nebo suchých nádrží a polderů. Jeho využití předpokládají jak současné metodiky, tak i technické normy a doporučené standardy. Z hlediska kategorizace se jedná o fyzikálně založený plně distribuovaný dvourozměrný epizodní model. Nově zavedené prostorové řešení (2D), které nahradilo dřívější profilovou verzi modelu, umožňuje komplexní řešení a náhled na celou řešenou lokalitu a přesnější popis zpravidla heterogenní morfologie zemského povrchu. Přechod modelu na 2D řešení umožňuje zejména větší dostupnost potřebných dat a zvyšující se kapacita výpočetní techniky. Vývoj modelu je podporován z veřejných prostředků a podílejí se na něm studenti a zaměstnanci Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství Fakulty stavební ČVUT v Praze. Pro snazší orientaci je manuál rozdělen na tři hlavní části. V první části jsou uvedeny výpočetové vztahy a popis jednotlivých zvolených procesů. Druhá část je věnována popisu instalace a použití modelu v prostředí ArcGIS. Dále jsou zde podrobně popsány vstupním a výstupním data a stručně popsán tok programu. Ve třetí části jsou ukázány výsledky z řečení konkrétní lokality. Případné aktualizace, vzorová data, ukázky využití a další informace o modelu SMODERP2D jsou průběžně poskytovány na webových stránkách (storm.fsv.cvut.cz/cinnost-katedry/volne-stazitelne-vysledky/smoderp/).

Část I

Popis řešení

První část manuálu popisuje jednotlivé výpočetní vztahy použité v modelu SMODERP2D. Základní odvození povrchových procesů v modelu SMODERP2D vychází z rovnice kontinuity a pohybové rovnice. Pohybová rovnice je zjednodušená pomocí teorie kinematické vlny. Tímto způsobem je tok řízen exponenciálním vztahem jehož parametry byly měřeny (viz příloha 1 tabulka 10).

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jedná se o distribuovaný epizodní hydrologicko-erozní model. Výpočet je řešen na 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 vypočteno odteklého množství v daném časovém úseku. Směr odtoku z buňky je stanoven pomocí odtokových algoritmů. Formálně se jedná o řešení metodou konečných diferencí s explicitně řešenou časovou diskretizací. V bilanční rovnici jsou řešený tři základní složky:

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

V modelu jsou definovány tři základní složky povrchového odtoku: **plošný** povrchový odtok, **soustředěný rýhový** povrchový odtok a odtok dočasnou **hydrografickou sítí** (tok otevřeným korytem). V ploše povodí jsou směry odtoků odvozeny na základě odtokových algoritmů. V místě vodních toků či úseků hydrografické sítě je veškerý tok směrován korytem.

1 Bilanční rovnice

Základním řešeným vztahem je aktuální bilance celkového zásoby

$$\frac{dS}{dt} = I_{tot} - O_{tot}, \quad (1)$$

kde $\frac{dS}{dt}$ je změna zásoby [m^3/s],
 I_{tot} je aktuální celkový [m^3/s],
 O_{tot} je aktuální celkový odtok [m^3/s].

Podle složek povrchového odtoku a dalších procesů lze I_{tot} a O_{tot} v rovnici (1) dále rozepsat na

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

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

kde O^{in} je aktuální přítok ze sousedních buněk [m^3/s],
 O^{out} je aktuální odtok z buňky [m^3/s],
 ES je efektivní srážka [m^3/s],
 Inf je Infiltrace [m^3/s].

Bilanční rovnici pro buňku i v čase t lze rozepsat jako:

$$\frac{dS}{dt} = ES_{i,t-1} + \sum_j^m O^{in}_{j,t-1} - Inf_{i,t-1} - O^{out}_{i,t-1}, \quad (2)$$

kde m jsou buňky, z nichž vtéká voda do buňky i .

V aktuální verzi modelu SMODERP2D se m řídí pomocí jednosměrného odtokového algoritmu $D8$. Model SMODERP2D řeší časový krok explicitně, veličiny v čase $t-1$ na pravé straně rovnice (2) jsou při řešení času t známé.

Při samotném řešení se v modelu SMODERP2D operuje s veličinami ve výškových jednotkách (m) a intenzitách (m/s). Pokud celou rovnici (2) vydělíme velikostí buňky P a vyjádříme časovou derivaci jako diferenci ($\frac{dh^{sur}}{dt} \approx \frac{h^{sur}_{i,t} - h^{sur}_{i,t-1}}{\Delta t}$), vypadá rovnice (2) následovně:

$$h^{sur}_{i,t} = h^{sur}_{i,t-1} + \Delta t \left(es_{i,t-1} + \sum_j^m o^{in}_{j,t-1} - inf_{i,t-1} - o^{out}_{i,t-1} \right), \quad (3)$$

kde h^{sur} je výška hladiny na povrchu [m],
 es je intenzita efektivní srážky [m/s],
 inf je intenzita infiltrace [m/s],
 o^{in} je výška vtoku za čas [m/s],
 o^{out} je výška odtoku z buňky za čas [m/s].

V následujícím textu jsou popsány jednotlivé členy za pravé straně rovnice (3).

1.1 Efektivní srážka es

(@ @ @ potenciální intercepce jednoty ???)

Srážka je příčinou celého erozního procesu. Vzhledem k tomu, že je SMODERP2D epizodní model zadává se srážka v podobě konkrétní nebo návrhové srážky, která začíná s prvním časovým krokem výpočtu. Model počítá s vlivem intercepce, tedy že určitá část srážky bude zachycena rostlinami díky jejich potenciální intercepci I_{POT} . Míra zachycení v každém časovém kroku (Δt) výpočtu je definována pomocí poměrné plochy listové I_{LAI} (například (@ @ @ citace)).

Označme množství srážky, které dopadá na povrch půdy i rostliny během Δt potenciální srážkou PS . Část PS , která zůstane na povrchu rostliny během časovém kroku Δt , se dá vyjádřit jako násobek srážky PS a I_{LAI} ,

$$PS \cdot I_{LAI}.$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že množství, které propadne povrchem listů, je

$$PS(1 - I_{LAI}).$$

Potenciální intercepce I_{POT} se začne plnit na začátku srážkové epizody. Výsledná intenzita efektivní srážky v čase t je pak určena jako

$$es_t = \begin{cases} PS_t(1 - I_{LAI}), & \text{pokud } \sum_{\bar{t}=t_{init}}^t (PS_{\bar{t}} \cdot I_{LAI}) \leq I_{POT} \\ PS_t, & \text{jinak} \end{cases}$$

kde PS je potenciální srážka [m],
 I_{LAI} je poměrná plocha listová [−],
 I_{POT} je potencionální intercepce a
 $\sum_{\bar{t}=t_{init}}^t (PS_{\bar{t}} \cdot I_{LAI})$ vyjadřuje množství srážky, které propadlo povrchem listů plodiny od počátečního času t_{init} do času t .

1.2 Intenzita infiltrace inf

V modelu je použita infiltrace podle Philipa (Philip 1957) v následujícím tvaru (pro příslušnou buňku i):

$$inf = \frac{1}{2} St^{-1/2} + K_s. \quad (4)$$

kde inf je intenzita infiltrace [m/s],
 S je sorptivita půdy [$m\sqrt{s}$] a
 K_s je nasycená hydraulická vodivost [m/s].

Philipova infiltraci rovnice byla zvolena především z důvodu relativně malého počtu vstupních parametrů. Tato zjednodušená rovnice má dva členy: nasycenou hydraulickou

vodivost K_s a sorptivita S . Autoři modelu si byli vědomi omezení použití Philipovy rovnice vyplývající z podmínek, za kterých byla odvozena. Možné odchylky způsobené volbou této rovnice odpovídají odchylkám v heterogenitě půdy a kvalitě ostatních vstupů, na jejichž základě model pracuje. Čas t ve vztahu (4) 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.

2 Povrchový odtok o^{in} , o^{out}

V modelu jsou uvažovány dvě složky povrchového odtoku: **plošný povrchový odtok** a **soustředěný odtok v rýhách**. Soustředěný odtok v rýhách je ve SMODERP2D řešen explicitně. Vznik soustředěného odtoku je podmíněn překročením limitní rychlosti, resp. limitního tečného napětí (viz kapitola 2.2).

2.1 Plošný povrchový odtok

Rovnice plošného odtoku vychází z použití teorie kinematické vlny při řešení pohybové rovnice Saint-Venantových (SV) rovnic. Použití toho přístupu předpokládá mělké povrchové proudění po dlouhém plochém¹ povrchu. Za těchto podmínek lze u pohybové rovnice SV rovnic zanedbat lokální změny kinetické a potenciální energie a lokální zrychlení. Při tomto zjednodušení lze řešit povrchový tok jako ustálené proudění (Miller 1984). Plošný povrchový odtok pak lze řešit pomocí obecného mocninného vztahu (**@@@ v anglické literature tomu rikaj power law, tak nevím jak česky**) jako

$$q_{sur} = ah^{sur^b}, \quad (5)$$

kde q_{sur} je specifický plošný průtok [m^2/s],
 a je parametr rovnice plošného odtoku [?] a
 b je parametr rovnice plošného odtoku [?].

Parametr a je řešený podle vztahu:

$$a = XI^Y,$$

kde X je parametr rovnice plošného odtoku [?],
 Y je parametr rovnice plošného odtoku [?] a
 I je sklon [-].

Parametry a a b respektive X a Y jsou odvozeny na základě měření (Neumann & Kavka 2015), jejich hodnoty pro různé půdní typy jsou ukázány v tabulce 10 v příloze 1. 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 na povrchu půdy pokryt vegetací, je třeba provést korekci pomocí Manningova součinitele drsnosti

¹Plochém ve smyslu ne příliš zakřiveném. Nejedná se tedy o hladký povrch.

pro povrchoví odtok. Parametr a je pak definován jako

$$a = \frac{XIY}{100n},$$

kde n je množství součinitel drsnosti.

Odteklá resp. přiteklá výška je pak dopočítána jako

$$o^{out} (\text{resp. } o^{in}) = \frac{l_{eff}}{P} q_{sur}$$

kde l_{eff} je efektivní vrstevnice [m] a
 P je plocha buňky [m^2].

Efektivní vrstevnice l_{eff} je největší délka v buňce rastru kolmou na směr odtoku. Jedná se tedy o délku průmětu průtočné plochy na danou buňku.

2.1.1 Odvozené veličiny

Z vypočteného specifického průtoku, velikosti řešeného elementu a délky časového kroku lze dopočítat objem odtoku:

$$V_{out} = \Delta t l_{eff} q_{sur},$$

kde V_{out} je objem objem odtokového [m^3].

Pro posouzení erozního ohrožení a pro určení vzniku rýhy je v každé buňce vypočítávána rychlosť proudění a tečné napětí. Za předpokladu, že se jedná o proudění vody o malé hloubce, lze rychlosť proudění odvodit ze specifického průtoku a výšky hladiny:

$$v_{sur} = \frac{q_{sur}}{h^{sur}}, \quad (6)$$

kde v_{sur} je rychlosť proudění - plošný odtok [m/s].

