
SMODERP2D - UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA

SIMULAČNÍ MODEL POVRCHOVÉHO ODTOKU A EROZNÍHO PROCESU

EDITED BY

KAVKA

...

ČVUT



2017

PUBLISHER

Obsah

Obsah	i
Seznam zkratek	ii
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	10
3 Odtok hydrografickou sítí	10
3.1 Propojení úseků hydrografické sítě	11
II Použití modelu	12
1 Instalace SMODERP2D a spištění v ArcGIS	13
1.1 Použití modelu v ArcGIS	13
2 Vstupy do modelu	17
2.1 Digitální model terénu	17
2.2 Půdní data	17
2.3 Data využití území	19

2.4	Tabulka parametrů půdy a využití území	19
2.5	Srážková data	20
2.6	Časový krok modelu a celková doba výpočtu	20
2.7	Body pro generování hydrogramů	21
2.8	Výstupní adresář	21
2.9	Hydrografická síť	21
3	Popis programu	25
3.1	Programovací jazyk Python	25
3.2	CFL podmínka - řešení nestability výpočtu	26
4	Výstupy z modelu	29
4.1	Rastrové výstupy	29
4.2	Vektorové výstupy	29
4.3	Hydrogramy	30
A	Příloha: doplňující tabulky a grafy	32
B	Příloha: další výstupy	36
	Seznam použitých zdrojů	37

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 intercepcce [m]
$\frac{dS}{dt}$	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	manningův součinitel drsnosti		

V_{tot}	celkový objem vody v elementu [m^3]	y_{rill}	parametr rovnice plošného odtoku [m]
v_{crit}	kritická nevymílací rychlosť [m/s]	g	gravitační zrychlení [m/s^2]
X	parametr rovnice plošného odtoku [?]	P	plocha buňky [m^2]
Y	parametr rovnice plošného odtoku [?]		

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 dvou hlavních částí. V první části jsou uvedeny zvolené výpočetní vztahy pro popis povrchového odtoku. Druhá část je věnována popisu instalace a použití modelu v prostředí ArcGIS. Dále jsou zde podrobně popsány vstupní a výstupní data a stručně popsán tok programu. Případné aktualizace, vzorová data, ukázky využití a další informace o modelu SMODERP2D jsou průběžně poskytovány na webových stránkách (storm.fsv.cvut.cz/cinnoст-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 mocninný vztahem jehož parametry byly měřeny (viz příloha A).

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 differencí 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

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 [m] 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 (?) 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 infiltráční rovnice byla zvolena především z důvodu relativně malého počtu vstupních parametrů. Tato zjednodušená rovnice má dva členy: nasycenou hydraulickou vodivost K_s a sorptivitu 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 (?). Plošný povrchový odtok pak lze řešit pomocí obecného mocninného vztahu 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 (?), jejich hodnoty pro různé půdní typy jsou ukázány v tabulce 10 v příloze A. 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 pro povrchový odtok. Parametr a je pak definován jako

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

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

kde n je manningův 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 odtelkého [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 a 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 nevymílací rychlosti. Z obou odvození je určena kritická výška hladiny h_{crit} povrchového odtoku po jejímž překročení začne vznikat rýha.

Při vzniku rýhy dochází v k velkému odnosu půdy, proto by umístění prvků protierozní ochrany mělo být navrhнуто tak, aby k vniku rýhy docházelo co nejméně. Kritické hodnoty nevymílacích rychlostí 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 ?) a jsou uvedeny v tabulce. (@@@ na toto téma 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 půdy 0.24 m/s (@@@ divna citace typka s jiným jménem) (?), což je hodnota nižší, než kterou stanovila E. Dýrová.

Vztah pro výpočet tečného napětí je v modelu SMODERP2D definován podle ? 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 následně 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 10 v příloze A.

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 treci síly?) dna I paralelní se sklonem hladiny vody v rýze a neměnná drsnost v celé délce buňky. Průtok v rýze je tedy vyjádřen pomocí Manningovi rovnice:

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

kde q_{rill} je průtok v rýhách [m^3/s],
 v_{rill} je rychlosť proudenia - rýhový odtok [m/s],
 A je prútočná plocha [m^2],
 n je manningovou súčinu drsnosti a
 R_{rill} je hydraulický polomer 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 nevymíiaci rychlosť 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 (obrázek 1a). 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 (obrázek 1b). Tento mechanizmus ovlivňuje odtok přes hydraulický polomer, který je u obdélníkového příčného profilu odvoze jako

$$R_{rill} = \frac{A}{O} = \frac{h^{rill} b_{rill}}{b_{rill} + 2h^{rill}}$$

kde b_{rill} je šířka rýhy [m] a
 O je omočený obvod [m].

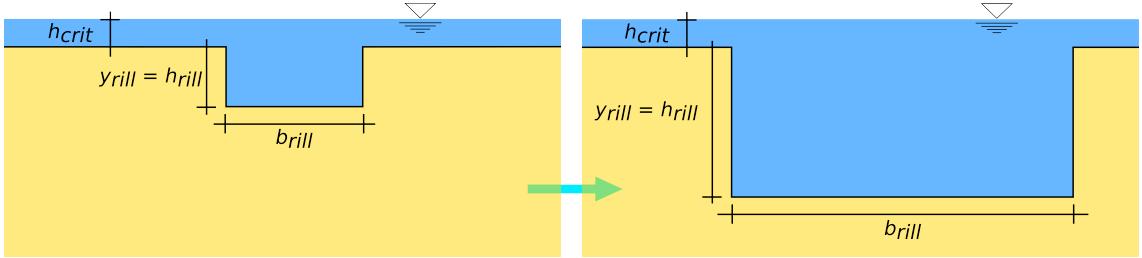
Při plnění nebo prázdnění se v tomto vztahu liší výpočet základny tohoto obdélníku. Pokus se rýha zvětšuje nebo je konstantní určuje se šířka základny jako (viz obrázek 1a)

$$b_{rill} = \frac{h_{crit}}{rill_{ratio}},$$

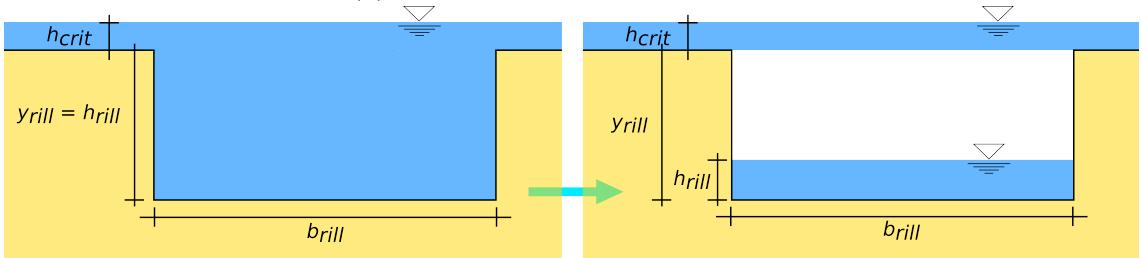
$rill_{ratio}$ je parametr tvaru rýhy [-].

Pokud se rýha prázdní je šířka rýhy odvozena jako (viz obrázek 1b)

$$b_{rill} = \frac{y_{rill}}{rill_{ratio}}.$$



(a) Příčný průřez rýhou, která se plní



(b) Příčný průřez rýhou, která se prázdní

Obrázek 1: Příčný řez rýhou, která je v modelu SMODERP2D reprezentována obdélníkem. Při plnění (zvětšování) rýhy roste výška hladiny vody v rýze s výškou rýhy a v poměru $rill_{ratio}$ k šířce rýhy 1a. Při prázdnění rýhy se tvar rýhy nemění pouze v ní dochází ke změně výšky hladiny v rýze (nalevo) 1b.

Jak je vidět na obrázku 1b. Plošný povrchový odtok s výškou hladiny h_{crit} je předpokládán i na části buňky, kde je se vytvořila rýha. Toto zjednodušení se předpokládá jako zanedbatelné vzhledem k tomu, že plocha kterou pokývají rýhy je zpravidla malá proti ploše celého povodí.

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

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

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 Manningově 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 půdo ochranných opatření v ploše povodí. Cílem je simuloval a navrhovat odtoky i v dočasně 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).