2.1.2 Určení vzniku rýhy

Povrchový odtok způsobuje tření na povrch půdy. Za určitých podmínek je soudržnost půdy nižší než tečné napětí proudící vody na jejím povrchu. Je několik způsobů jak tento moment určit (@@@ citace). V modelu SMODERP2D jsou implementovány dva způsoby odvození: překročením kritického tečného napětí a překročením nevymíiací rychlosti. Z obou odvození je určena kritická výška hladiny h_{crit} povrchového odtoku po jejímž překročení začne vznikat rýha.

Při vzniku rýhy dochází k velkému odnosu půdy, proto by umístění prvků protierozní ochrany mělo být navrhнуто tak, aby k vniku rýhy docházelo co nejméně. Kritické hodnoty nevymíiacích rychlosť a tečných napětí jsou pro jednotlivé půdní druhy a druh vegetace (@@@ v tabulce na kterou to ma odkazovat je to jen pro pudni typ ne pro vegetaci) převzaty z předchozích verzí modelu (podle Dýrová E. (1984)) a jsou uvedeny v tabulce.

(@{@ na toto tema jsem nasel v adr tab jen jednu tabulku, tam je citovan vrana, ale zase není v zadnym *.bib) V literatuře se setkáme i s odlišnými hodnotami. Například M. A. Velikanov stanovil kritickou nevymílací rychlosť pro pudy 0.24 m/s (@{@ divna citace typka s jinym jmenem) (Cabík 1963), což je hodnota nižší, než kterou stanovila E. Dýrová.

Vztah pro výpočet tečného napětí je v modelu SMODERP2D definován podle Schwab (1993) jako

$$\tau_{sur} = \rho g h^{sur} I K, \quad (7)$$

kde τ_{sur} je tečné napětí [Pa],

ρ je hustota [kg/m^3],

g je gravitační zrychlení [m/s^2],

I je sklon [–] a

K je součinitel šířky (pro plošný povrchový odtok je $K = 1$).

Přepočet kritické nevymílací rychlosť na kritickou výšku hladiny h_{crit} je odvozen z rovnice (5) a (6) jako

$$h_{crit} = \frac{100 n v_{crit}^{1/(b-1)}}{a}, \quad (8)$$

kde h_{crit} je výška hladiny [m] a

v_{crit} je kritická nevymílací rychlosť [m/s].

Výpočet kritické výšky hladiny z tečného napětí je jednoduše odvozen z vzorce (7) jako

$$h_{crit} = \frac{\tau_{crit}}{\rho g I}, \quad (9)$$

kde τ_{crit} je kritické tečné napětí [Pa].

Pro každou buňku výpočetní oblasti je spočítáno h_{crit} pomocí obou odvození (8) a (9). Podmínka v modelu následné vybere menší z hodnot, která je pak při výpočtu použita jako kritérium vzniku rýhy (@{@ to chce asi strucne dovyšvetlit proc bere tu mensi a doplnit literaturu) . kritická nevymílací rychlosť a kritické tečné napětí jsou vstupní parametry modelu. Návrh hodnot pro model SMODERP2D je ukázán v tabulce 11 v příloze 1.

2.2 Soustředěný odtok v rýhách

Výpočet soustředěného odtoku v rýhách implementovaný v modelu SMODERP vychází z několika předpokladů:

- Zavedení stejných zjednodušujících předpokladů výpočtu proudění jako v případě výpočtu plošného povrchového odtoku (teorie kinematické vlny). Předpokladem je, že se tok ve všech časech a ve všech buňkách vždy dostane do ustáleného, tady že se vždy jedná o ustálené proudění. Při ustáleném proudění se předpokládá sklon (@{@ nebo to byt sklon treći síly?}) dna I paralelní se sklonem hladiny vody v

rýze a neměnná drsnost v celé délce buňky. Průtok v rýze je tedy vyjádřen pomocí Chézyho rovnice v Mannigově tvaru:

$$q_{rill} = v_{rill} A = A \frac{1}{n} R_{rill}^{2/3} I^{1/2}, \quad (10)$$

kde q_{rill} je průtok v rýhách [m^3/s],
 v_{rill} je rychlosť proudění - rýhový odtok [m/s],
 A je průtočná plocha [m^2],
 n je manningův součinitel drsnosti a
 R_{rill} je hydraulický poloměr v rýze [m].

2. Soustředěný odtok vzniká v buňkách, kde dojde k překročení kritické výšky hladiny h_{crit} (viz 2.1.2). Tato hodnota je určena pro každou buňku zvlášť na základě hodnot kritického tečného napětí nebo kritické nevymílací rychlosti podle vzorců (8) a (9).
3. V každé buňce výpočetní oblasti může vzniknout pouze jedna přímá rýha bez ohledu na velikost kroku prostorové diskretizace.
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] a
 h_{crit} je výška hladiny [m].

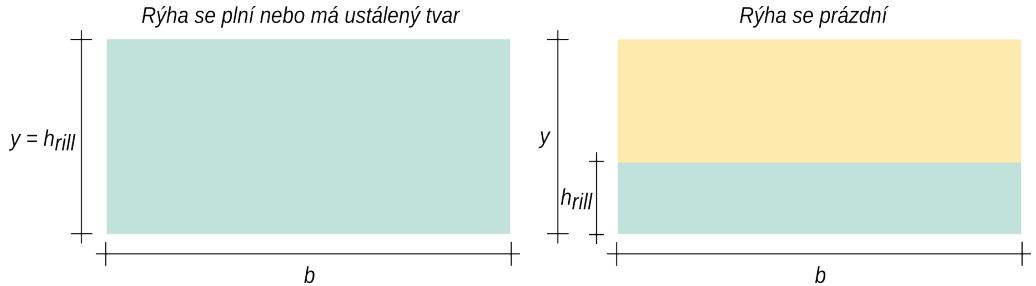
5. Tvar přísného profilu rýhy je reprezentován obdélníkem, s pevným poměrem stran $rill_{ratio}$ =výška/šířka rýhy. Velikost rýhy se zvětšuje pokud je nadkritické množství V_{rill} větší než objem samotné rýhy, tak aby byl splněn předpoklad v předchozím bodě. Při zvětšované rýhy se tedy výška rýhy rovná výše vodní hladiny v rýze (vlevo na obrázku 1). Pokud začne být nadkritické množství V_{rill} menší než je objem rýhy a dochází k prázdnění rýhy. Velikost rýhy zůstává konstantní a rýze dochází pouze k poklesu hladiny (vpravo na obrázku 1). Hydraulický poloměr rýhy, která se zvětšuje nebo je konstantní, lze určit podle následujícího vztahu:

$$R_{rill} = \frac{A}{O} = \frac{h^{rill} b_{rill}}{b_{rill} + 2h^{rill}} \quad \text{kde } b_{rill} = \frac{h_{crit}}{rill_{ratio}}$$

kde b_{rill} je šířka rýhy [m],
 O je omočený obvod [m] a
 $rill_{ratio}$ je parametr tvaru rýhy [-].

Hydraulický poloměr rýhy, ve které výška hladina oproti výšce rýhy klesá, se určuje jako

$$R_{rill} = \frac{A}{O} = \frac{h^{rill} b_{rill}}{b_{rill} + 2h^{rill}} \quad \text{kde } b_{rill} = \frac{y}{rill_{ratio}}.$$



Obrázek 1: Příčný řez rýhy a výška vodní hladiny při plnění rýhy či ustálení proudění (napravo), tvar rýhy při jejím prázdnění (nalevo)

Výška odtoku (resp. vtoku) z rýhy je vypočtena podle vzorce

$$o_{rill}^{in} (\text{resp. } o_{rill}^{out}) = \frac{q_{rill}}{b_{rill} l_{rill}}.$$

kde l_{rill} je délka rýhy [m].

2.3 Celková bilance

Pokud dojde k vzniku rýh, je rovnice celkové bilance (3) rozšířena o členy vyjadřující soustředěný rýhový odtok a přítok z rýh sousedních buněk takto

$$h_{sur,i,t}^{sur} = h_{sur,i,t-1}^{sur} + \Delta t \left(es_{i,t-1} + \sum_j^m o_{rill,j,t-1}^{in} - inf_{i,t-1} - o_{rill,i,t-1}^{out} + \sum_k^n o_{rill,k,t-1}^{in} - o_{rill,i,t-1}^{out} \right), \quad (11)$$

kde o_{rill}^{in} je výška vtoku v rýze za čas [m/s] a
 o_{rill}^{out} je výška odtoku v rýze za čas [m/s].

n jsou buňky, odkud vtéká voda z rýh do buňky i .
 n může být prázdná množina pokud není překročena kritická výška nebo no může rovnat m z rovnice 3 pokud je použit odtokový algoritmus D8 a na všech sousedních buňkách buňky i je překročena kritická výška hladiny.

2.4 Poznámka nebo to dát do diskuse k článku

- Výsledný tvar blíží Maningově rovnici

$$Q = \frac{A}{1} n R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (12)$$

- Přesněji pro tvar této rovnice pro plošný odtok, kdy se předpokládá proudění vody o malé hloubce a tvar koryta je nahrazen jeho šírkou. Rovnice má pak tvar:

$$Q = \frac{1}{n} h^{2/3} S^{1/2} \quad (13)$$

- Že může být jiná rce infiltrace.
- tvar rýhy - výzkum funkce?
- jen jedna přímá rýha

3 Odtok hydrografickou sítí

SMODERP2D je zamýšlen také jako nástroj pro navrhování 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. Nejčastěji se jedná o příkopy a průlehy, které mají odváděcí a často protierozní funkci. Všechny prvky (síť vodních toků, příkopy, průlehy, atp.) jsou zadávány v rámci jednoho shapefile. Každý jednotlivý úsek je zadán jako konkrétní linie (feature). Výpočetně model pracuje v rastrové síti. V případě, že se na dané buňce rastru vyskytuje úsek hydrografické sítě, je voda dále odváděna tímto úsekem ve směru jeho sklonu bez ohledu na směr plošného či soustředěného odtoku.

Proudění v těchto otevřených korytech je řešeno Mannigovou rovnicí ve tvaru:

$$q_{stream} = A \frac{1}{n} R_{stream}^{2/3} I^{1/2}, \quad (14)$$

kde q_{stream} je průtok v otevřeném korytě [m^3/s],
 A je průtočná plocha [m^2],
 n je manningův součinitel drsnosti a
 R_{stream} je hydraulický poloměr v otevřeném korytě [m].

Pro vlastní výpočet je třeba zadat typ a příčný profil daného prvku. Délka úseku a sklonu 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). Vzorce pro výpočet odtoku různými geometriemi jsou ukázány v příloze 1 v tabulce na obrázku 12. Model SMODERP2D je schopen řešit odtok liniovými prvky, které se zapojí do odtoku až při tvorbě povrchového odtoku i odtok vodními toky se základním odtokem. Princip zadávání geometrie úseků hydrografické sítě je popsán v částí II v kapitole 2.9 tohoto manuálu.

Objem vody, který teže mezi jednolivými úsekami hydrografické sítě je určen jednoduše jako

$$V_{stream,out} = \Delta t q_{stream}.$$

(@ @ @ doplnit text jak probíhá vlastní výpočet - tzn jak na sebe navazují jednotlivé úseky . a dát semka asi i nějaké obrázky, jak to funguje. Je to v nějaké DP tuším (to najdu PK))

Část II

Použití modelu

Model SMODERP2D je napsán v programovacím jazyce Python. Příprava dat a samotný výpočet v časové smyčce jsou od sebe oddělny. Příprava dat využívá v současné době nástroje z knihoven ArcGIS, což byl jeden z primárních důvodů volby programovacího jazyka Python, který je pro prostředí ArcGIS nativním skriptovacím jazykem. Proces samotného výpočtu již využívá pouze standardní knihovny Python, jako je knihovna `numpy`, nebo `math`, atd. Následující text je rozdělen do tří částí, které popisují vstupní data (kapitola 2), tok programu (kapitola 3) a výstupy z modelu (kapitola 4).

1 Instalace SMODERP2D a spuštění v ArcGIS

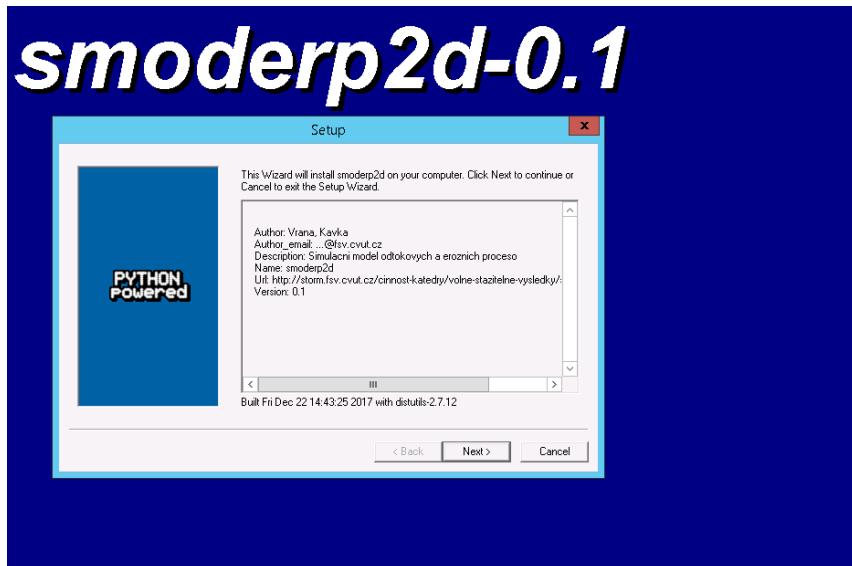
Uživatel má několik možností jak používat model SMODERP2D. Pomocí instalačního souboru lze nainstalovat SMODERP2D jako běžný Python balíček. Model SMODERP2D je rovněž poskytovaný jako zdrojový kód, kde se provádí instalaci běžným způsobem. Je rovněž možné spouštět balíček přímo bez instalace. V této části manuálu je popsán první a nejjednodušší způsob, instalace pomocí instalačního souboru.

Model SMODERP2D je distribuován pod GPLv3² licencí. Samotný kód modelu SMODERP2D je vydáván na stránkách Katedra ([@{@ katedra nebo Katedra](#)) hydromeliorací a krajinného inženýrství Fakulty stavební ČVUT v Praze ... ([@{@ odkaz](#)) . Vývojové verze modelu jsou poskytovány na stránkách ... ([@{@ odkaz, github - asi zalozit github instituce at to není na uctu jerabekjak](#)) stejně jako zdrojový kód tohoto manuálu.

Spustitelný instalační soubor pro operační systém Windows lze stáhnout na odkazu... ([@{@ dopln](#)) . Po spuštění toto souboru se spustí průvodce k instalaci standardního balíčku Python (úvodní obrazovka průvodce je ukázána na obrázku 2). Po ukončení instalace lze model SMODERP2D importovat do Python skriptu příkazem `import smoderp2d.main`.

Před použitím modelu se doporučuje provést test, který ověří, zda má uživatel nainstalované ostatní balíčky, které model SMODERP2D používá. Testovací skript je spolu s

²Více informací na: gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html



Obrázek 2: Úvodní obrazovka při instalaci malíčku SMODERP2D

testovacími daty ke stažení na adrese ... ([@@@ adresa dopln](#)) v adresáři `tests`. Testovací skript s názvem `importrun.py` uložte do společné složky s testovacími daty `test-data`. Po spuštění skripty se otevře okno terminálu příkazové řádky. Pokud instalace malíčku SMODERP2D neproběhla nebo proběhla chybně, vypíše testovací skript hlášení ukázané na obrázku 3. Pokud nainstalované jiné nezbytné může se chybové hlášení lišit. Pokud například chybí balíček `numpy` vypíše se na třetí řádek hlášení: `No module named numpy`. V takovém případě je nutné chybějící balíčky doinstalovat běžným způsobem. Pokud proběhne testovací běh modelu SMODERP2D bezchybně, proběhne v okně terminálu hlášení ukázané na obrázku 4. Výstupní soubory jsou pak uložený do složky `test-out` v adresáři kde je uložen skript `importrun.py`. V tento moment je model SMODERP2D i nezbytné malíčky zdárňě nainstalovaný a jsou připraveny k použití.

1.1 Použití modelu v ArcGIS

Současná verze modelu SMODERP2D využívá k přípravě vstupních dat výhradně software ArcGIS a Python malíček `arcpy`. Proto je potřeba vytvořit spouštěcí skript, který načte a spustí model SMODERP2D. Takový skript může obsahovat následující příkazy:

```
import smoderp2d.main as sm
```

```
importing smoderp2d ...
Unexpected error: <type 'exceptions.ImportError'>
No module named smoderp2d.main
press enter ...
```

Obrázek 3: Hlášení při chybné instalaci malíčku modelu SMODERP2D

```

importing smoderp2d ...
initiating computation ...
Creating of the output directory: test-out
Creating of the temp: test-out\temp
DMT preparation...
Clip of the source data by intersect
!!! Points at coordinates [x,y]:
[1.5451226538439402, 8.254702156499043]
[1.608297884877964, 5.736637309688466]
are outside the computation domain and will be ignored !!!
Computing critical level
Data preparation has been finished
Surface:
    Rill flow:
        ON
    Kinematic approach
    D8 flow algorithm
Stream:
    OFF
Subsurface:
    OFF
Save cumulative and maximum values from:
    Surface
-----
Corrected time step is 0.2 [s]
Hydrographs files has been created...
Saving data...
-----
Total computing time: 11.45099999752

press enter ...

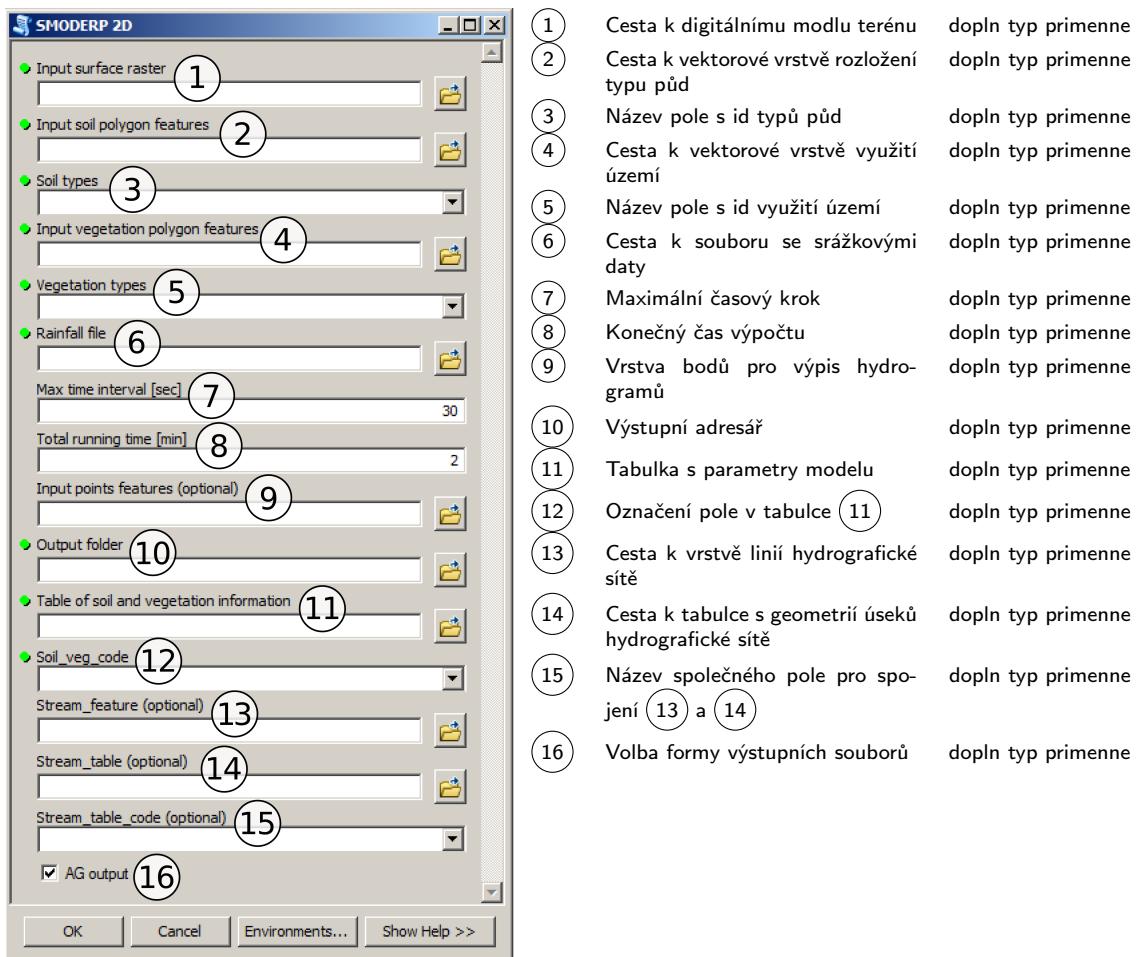
```

Obrázek 4: Zdárný průběh testovacího skriptu modelu

`sm.run()`

`import smoderp2d.main as sm` načte balíček modelu SMODERP2D. Spuštěním metody `sm.run()` je spuštěn samotný model.

Pro použití modelu v prostředí ArcGIS je třeba vytvořit ArcGIS toolbox, kde je nastavený jako zdrojový soubor uložený spouštěcí skript. Další krok je nastavení parametrů ArcGIS toolbox odkud se načítají vstupní parametry do modelu. Pořadí zadávaných hodnot je **nutné dodržet!** Ukázka ArcGIS toolbox a vysvětlení parametrů je ukázáno na obrázku ???. Připravený ArcGIS toolbox lze sáhnout na stránce ... ([@#@ odkaz](#)) . Detailnější popis vstupních hodnot je v kapitole 2.