Na rozdíl od povrchového odtoku, který je prováděn v rastru buněk, řeší se výpočet v úsecích hydrografické sítě 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 v vtoků mezi jednotlivými úsekami a spočítá se nová výška hladiny ve všech úsecích najednou. Princip propojení jednotlivých úseků je popsán v kapitole

Proudění v úsecích je řešeno Manningovou 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 A v tabulce na obrázku 11. 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 části II v kapitole 2.9 tohoto manuálu.

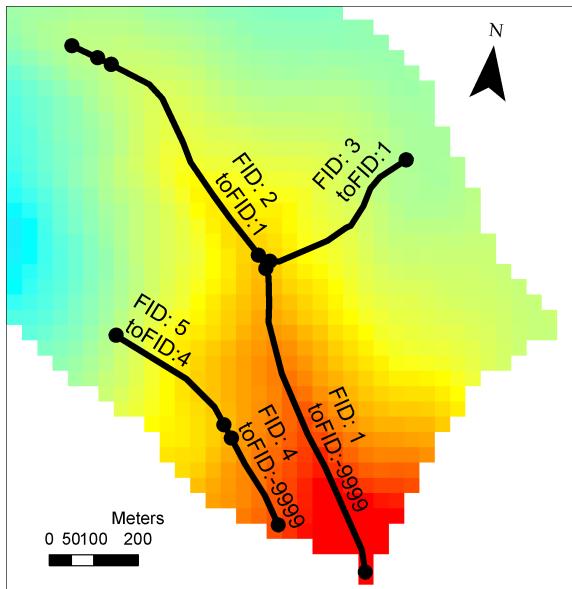
Objem vody, který teče mezi jednolivými úseky hydrografické sítě je určen jednoduše jako

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

3.1 Propojení úseků hydrografické sítě

Na obrázku 2, jsou ukázány úseky na podkladová vrstvě digitálního modelu terénu. Každý úsek to má označení FID. Při přípravě dat dostane každý úsek atribut `toFID`, který udává do jakého úseků daný úsek v vtéká. `toFID = -9999` značí odtok z výpočetní oblasti.

Při přípravě dat je opraven směr úseku podle digitálního modelu terénu. Pokud má úsek oba koncové body v stejné výšce (sklon úseku je nulový), program se ukončí s chybovým hlášením: `ZeroSlopeError: 'Reach FID:1 has zero slope.'`. Chybové hlášení označí problematický úsek (v této ukázce úsek s `FID = 1`) a uživatel musí daný úsek ve vstupních datech opravit tak, aby měl nenulový sklon (aby koncové body úseku nebyly ve stejné výšce).



Obrázek 2: Hydrografická síť s označením FID (id linie) a toFID (id následující linie při odtoku). Podkladová vrstva je digitální model terénu.

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 souboru 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 3). 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 testovacími daty ke stažení na adresu ... ([@{@@ 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 4. 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 5. Výstupní soubory jsou pak uloženy do složky `test-out` v adresáři kde je uložen skript `importrun.py`. V tento moment je model SMODERP2D i nezbytné malíčky zdárně nainstalovaný a jsou připraveny k použití.