Obrázek 5: ArcGIS toolbox a vysvětlenými parametry

2 Vstupy do 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 dočasně hydrografické sítě. Tyto data jsou zadávána ve třech formátech: rastrovém, vektorovém a textovém. Do modelu vstupují informace o topografii řešeného území, informace o typech půd a vegetaci, informace o srážce atd. Základní formát vektorových dat je formát shapefile. Tento vektorový formát byl vytvořen firmou ESRI, ale je zpracovatelný i jinými GIS softwary. Parametry modelu jsou uloženy v atributové tabulce pod specifickým názvem pole. V následujícím textu jsou popsány náležitosti vstupních dat. Přehled vstupů do modelu je ukázán v tabulce 1.

Tabulka 1: Tabulka s přehledem vstupních dat modelu

Název	Typ dat	Povinný / volitelný	Poznámka	Více v kapitulo
digitální model terénu	raster	Povinný	Tento vrstvou se řídí i prostorová diskretilizace.	2.1
prostorové rozložení půd	vektor - polygony	Povinný	V atributové tabulce identifikátor typu půdy.	2.2
prostorové rozložení využití území	vektor- polygony	Povinný	V atributové tabulce identifikátor využití území.	2.3 a 2.4
sražková data	.txt soubor	Povinný	Kumulativně zadaná sražka.	2.5
maximální časový krok	reálné číslo	Povinný	Model mění délku časového podle odtokových podmínek; doporučuje se 30 - 60 sekund.	2.6
výstupní adresář	text	Povinný	Adresář k uložení výsledků (při spuštění výpočtu se obsah adresáře vymaže!).	2.8
bodové výstupy hydrogramů	vektor - body	Volitelný	Body pro výpis výsledků.	2.7
parametry půdy a využití území	tabulka	Povinný	Tabulka parametrů půdy a využití území.	2.4
hydrografická síť	vektor - linie	Volitelný	Názvy sloupců mají definované označení. Hodnoty se spojí s vektorovými vrstvami. Prostorové rozložení hydrografické sítě.	2.9
parametry úseků hydrografické sítě	tabulka	Volitelný	Atributová tabulka obsahuje identifikátor tvaru jednotlivých úseků.	2.9
volba arcgis výstupů	logická proměnná	Povinný	Tabulka parametrů jednotlivých úseků hydrografické sítě.	—
			Výchozí formát výstupních rastrů je proprietární formát ERST. Uživatel může zvolit textový formát ASCII.	—

2.1 Digitální model terénu

Rastr digitálního modelu terénu DMT, či anglicky DTM (Digital Terrain Model) reprezentuje souvislou morfologii určité části Země. DMT rastr je složen z jednotlivých buněk. Nejčastější formou jsou buňky čtvercové, ale mohou mít i jiný tvar. (@@@ smoderp dela jen ctverce, takze mozna zbytecna vedlejsi veta) 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. Model byl testován na rastrech o velikosti od několika málo do stovek tisíc buněk. DMT jednoho z testovacích povodí Nučice obsahuje přes 125 tisíc buněk (@@@ pri jakem rozliseni) . Příklad DMT dalšího testovacího povodí Býkovice je ukázán na obrázku 6a.

2.2 Půdní data

Datové zdroje vlastností půd jsou v rámci České Republiky roztríštěné. Model SMODERP2D pracuje s jednou vstupní vrstvou půd. Příprava této vrstvy z dostupných dat je otázkou preprocessingu a propojení relevantních zdrojů. V zásadě jsou tři základní dostupné datové zdroje půdních vlastností. Odděleně připravená (@@@ to: jinou metodou připravene si nejsem jist) data na zemědělské a lesní půdě nebo bezešvá vrstva půd KPP odpovídající měřítku 1:200000.

V České Republice se na zemědělské půdě standardně využívá klasifikace podle Nováka. Půda je rozdělena podle obsahu jílových částic na půdy ? (@@@ v bib/bib.bib zadna polozka s oznamenim kavka neni...) :

- písčité
- hlinitopísčité
- písčitohlinité
- hlinité
- jílovitohlinité
- jílovité
- jíl

Na lesních půdách je v České Republice standardně využíván popis kategorií podle klasifikace USDA³. Obrázek 6b ukazuje výřez připravené vrstvy. Pro určení charakteristik je nutné, aby atributová tabulka dané vrstvy obsahoval identifikátor půdního typu. Identifikátor odkazuje na půdní charakteristiky, které jsou ale uložené ve zvláštní tabulce (viz níže). Mezi půdní charakteristiky a parametry používané modelem patří: k - nasycená hydraulická vodivost [ms^{-1}]; S - sorptivita půdy [$m\sqrt{s}$]; n - mannigův součinitel drsnosti, b - parametr rovnice plošného odtoku [?], X - parametr rovnice plošného odtoku [?] a Y - parametr rovnice plošného odtoku [?]. Hodnoty těchto parametrů lze převzít z tabulky 11 v příloze 1. Fyzikální význam těchto parametrů a jejich implementace v modelu jsou popsány v části I toho manuálu.

³United States Department of Agriculture

2.3 Data využití území

(@ @ @ pk - doplnit zdroje takovych dat) Obdobně jako u půdních dat je vstupem vektorový shapefile popisující využití území. Mezi základní typy, pro které byl model testován, patří:

- atropogení a zpevněné plochy
- holá půda bez vegetace
- les
- sad
- travní porosty
- zemědělské plodiny širokořádkové⁴
- zemědělské plodiny úzkořádkové⁵

Shapefile popisující využití území je ukázán na obrázku 6c. Obdobně jako u půd v předchozí sekci je třeba atributovou tabulkou tohoto shapefilu doplnit o identifikátor daného využití území. Tento identifikátor odkazuje na charakteristiky daného povrchu definované ve zvláštní tabulce (popsáno v sekci 2.4). Parametry související s využitím území, které vstupují do modelu jsou I_{POT} - potencionální intercepce a I_{LAI} - poměrná plocha listová [-]. Jejich konkrétní použití je popsáno v části I toho manuálu.

2.4 Tabulka parametrů půdy a využití území

Další povinný vstup je tabulka, která obsahuje hodnoty jednotlivých parametrů popsaných v předešlých kapitolách a části I toho manuálu. Na tuto tabulku se odkazují identifikátory půdního typu a typu využití území definované pro jednotlivé polygony ve vektorových vstupech. Tato tabulka může být do modelu vložena jako textový soubor. Na obrázku 6e je ukázán příklad takové tabulky. V prvních dvou sloupcích jsou identifikátory (*id*) typu půd (*Soil*) a typu využití území (*Land Co.*). Spojením těchto dvou *id* jsou označeny parametry pro danou kombinaci typu půdy a využití území (třetí sloupec v tabulce na obrázku 6e s označením *soilveg*). Toto *id* je pak spojeno s vektorovou vrstvou na obrázku 6d, kde jsou spojeny *id* z průniku vektorových vrstev půdy 6b a využití území 6c. Tyto prostorově distribuované parametry jsou následně pro potřeby výpočtu uloženy do rastrů. Význam jednotlivých veličin je popsán v tabulce 2. Při přípravě dat je nutné dodržet označení parametrů v této tabulce!

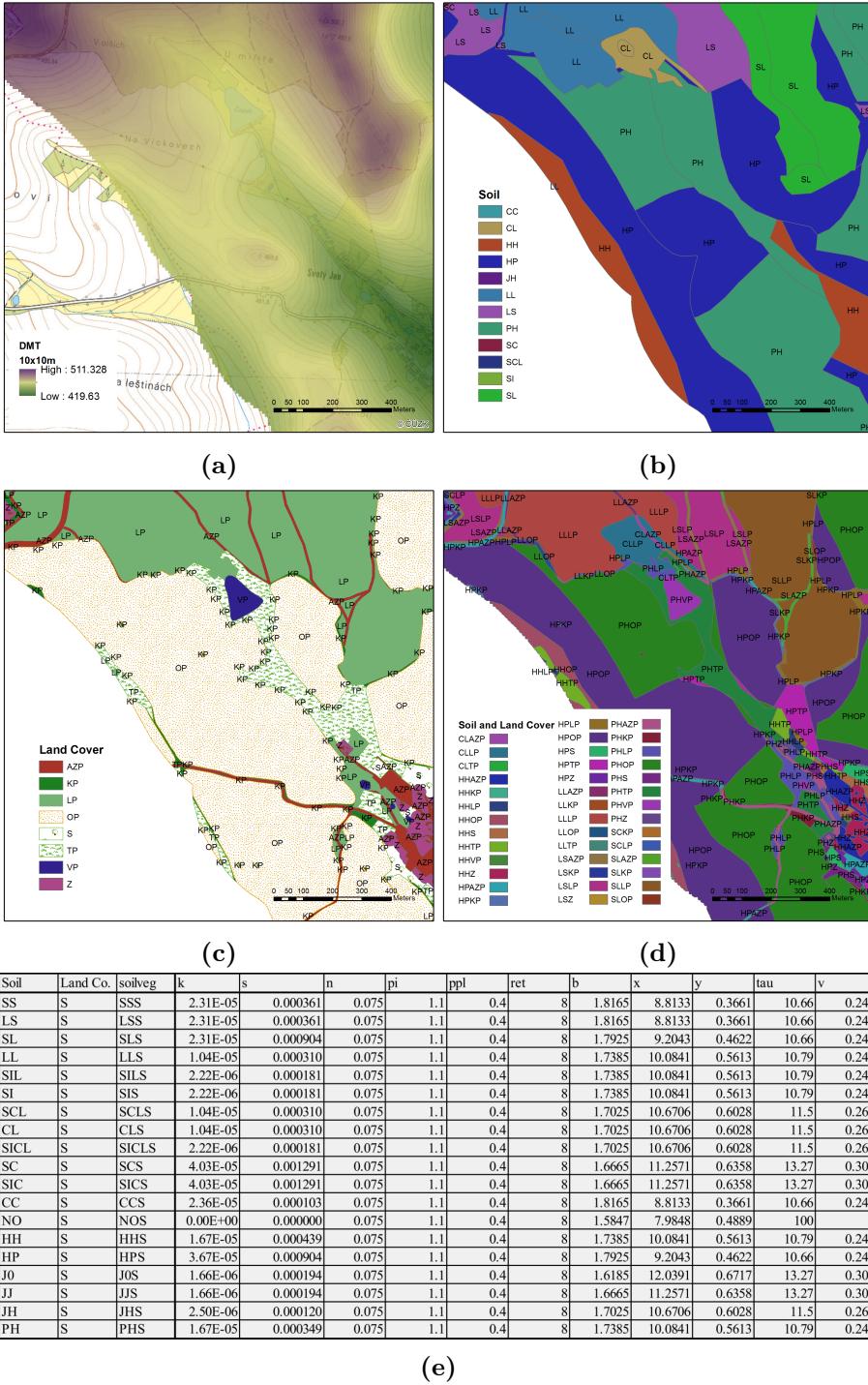
(@ @ @ tabulka parametru v priloze, vymazal jsem smerodatne odchylky, mam vratit?)

2.5 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

⁴Širokořádkové plodiny jsou například brambory, kukuřice, řepa, sója a slunečnice.

⁵Úzkořádkové plodiny jsou obiloviny nebo řepka.



Obrázek 6: Princip propojení vektorových vrstev s tabulkou obsahující parametry typu půdy a vegetace.
a): digitální model terénu; b): rozložení typu půdy; c): rozložení typu využití území; d): protnutí obou předchozích vrstev; e): tabulka s parametry

Tabulka 2: Přehled parametrů charakterizujících půdní typ a typ vegetačního pokryvu

Hlavička v tabulce	Symbol	Popis
k	k	nasycená hydraulická vo- divost [$m s^{-1}$]
s	S	sorptivita půdy [$m \sqrt{s}$]
n	n	mannigův součinitel drs- nosti
pi	I_{POT}	potencionální intercepce
ppl	I_{LAI}	poměrná plocha listová [–]
ret	ret	povrchová retence [m]
b	b	parametr rovnice plošného odtoku [?]
x	X	parametr rovnice plošného odtoku [?]
y	Y	parametr rovnice plošného odtoku [?]
tau	τ_{crit}	kritické tečné napětí [Pa]
v	v_{crit}	kritická nevymílací rych- lost [m/s]

kumulativní úhrn za daný časový interval v **milimetrech**. Ukázka jednoduché srážky a grafické reprezentace kumulativních dat jsou zobrazeny na obrázku 7.

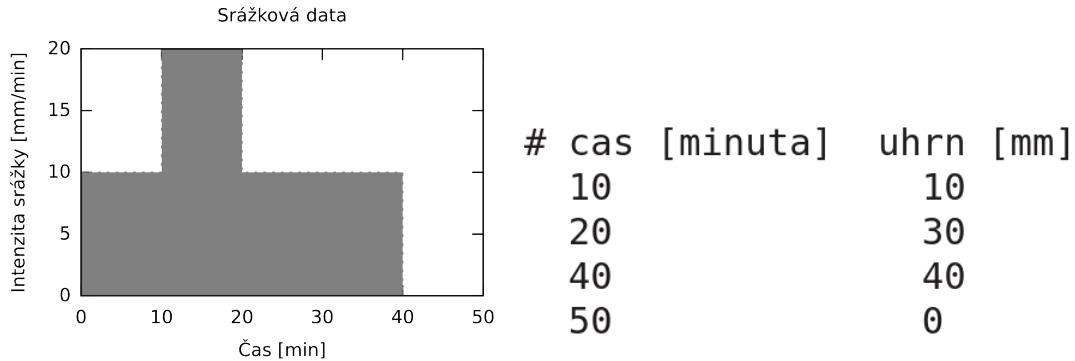
2.6 Časový krok modelu a celková doba výpočtu

Časový krok modelu označený 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. Zvolené řešení změn časového kroku je detailněji popsáno v kapitole 3.2.

Konečný čas simulace je hodnota v minutách. Délky běhu modelu by měla být taková, aby odtekla veškerá voda z řešeného území, především při zjištování celkového objemu odtoku.

2.7 Body pro generování hydrogramů

Jedná se o bodovou vektorovou vrstvu. V těchto bodech se budou ukládat časové řady počítaných veličin (hydrogramy). Tento volitelný vstupní parametr je podrobněji popsán



Obrázek 7: Ukázka srážkových dat. Vlevo: grafická reprezentace zadaných dat (srážka zobrazena v intenzitách; Napravo: ukázka dat v požadovaném formátu)

v kapitole 4.3.

2.8 Výstupní adresář

Do výstupního adresáře se uloží veškeré výstupy modelu. Na začátku běhu programu se obsah tohoto adresář celý vymaže, proto se doporučuje vždy provést kontrolu. V žádném případě nenastavujete jako výstupní adresář pracovní plochu, či jiný adresář, kde byste mohli mít uložená důležitá data!

2.9 Hydrografická síť

Hydrografickou sítí jsou myšleny nejen vodní toky, ale i prvky dočasné hydrografické sítě jako jsou příkopy, průlehy, cesty s příkopy a pod. Výpočet v modelu probíhá po jednotlivých úsecích pomocí Manningovi rovnice pro výpočet průtoku (popsané v části I). Prostorové umístění jednotlivých úseků je definované pomocí shapefile liniové vrstvy. Charakteristiky jednotlivých úseků jsou definovány v samostatné tabulce, kde jsou uvedeny charakteristiky pro jednotlivé úseky. Pro propojení prostorové informace s charakteristikami úseků je třeba mít v této tabulce shodný název pole jako ve vrstvě vodních toků.

V tabulce 3 je ukázka zadávaných hodnot. Model umožňuje vybrat ze čtyř tvarů příčného průřezu úseků, kde každý tvar má povinné celočíselné označení. Tyto tvary jsou: obdélník (výchozí; tvar: 0), lichoběžník (tvar: 1), trojúhelník (tvar: 2) a parabola (tvar: 3). Kromě tvarových charakteristik (šířka dna, sklon břehu) lze rovněž definovat základní průtok ve formě 365 denního průtoku. Pokud úsek charakterizuje objekt, který je pouze dočasně zavodněný je $Q_{365} = 0$. Pole, které slouží k připojení parametrů z tabulky k jednotlivým úsekům hydrografické sítě je v tabulce 3 označen jako *smoderp*. Rovnice použity pro určení hydraulického poloměru jednotlivých tvarů příčných profilů jsou na ukázány v příloze 1 na obrázku 12.

Tabulka 3: Příklad tabulky s parametry jednotlivých úseků hydrografické sítě

cislo	smoderp	tvar	b	m	n	Q365	pozn
0	0		1	0.3	1.0	0.03	0.0 default
1	obdelnik1		0	0.2	0.0	0.035	0.0
2	lichobeznik1		1	0.2	2.0	0.035	0.0
3	trojuhelnik1		2	0	2.0	0.03	0.0
3	trojuhelnik2		2	0	2.5	0.03	15.0
4	parabola1		3	0.7	0.0	0.03	0.0

kde b je šířka dna příčného profilu hydrografické sítě [m],
 m je poměr sklonu svahů (pro obdélník je roven nule),
 n je množný součinitel drsnosti a
 $Q365$ je základní průtok [m^3/s].

3 Popis programu

Samotný program je rozdělen do několika podadresářů a souborů. Adresářová struktura s popisem nejdůležitějších adresářů a souborů je ukázána na obrázku 13 v příloze 1. Klíčový soubory je `data_preparation.py`, kde je proveden *preprocessing* vstupních dat. Dalšími důležitými soubory jsou `runoff.py` a `time_step.py`, kde probíhá samotný výpočet. Soubory v adresáři `main_clasess/` obsahují definici datových struktur jednotlivých řešených dějů a skládají dohromady metody k řešení jednotlivých částí odtoku. Tato metody jsou pak definované v adresáři `processes/`.

Program SMODERP2D je napsaný v jazyce Python. Python je často používaný GIS softwary jako skriptovací jazyk a jsou pro ně k dispozici knihovny pro efektivní práci s geodatami⁶. Programy či skripty napsané pomocí Python jsou spustitelné v prostředí daných GIS softwarů. Současná verze modelu SMODERP2D používá Python 2.7.X, který je kompatibilní s ArcGIS 10.X.

Na obrázku 14 v příloze 1 je zjednodušený diagram toku programu. Program řeší v každém časovém kroku rovnici (3). Pokud je překročena kritická výška a půda se začne vymílat, začne se do celkového odtoku započítávat i soustředěný odtok. Bilanční rovnice je rozšířena (11). Pokud je řešen i odtok hydrografickou sítí, načítá se celkový přítok $\sum_j^m o_{j,t-1}^{in}$ (případně $\sum_k^n o_{rillk,t-1}^{in}$) v rovnici (3) nebo (11) do všech buněk ležících v daném úseku. Odtok je následně řešen M:CH rovnicí (@@@ manning nebo chezys) .

Pokud v daném časovém kroku překročí rychlosť v jakékoli buňce *CFL* kritérium, dojde ke zmenšení časového kroku a výpočet se v daném kroku opakuje. Pokud je *CFL* kritérium nízké, je možné časový krok zvýšit. To odpovídá kontrole a aktualizaci časového kroku v diagramu na obrázku 14. Po dosažení konečného času dojde k uložení výsledných hodnot a ukončení programu. Implementace *CFL* kritéria je popsána v kapitole 3.2.

3.1 Programovací jazyk Python

Python je vysokoúrovňový objektově orientovaný programovací jazyk, který se může využít v mnoha oblastech vývoje softwaru. Nabízí významnou podporu k integraci s ostatními jazyky a nástroji a přichází s mnoha standardními knihovnami. Jeho použití je velice široké od programů na zpracování multimedií až po zpracování textů. Python multiplatformní programovací jazyk (Python Software Foundation 2017). Zajímavým balíčkem jazyka Python je `numpy` (van der Walt et al. 2011). Je to balíček užívaný pro vědecké výpočty. Umožňuje manipulaci s velkými multi-dimenziorními poli a disponuje velkou knihovnou matematických funkcí pro práci s těmito poli. Pomocí tohoto balíčku bylo v programu operováno s naprostou většinou polí a matic.

Aktuální verze modelu SMODERP2D používá Python 2.7. V současnosti (Prosinec 2017) je nejnovější verze jazyka Python 3.6. Poslední verze vývojové větve 2.7 Pythonu vyšla v roce 2010. Podpora Python 2.7 je plánována do jara 2020 (přesné datum zatím

⁶knihovna `arcpy` pro ArcGIS či knihovny `grass.script` pro GRASS GIS

Tabulka 4: Kritéria změny časového kroku vycházející z plošného odtoku

nové	$CFL < 0.75 \vee 1.0 < CFL \quad 0.75 \geq CFL \geq 1.0 \vee CFL = 0.0^*$
Δt	$= MIN(\frac{0.5601\Delta x}{v}; \Delta t_{max})$
	= původní Δt

není stanoveno). Proto bude docházek k migraci modelu SMODERP2D na verzi Python 3.

3.2 CFL podmínka - řešení nestability výpočtu

V předchozích verzích programu SMODERP2D nebyla ošetřena podmínka stability výpočtu, která vychází z explicitního řešení časové derivace. Při větších rychlostech toku či nevhodně zvolené délce časového kroku docházelo k nestabilitám v řešení. Program se v takovém případě ukončil a uložil výsledky posledního úspěšně spočítaného časového kroku.

V současné verzi programu SMODERP2D je tento problém vyřešen Courant-Friedrich-Lewy (CFL) podmínkou. Splnění této podmínky zajišťuje konvergenci explicitního řešení pokud platí, že $CFL < 1.0$. Z obecné rovnice CFL podmínky byla odvozena a upravena podmínka pro účely modelu SMODERP2D na následující tvar: (@@@ není k tomu 0.5601 nejak citace?)

$$CFL = \frac{1}{0.5601} \frac{v\Delta t}{\Delta x} \quad (15)$$

kde CFL je Courant-Friedrich-Lewy podmínka,
 v je rychlosť plošného či rýhového toku [m/s],
 Δt je časový krok [s] a
 Δx je prostorový krok [m].