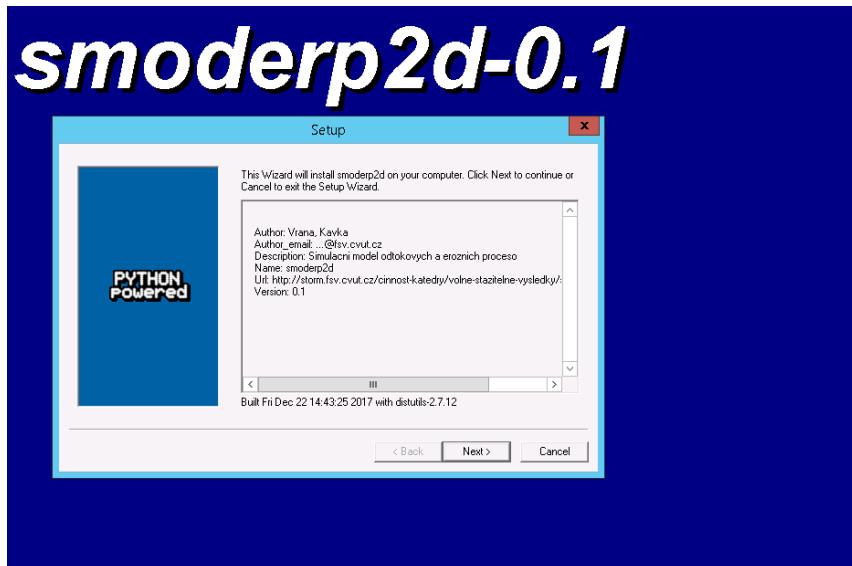
1.1 Použití modelu v ArcGIS

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  
sm.run()
```

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

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



Obrázek 3: Úvodní obrazovka při instalaci malíčku SMODERP2D

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.

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

Obrázek 4: 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 ingnored !!!
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: 11.4509999752
press enter ...
```

Obrázek 5: Zdárný průběh testovacího skriptu modelu

The screenshot shows the ArcGIS toolbox interface for the SMODERP 2D tool. On the left is the tool dialog box with 16 input parameters, each with a descriptive label and a browse button. On the right is a table mapping these parameters to their descriptions and ArcGIS data types.

	Popis	ArcGIS typ dat
1	Cesta k digitálnímu modulu terénu	Raster layer
2	Cesta k vektorové vrstvě rozložení typu půd	Shapefile
3	Název pole s id typů půd	Field
4	Cesta k vektorové vrstvě využití území	Shapefile
5	Název pole s id využití území	Field
6	Cesta k souboru se srážkovými daty	Text file
7	Maximální časový krok	Double
8	Konečný čas výpočtu	Double
9	Vrstva bodů pro výpis hydrogramů	Shapefile
10	Výstupní adresář	Folder
11	Tabulka s parametry modelu	Table
12	Označení pole v tabulce 11	Field
13	Cesta k vrstvě linií hydrografické sítě	Feature Class
14	Cesta k tabulce s geometrií úseků hydrografické sítě	Table
15	Název společného pole pro spojení 13 a 14	Field
16	Volba formy výstupních souborů	Boolean

Obrázek 6: 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 dočasné 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.

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 obsahující informaci 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. 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 při velikosti buňky 5 m. Příklad DMT dalšího testovacího povodí Býkovice je ukázán na obrázku 7a.

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 pripravene 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

Tabulka 1: Tabulka s přehledem vstupních dat modelu

Název	Typ dat	Povinný / volitelný	Poznámka	Více v kapitole
digitální model terénu	raster	Povinný	Toto vstupou se řídí i prostorová diskre- tizace.	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
srážková data	.txt soubor	Povinný	Kumulativně zadaná srážka.	2.5
maximální časový krok	reálné číslo	Povinný	Model mění délku časového podle oto- kových podmínek; doporučuje se 30 - 60 sekund.	2.6
výstupní adresář	text	Povinný	Adresář k uložení výsledků (při spuštění výpočtu se obsah adresáře vymaže!). Body pro výpis výsledků.	2.8
bodové výstupy hydrogramů	vektor - body	Volitelný	Tabulka parametrů půdy a využití území. Názvy sloupců mají definované označení.	2.7
parametry půdy a využití území	tabulka	Povinný	Hodnoty se spojí s vektorovými vystavami. Prostorové rozložení hydrografické sítě. Atributová tabulka obsahuje identifikátor tvaru jednotlivých úseků.	2.4
hydrografická síť	vektor - linie	Volitelný	Tabulka parametrů jednotlivých úseků hydrografické sítě.	2.9
parametry úseků hydrografické sítě	tabulka	Volitelný	Výchozí formát výstupních rasterů je pro- prietární formát ERSL. Uživatel může zvo- lit textový formát ASCII.	—
volba arctgis výstupů	logická proměnná	Povinný		

Na lesních půdách je v České Republice standardně využíván popis kategorií podle klasifikace USDA³. Obrázek 7b 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 - manningův 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 10 v příloze A. Fyzikální význam těchto parametrů a jejich implementace v modelu jsou popsány v části I toho manuálu.