Po dopočítání časového kroku je uložena nejvyšší hodnota CFL zjištěná z **plošného odtoku** pomocí vztahu (15). Poté se tato hodnota porovná s kritickou hodnotou CFL a podle pravidel znázorněných v tabulce 4 se změní (nebo nezmění) délka časového kroku Δt . Pokud dojde ke změně Δt opakuje se výpočet v daném časovém. Do dalšího času se výpočet posune, až když je zaručena stabilita výpočtu.

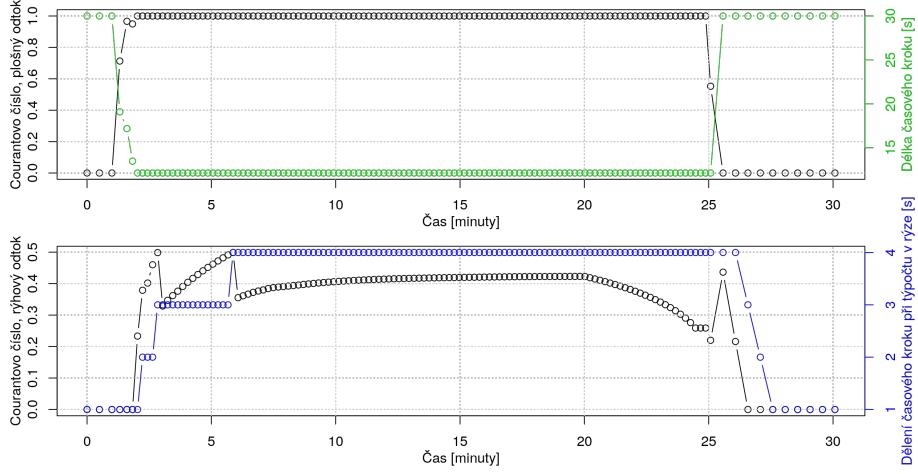
Soustředěný odtok v rýhách je zpravidla řádově rychlejší než plošný odtok. Pokud bychom v tomto případě uplatňovali stejný princip jako u plošného odtoku, časový krok by byl extrémně malý, čímž by se prodlužoval strojový čas výpočtu. K odtoku v rýhách většinou nedochází na celém území, ale pouze v poměrně malém počtu buněk (v poměru k celé ploše výpočetní oblasti). Proto se při výpočtu soustředěného odtoku přistoupilo k lokálnímu krácení časového kroku pouze v buňkách, kde k soustředěnému odtoku dojde. Časový krok výpočtu odtoku v rýhách je dělen celočíselně faktorem označeným jako *ratio*. CFL číslo se proto ukládá zvlášť u plošného a zvlášť u soustředěného odtoku. Ke změně celkového časového kroku plošného odtoku dojde až pokud $ratio \geq 10$. Časový krok plošného odtoku je pak násoben multiplikátorem Δt_{mult} , který se po každém překročení kritické CFL podmínky, zmenší na 90 % své dosavadní hodnoty. Pokud je CFL kritérium příznivé (začíná se zmenšovat) multiplikátor Δt_{mult} se postupně zvětšuje vždy o 10 % dokud nedosáhne hodnoty 1. Pravidla pro změnu faktoru *ratio* a multiplikátoru Δt_{mult}

Tabulka 5: Kritéria změny faktoru $ratio$ při dělení časového kroku při výpočtu rýhového odtoku

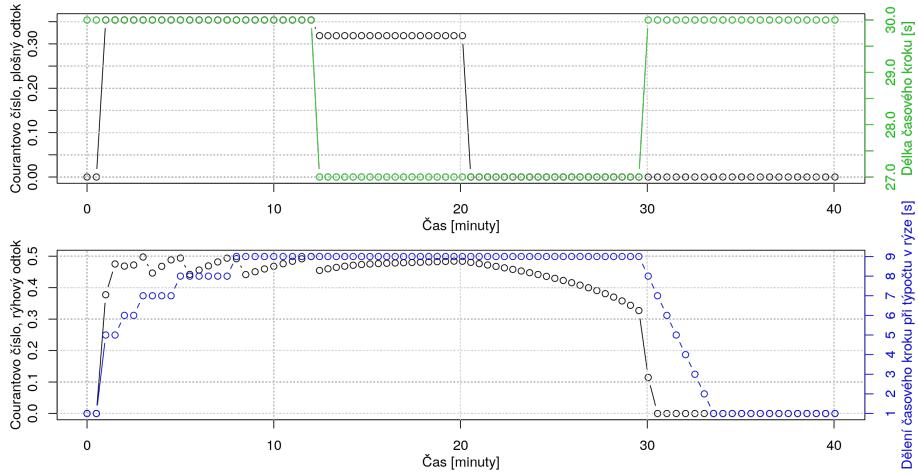
nové	$CFL_{rill} < 0.3$	$0.5 < CFL_{rill}$	$0.3 \geq CFL_{rill} \geq 0.5$ $\vee CFL_{rill} = 0.0$
$ratio$	$= MAX(ratio - 1; 1)$	$= MIN(ratio + 1; 9)$ pro $ratio = 10$	původní $ratio$
Δt_{mult}	$= MIN((1/0.9)\Delta t_{mult}; 1)$	$= 0.9\Delta t_{mult}$	původní Δt_{mult}
Δt		$= \Delta t\Delta t_{mult}$	

jsou shrnuta 5.

Obrázek 8 a 9 ukazují chování časového kroku v případě, že je řízen plošným obrázek 8 nebo soustředěným odtokem obrázek 9.



Obrázek 8: Časový krok řízen rychlosí plošného odtoku. CFL rychle stoupne k 1 a začne zkracovat časový krok (horní graf). Pár minut později CFL_{rill} stoupne nad 0,5, $ratio$ stoupne na 2 (dolní graf) tím začne lokálně dělit časový krok při výpočtu rýhového odtoku. $ratio$ na spodním grafu stoupne maximální na 4 a neovlivní tedy celkový časový krok (na horním grafu). Na obou grafech je vidět jak se po 25 minutě (kdy v modelu skončila srážková událost) dálka časového kroku i $ratio$ vrátí na původní hodnoty.



Obrázek 9: Časový krok řízen rychlosí rýhového odtoku. CFL plošného odtoku nepřekročí během výpočtu hodnotu cca 0,35 (na horním grafu), proto nemá žárný vliv na velikost časového kroku. CFL_{rill} rychle vystoupí 9 krát nad kritickou hodnotu 0,5 (spodní graf, prvních 10 minut výpočtu). To způsobí nárůst $ratio$ na 9 což je maximální povolené dělení lokálního časového kroku při výpočtu rýhového odtoku. Při dalším překročení hodnot 0,3 (cca 12 minuta na dolním grafu) dojde ke zmenšení celkového časového kroku na 90 % původní hodnoty (horní graf). Na obou grafech je vidět jak se po 20 minutě (kdy v modelu skončila srážková událost) dálka časového kroku i $ratio$ vrátí na původní hodnoty.

4 Výstupy z modelu

(@@@ Zde dodelat

- popsat výstupy mimo temp
- popsat co jsou v temp
- popsat výstupy v určitých krocích

)

Výstupy modelu jsou uloženy do složky zadané mezi vstupními parametry (obsah složky je při spuštěné programu vymazán!). Kumulativní nebo maximální hodnoty v jednotlivých buňkách jsou na konci výpočtu uloženy v rastrovém formátu (viz kapitola 4.1). Průnik polygonů prostorové distribuce typu půd a využití území jsou uloženy ve vektorovém formátu (viz kapitola 4.2). Pokud model SMODERP2D počítá i úseky hydrografické sítě, jsou kumulativní nebo maximální hodnoty veličin jednotlivých úseků vypsány v atributové tabulce vektorové vrstvy úseků (viz kapitola 4.2), prostorové rozložení jednotlivých úseků je uloženo také jako jeden s rastrů (viz kapitola 4.1). Volitelné výstupy hydrogramů v bodech jsou ve formě časových řad uloženy do textových souborů s příponou **.dat** (viz kapitola 4.3). Jednotlivé výstupy jsou dále popsány podrobněji.

4.1 Rastrové výstupy

V rastrech jsou uloženy vybrané veličiny jednotlivých buňkách řešeného území. Jako rastrový formát lze zvolit proprietární ESRI formát nebo textový formát ASII. Přehled rastrových výstupních souborů je shrnut v tabulce 6. Pokud jsou v modelu řešeny i úseky hydrografické sítě jsou buňky rastru ležící na úseku uloženy s hodnotou **NoData** (výjimku tvoří 2 rastry popisující vlastnosti úseků, viz tabulka 6).

4.2 Vektorové výstupy

Výstupní data modelu ve vektorovém formátu jsou dva. Jedná se topograficky upravenou vrstvu (@@@ topograficka upraha = orientace linie atd...?) úseků hydrografické sítě (**hydReach**), kde jsou do její atributové tabulky doplněny kumulativní a maximální hodnoty vybraných veličin. Tyto veličiny jsou popsány v tabulce 7. Druhým vektorovým výstupem je vrstva, která zobrazuje průnik prostorového rozložení typu půdy a využití území (**interSoillU**). Ukázka takové vrstvy je na obrázku ??d. Tato vektorová vrstva slouží především ke kontrole správnosti přípravy vstupních dat či hledání chyb v nich.

4.3 Hydrogramy

Pokud jsou do vstupů zadány body pro výpis hydrogramů, vypíší se do testových souborů s příponou **.dat**. Vypsané veličiny jsou závislé na typu odtokového procesu. Popis vypsaných

Tabulka 6: Přehled rastrových výstupů

Název souboru (ESRI nebo .acs)	Jednotka	Popis
cInfiltrationM	m	Kumulativní infiltrace
cRainfallM	m	Kumulativní srážka (bez intercepce a povrchové retence)
cVolInM3	m^3	Kumulativní objem přítoků do buňky (plošný + soustředěný)
cSheetVolOutM3	m^3	Kumulativní objem odtoku z buňky
cRillVolOutM3	m^3	Kumulativní objem odtoku z buňky rýhou
cVolRestM3	m^3	Kumulativní zbytek po odtoku odtoku z buňky
mSurfaceFlowM3_S	$m^3 s^{-1}$	Maximální celkový odtok v buňce
mVelocityM_S	ms^{-1}	Maximální rychlosť proudenia v buňce (plošného či soustředěného odtoku)
mReachFlowM3_S	<i>NA</i>	Maximální odtok v úsecích hyd. sítě
mShearStressPa	<i>Pa</i>	Maximální tečné napětí
reachFID	<i>NA</i>	Buňky mimo tok mají NODATA hodnotu nebo id daného úseku toku.
massBalance	m	Bilance všech vstupů a výstupu z a do buňky

veličin při povrchovém odtoku je shrnut v tabulce 8. Pokud je v buňce úsek hydrografické sítě, vypisují se pouze hodnoty tohoto úseku. Názvy a význam veličin popisující úsek toku jsou popsány v tabulce 9. 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.