2.3 Data využití území

(@ @ @ pk - doplnit zdroje takových 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 7c. 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 [m] 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 7e 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

³United States Department of Agriculture

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

⁵Úzkořádkové plodiny jsou obiloviny nebo řepka.

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

Hlavíčka v tabulce	Symbol	Popis
k	k	nasycená hydraulická vodivost [ms^{-1}]
s	S	sorptivita půdy [$m\sqrt{s}$]
n	n	manningův součinitel drsnosti
pi	$IPOT$	potencionální intercepce [m]
ppl	$ILAI$	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 nevymílající rychlosť [m/s]

pro danou kombinaci typu půdy a využití území (třetí sloupec v tabulce na obrázku 7e s označením *soilveg*). Toto *id* je pak spojeno s vektorovou vrstvou na obrázku 7d, kde jsou spojeny *id* z průniku vektorových vrstev půdy 7b a využití území 7c. Tyto prostorově distribuované parametry jsou následně pro potřeby výpočtu uloženy do rastrů. Hodnoty jednotlivých parametrů pro různé půdní textury, které lze při výpočtu použít, jsou ukázány v tabulce 10 v příloze A). Hodnoty parametrů mají určitý rozptyl, proto se důrazně doporučuje provést jejich měření pro půdy na daném specifickém území.

Význam jednotlivých veličin je popsán v tabulce 2. Při přípravě dat je nutné dodržet označení parametrů v této tabulce!

2.5 Srážková data

Dalším vstupem je soubor obsahující srážková data. Srážky se zadávají jako textový soubor se dvěma sloupcí. V levém sloupci je časový interval v minutách v pravém sloupci je **kumulativní úhrn** za daný časový interval v **milimetrech**. Ukázka jednoduché srážky a grafické reprezentace kumulativních dat jsou zobrazeny na obrázku 8.

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-Lowy (*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 zjišťování 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 v kapitole 4.3.

2.8 Výstupní adresář

Do výstupního adresáře se uloží veškeré výstupy modelu. Na začátku běhu programu se obsah tohoto adresáře 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

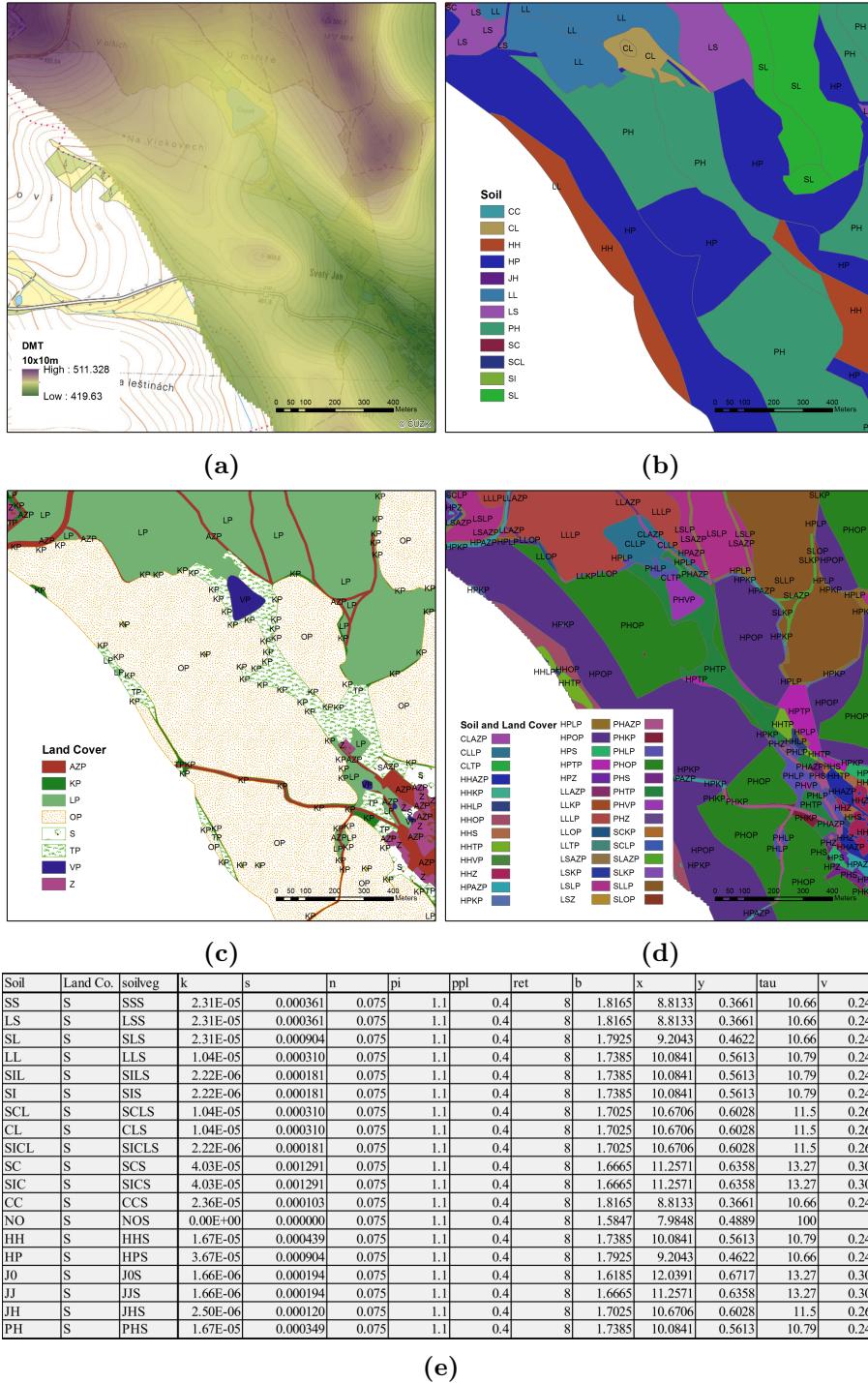
Hydrografickou sítí jsou myšleny nejen vodní toky, ale i prvky dočasné hydrografické sítě jako jsou příkopy, průlehy, cesty s příkopy a pod. Výpočet v modelu probíhá po jednotlivých úsecích pomocí Manningovy rovnice pro výpočet průtoku (popsané v části I). Prostorové umístění jednotlivých úseků je definované 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 A na obrázku 11.

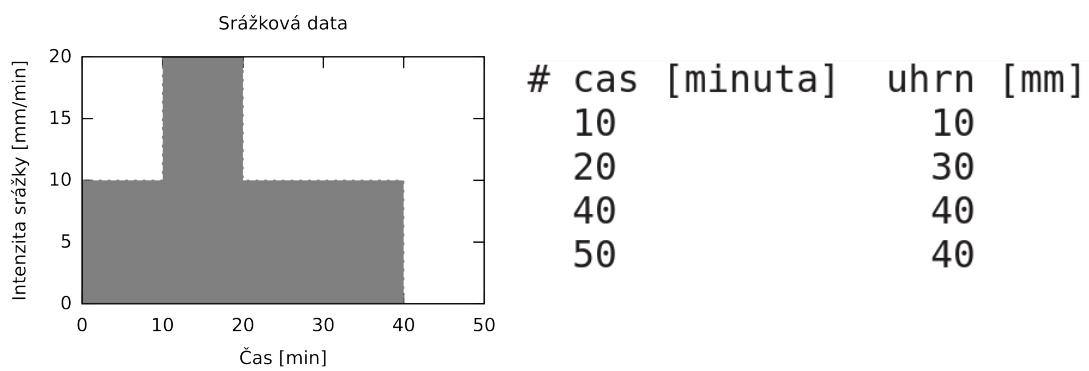
- kde b je šířka dna příčného profilu hydrografické sítě [m],
 m je poměr sklonu svahů (pro obdélník je roven nule),
 n je manningův součinitel drsnosti a
 Q_{365} je základní průtok [m^3/s].