toto je origoš z DP

Ne vždy se vytvoří všechny tyto výstupní soubory. Záleží na zvolených vstupních parametrech. Pokud uživatel nezadá žádnou bodovou vrstvu, nevytvoří se poslední textový soubor. V případě, že uživatel nezvolí možnost soustředěného odtoku, nevytvoří se rastry a shapefile související s tímto typem odtoku. Rastr soustředění odtoku se nevytvoří při nezvolení vícesměrného odtoku. Ostatní soubory se vytvoří pokaždé.

z diplomky

Výstupy se ukládají do adresáře nazvaného output. Cestu k němu si volí uživatel v rámci vstupních dat (viz kap. 2.3.1). Model prochází stále vývojem a dotýká se to i výstupních souborů. Princip ale zůstává stejný a jedná se spíše o úpravy zdrojového kódu zajišťující lepší přehlednost a práci s kódem pro budoucí úpravy. Např. práce s vícerozměrnými maticemi a převedení všech výpočtů do základních (SI) jednotek. Výsledkem modelu jsou soubory (.shp, .rst, .txt, .dbf), které reprezentují parametry (Zajíček J., 2014): hladina. Výstupem jsou hodnoty maximální výšky hladiny pro každou buňku. Jedná se tedy o rastrovou vrstvu vytvořenou porovnáváním hodnot výšek hladiny v každém časovém

Tabulka 7: Popis veličin tabulky úseků hydrografické sítě

Název sloupce	Jednotka	Popis
FID	—	Identifikátor přiřazeného úseku (<i>feature id</i>)
cVolM3	m^3	Kumulativní objem odtoku
mFlowM3_S	$m^3 s^{-1}$	Maximální průtok
mFlowTimeS	s	Čas dosažení maximálního průtoku
mWatLM	m	Maximální výška hladiny v úseku
restVolM3	m^3	Objem v úseku po skončení výpočtu
toFID	—	FID úseku do které daný úsek odtéká (hodnota -9999 vyjadřuje situaci, kdy úsek kříží hranici řešeného a odtéká tedy mimo toto území)

Tabulka 8: Popis veličin v .dat souborech

Název sloupce	Jednotka	Popis
time[s]	s	Čas od začátku simulace
deltaTime[s]	s	Aktuální délka časového kroku
rainfall[m]	m	Srážková výška v aktuálním časovém kroku
totalWaterLevel[m]	m	Celková výška hladiny
surfaceFlow[m ³ /s]	$m^3 s^{-1}$	Celkový průtok (plošný + soustředěný)
surfaceVolRunoff[m ³]	m	Celkový odteklý objem (plošný + soustředěný)

*výška hladiny u soustředěného odtoku není výška skutečné výška hladiny v rýze, ale v nadkritická výška hladiny vztažená na celou plochu výpočetní buňky

kroku. Uložena je nejvyšší hodnota. Výška hladiny v jednotlivých krocích je získána pomocí bilance přítoků a odtoků do buňky. průtok Výstupem jsou hodnoty maximálního průtoku pro každou buňku. Obdobně jako u hladiny jsou porovnávány hodnoty v jednotlivých krocích a uložena maximální hodnota. Hodnoty průtoku v jednotlivých časových krocích jsou vypočteny pomocí metody kinematické vlny (teorie viz kap. 1.5.2). infiltrace Výstupem infiltrace jsou hodnoty v každé buňce, které jsou během doby běhu modelu postupně načítány až do vyčerpání infiltracní kapacity. zbytkový objem Zbytkovým objemem se rozumí objem, který v dané buňce v časovém kroku zůstal. V případě odtoku veškeré vody z rastru je rastr nulový. Matematicky je objem vyjádřen jako rozdíl celkového objemu v buňce (zbytkový objem z předchozího kroku a přítoky) a povrchového a soustředěného odtoku. odtok Výstup týkající se odtoku slouží pro konečnou bilanci (kontrolu) a testování. Jedná se o celkové množství, které z buňky odteklo za celou dobu běhu modelu. rychlosť Rastr rychlosť je výstupem sloužící k určení erozní ohroženosti. Porovnávány jsou hodnoty skutečných rychlosťí s limitními nevymílacími rychlosťmi (viz tab. č. 3). napětí.

Obdobou je rastr tečného napětí. Slouží k určení míst potencionálně nebezpečných.

Tabulka 9: Popis veličin v .dat souborech

Název sloupce	Jednotka	Popis
time[s]	s	Čas od začátku simulace
deltaTime[s]	s	Aktuální délka časového kroku
rainfall[m]	m	Srážková výška v aktuálním časovém kroku
reachWaterLevel[m]	m	Výška hladiny plošného odtoku
reachFlow[m ³ /s]	$m^3 s^{-1}$	Průtok plošného odtoku
reachVolRunoff[m ³]	m^3	Odteklý objem plošného odtoku

Hodnoty limitních hodnot tečného napětí jsou uvedeny ve stejné tabulce jako rychlosť prútok v rýze (viz tab. č. 3).

Prútok v rýze je rastrová vrstva znázorňující maximální prútok v rýze při soustředěném odtoku. Výstup je vytvořen jen při volbě typu výpočtu s uvažováním rýhového odtoku. Rýha vznikne pouze v buňkách, kde výška hladiny překročí hladinu kritickou. rychlosť v rýze Rastr obsahuje hodnoty maximální rychlosť v buňkách, kde je rýha vytvořena. Výpočet v rýhách probíhá odlišně oproti povrchovému odtoku. Jedná se o větší rychlosť, a proto na těchto buňkách probíhá výpočet za běžný časový krok 3x. V jiném případě by hrozilo, že výpočet nebude konvergovat. souhrn

Final evalution.txt je textový soubor, který obsahuje souhrn zadaných vstupů a čas běhu modelu a bilanci vody. hydrogram Point hydrographs.txt je textový soubor s hodnotami výšky hladiny, prútu, napětí, rychlosť v bodech zadaných vstupní bodovou vrstvou. Soubor slouží k tvorbě hydrogramů v těchto bodech. Automaticky je k vrstvě přidán bod, ve kterém je hodnota flow accumulation nejvyšší. Výstupem v současnosti je i řada dalších vrstev, které slouží ale spíše k tvorbě a testování modelu a pro samotného uživatele nejsou potřebné.

Část III

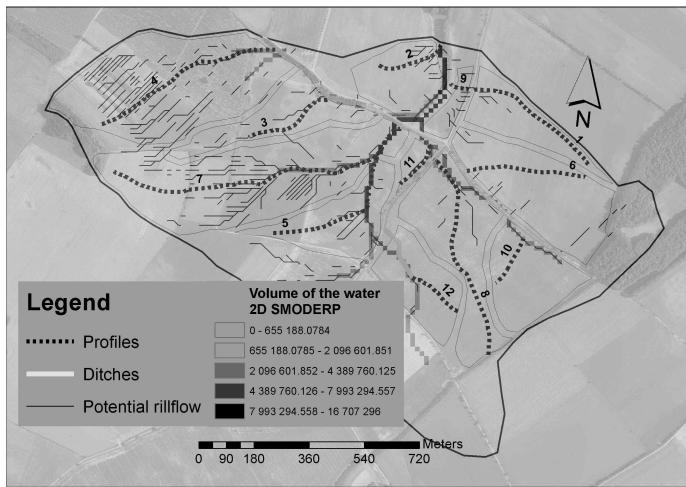
Ukázka výsledků

V poslední části manuálu jsou ukázány výsledky modelu SMODERP2D a jejich porovnání s původní 1D profilovou verzí na experimentálním povodí Býkovice.

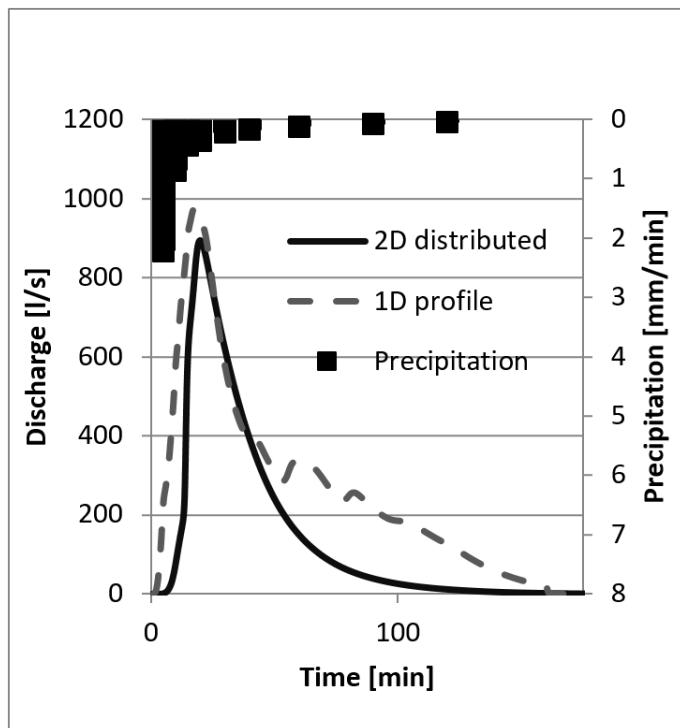
1 Porovnání metod 1D a 2D

(@@@ tu jsem to preložil a nejake anglicke verze, takze si nejsem jist jestli je vše ok)

SMODERP2D a předchozí 1D profilová verze byly porovnány pomocí výpočtu průtoku a odteklého objemu na erozně narušených profilech. Toto porovnání bylo provedeno na monitorovaném území povodí Býkovice a Hořovickém potoce, území o rozloze 1.5 km^2 . Při výpočtu 1D řešení bylo vybráno 12 reprezentativních profilů. Řešené území i jednotlivé profily vybrané pro 1D výpočet jsou ukázány na mapě na obrázku 10. Oba typy řešení byly modelovány pro stejnou naměřenou srážku. Průtok v uzávěrovém profilu byl u 1D řešení určen součtem odtoku jednotlivých reprezentativních úseků. Výsledky porovnání jsou ukázány v grafu 11. Výsledky odvozené 1D řešení reagují na příčinnou srážku dříve 2D řešení i doba koncentrace je kratší. Při dotoku reaguje 1D řešení na pozdější srážku více než 2D řešení. (@@@ jste z toho něco vydovit, jak je 2D super.)



Obrázek 10: Povodí Býkovice a Hořovický potok. Jednotlivé profily 1D řešení jsou na mapě označené číslem 1-12. Obrázek rovněž ukazuje oblasti rizika vzniku rýh, které souvisejí s 2D řešením

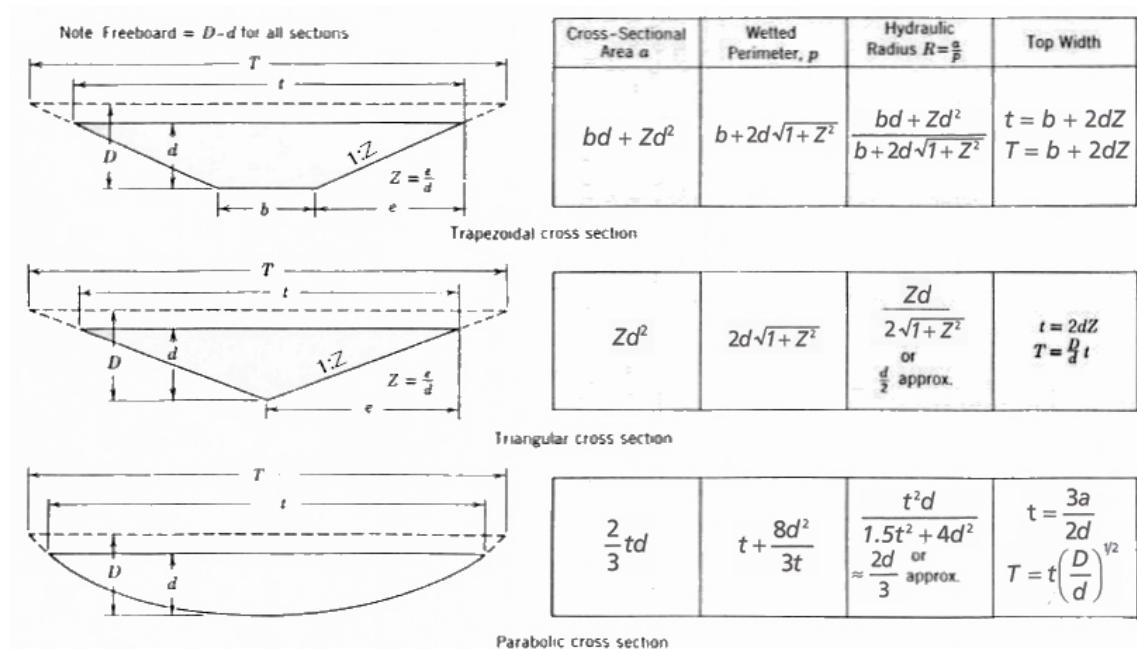


Graf 11: Srovnání 1D a 2D řešení modelu SMODERP2D- Povodí Býkovice a Hořovický potok

Příloha

Tabulka 10: Recalibrated parameters to SI (Neumann & Kavka 2015)

soil type	Runoff parameters		
	b	X	Y
sand	1.8165	8.8133	0.3661
loamy sand	1.7925	9.2043	0.4622
sandy loam	1.7685	9.5953	0.5150
loamy	1.7385	10.0841	0.5613
clay loam	1.7025	10.6706	0.6028
clayey	1.6665	11.2571	0.6358
clay	1.6185	12.0391	0.6717



Obrázek 12: Tvary příčných průřezů úseků hydrografické sítě a použité vztahy na výpočet hydraulického poloměru

Tabulka 11: Nahrnuté kritické hodnoty hodnoty třecího napětí a nevymílací rychlosti (@@@ ref)

Název	ID	k [m/s]	s [m.s.0.5]	b	x	y	v m/s	tau Pa
coarse	CC	6.94E-06	0.000097459	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245
medium	ME	1.39E-06	0.000129099	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
medium fine	MF	2.64E-07	0.00011619	1.7925	9.2043	0.4622	10.66	0.245
fine	FF	2.78E-06	0.000047459	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264
very fine	VF	1.67E-06	0.000129099	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305
sand	SS	1.00E-06	0.000129099	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245
loamy sand	LS	1.00E-06	0.000129099	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245
sandy loam	SL	5.14E-06	0.000097459	1.7925	9.2043	0.4622	10.66	0.245
loam	LL	1.67E-06	0.000129099	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
silt loam	SIL	1.39E-07	0.00010328	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
silt	SI	1.67E-07	0.00010328	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
sandy clay loam	SCL	5.14E-06	0.000097459	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264
clay loam	CL	1.94E-06	0.000047459	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264
silty clay loam	SICL	1.67E-07	0.00010328	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264
sandy clay	SC	5.14E-06	0.000097459	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305
silty clay	SIC	1.94E-06	0.000047459	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305
clay	CC	1.94E-06	0.000047459	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305
nosoil	NO	0.000E+00	0	1.5847	7.9848	0.4889	100	3
hlinitá	HH	1.67E-06	0.000129099	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
hlinitopísčitá	HP	3.67E-06	0.000077459	1.7925	9.2043	0.4622	10.66	0.245
jíl	J0	1.66E-07	0.00010328	1.6185	12.0391	0.6717	13.27	0.305
jílovitá	JJ	1.66E-07	0.00010328	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305
jílovitohlinitá	JH	2.50E-07	0.00011619	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264
písčitohlinitá	PH	1.67E-06	0.000129099	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
písčitá	PP	1.67E-05	0.000193649	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245

```

/
└── main.py ..... Hlavní skript volající ostatní.
    Upravuje / kontroluje formát
    vstupních parametrů.

└── main_src/
    └── flow_algorithm/ ..... Adresář obsahuje metody pro
        práci s odtokovými algoritmy.
        ├── arcgis_dmtfce.py
        ├── D8.py ..... Metody jednosměrného odtoku.
        ├── flow_direction.py
        ├── mfd.py ..... Metody vícesměrného odtoku.
        └── py_dmtfce.py

    └── io_functions/ ..... Metody zprostředkovávající
        operace s vstupy a výstupy do
        a z modelu.
        ├── hydrographs.py
        ├── post_proc.py
        ├── progress_bar.py
        └── prt.py

    └── main_classes/
        ├── CumulativeMax.py
        ├── Flow.py
        ├── General.py
        ├── KinematicDiffuse.py
        ├── Stream.py
        ├── Subsurface.py
        ├── Surface.py
        └── Vegetation.py

    └── processes/
        ├── infiltration.py
        ├── rainfall.py
        ├── rill.py
        ├── subsurface.py
        └── surface.py

    └── stream_functions/
        ├── stream_f.py
        └── stream_preparation.py

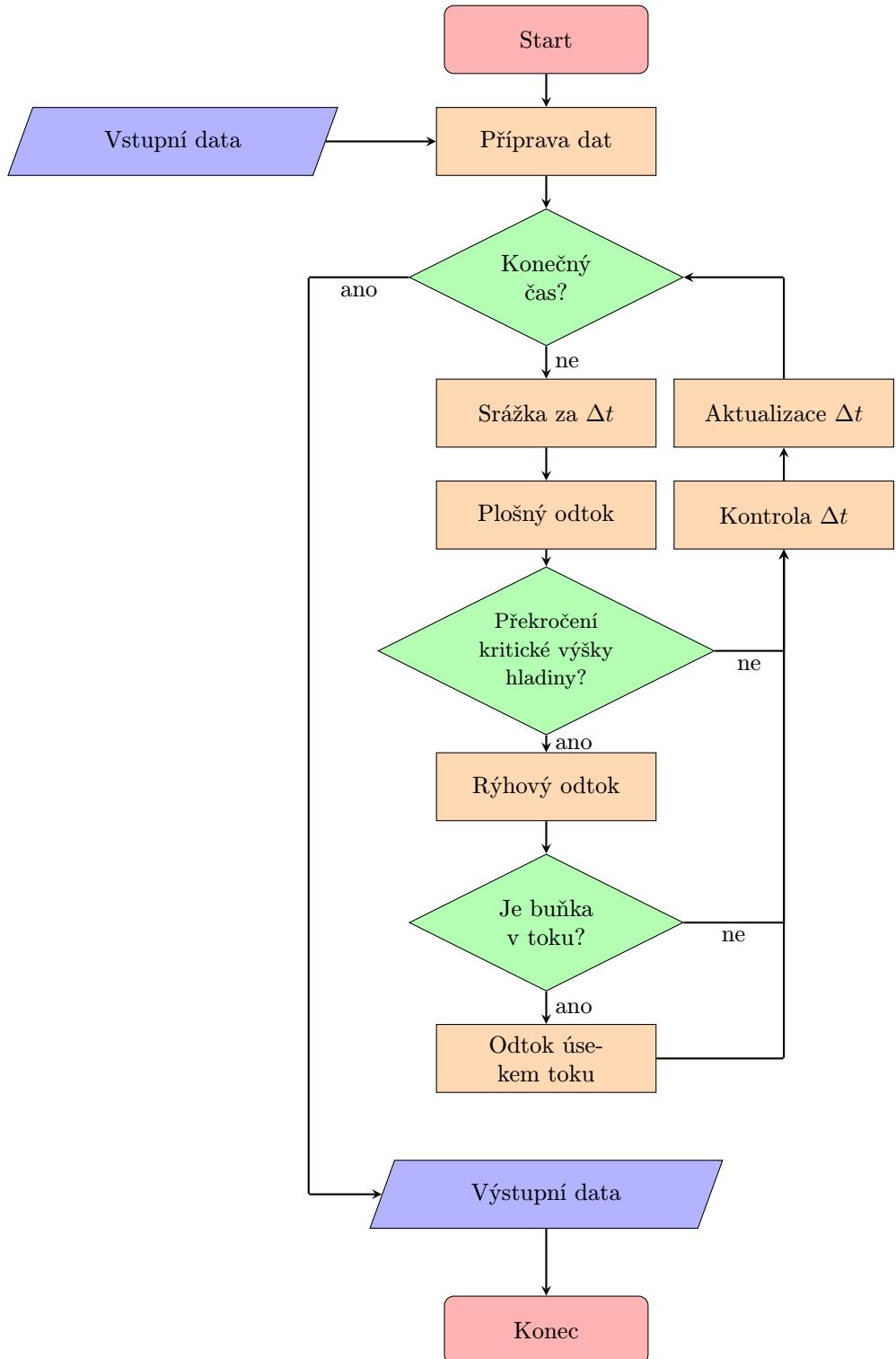
    └── tools/
        ├── resolve_partial_computing.py
        ├── save_load_data.py
        └── tools.py

    ├── constants.py
    ├── courant.py
    ├── data_preparation.py
    ├── functions.py
    ├── runoff.py
    └── time_step.py

```

Obrázek 13: soubory a adresa modelu SMODERP

Seznam použitých zdrojů



Obrázek 14: Flow chart toku programu

Reference

- Cabík, J., J. K. (1963), *Protierozní ochrana půdy*.
- Dýrová E. (1984), *Ochrana a organizace povodí. Návody ke komplexnímu projektu a diplomnímu semináři*, SNTL - VUT Brno, Brno, CZ.
- Miller, J. E. (1984), Basic concepts of kinematic-wave models, Technical report.
- Neumann, M. & Kavka, P. (2015), Využití dvou metod měření rychlosti povrchového odtoku ke kalibraci srážko-odtokových modelů, in 'Voda a krajina 2015', Praha, CZ, pp. 81–89.
- Philip, J.-R. (1957), 'The theory of infiltration: 1. the infiltration equation and its solution.', *Soil science* **83**(5), 345–358.
- Python Software Foundation (2017), *Python Language Reference, verze 2.7*. Dostupné na <http://www.python.org>.
- Schwab, G. O. (1993), *Soil and water conservation engineering*, Wiley.
- van der Walt, S., Colbert, S. C. & Varoquaux, G. (2011), 'The numpy array: A structure for efficient numerical computation', *Computing in Science & Engineering* **13**(2), 22 – 33.
- URL:** <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5725236&isnumber=5725228>