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



Obrázek 7: Princip propojení vektorových vrstev s tabulkou obsahující parametry typu půd a využití území. Na obrázku a) je digitální model terénu a podkladová mapa. Na obrázku b) je rozložení typu půdy a na obrázku c) rozložení typu využití území. Tyto 2 vrstvy jsou protnuty (*intersect*). Nové polygony převezou označení z původních vrstev na obrázku b) a c). Tato nová vektorová vrstva je ukázána na obrázku d). Pomocí převzatých označení polygonů jsou k nim přiřazeny parametry typu půd a využití území z tabulky e)



Obrázek 8: Ukázka srážkových dat. Vlevo: grafická reprezentace zadaných dat (srážka zobrazena v intenzitách; Napravo: ukázka dat v požadovaném formátu)

3 Popis programu

Samotný program modelu SMODERP2D je rozdělen do několika podadresářů a souborů. Adresárová struktura s popisem nejdůležitějších adresářů a souborů je ukázána na obrázku 12 v příloze A. Klíčovým souborem je soubor `main.py`, kde se volají dvě základní metody z nichž jedna načte a připraví vstupní data a druhá spustí a provede výpočet. Dalším důležitým souborem je `src/data_preparation.py`, kde probíhá *preprocessing* vstupních dat (v této verzi modelu implementovaný pomocí ArcGIS). Důležitými soubory jsou rovněž soubory `src/runoff.py` a `src/time_step.py`, kde probíhá samotný výpočet. Soubory v adresáři `src/main_classes/` obsahují definici datových struktur jednotlivých řešených dějů a skládají dohromady metody k řešení jednotlivých částí odtoku. Tuto metody jsou pak definované v adresáři `src/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 13 v příloze A 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 $\sum_k^n o_{rill,k,t-1}^{in}$) v rovnici (3) nebo (11) do všech buněk ležících v daném úseku. Odtok je následně řešen Manningovou rovnicí.

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 13. Po dosažení konečného času dojde k uložení výsledných hodnot a ukončení programu. Pravidla *CFL* kritéria jsou popsána v kapitole 3.2 a implementována v souboru `src/courant.py`.

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 (?). Zajímavým balíčkem jazyka Python je `numpy` (?). Je to balíček užívaný pro vědecké výpočty. Umožňuje manipulaci s velkými multi-dimenzionálními 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.

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

Tabulka 4: Kritéria změny časového kroku vycházející z plošného odtoku

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

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 není stanoveno). S koncem podpory Python 2.7 končí i implementace této verze v gis softwarech. ArcGIS PRO již podporuje výhradně Python 3. 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: (@@@ neni 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]
 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.

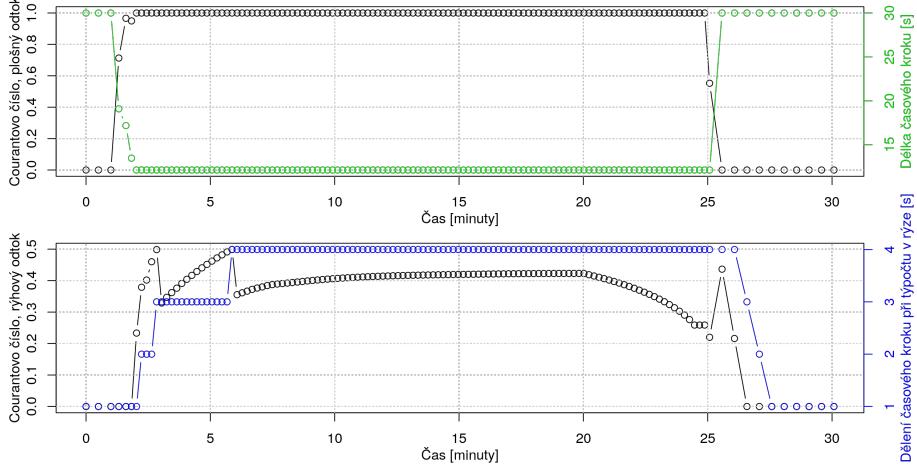
Soustředěný odtok v rýhách je zpravidla řádově rychlejší než plošný odtok. Pokud bychom v tomto případě uplatňovali stejný princip jako u plošného odtoku, časový krok by byl extrémně malý, čímž by se prodlužoval strojový čas výpočtu. K odtoku v rýhách většinou nedochází na celém území, ale pouze v poměrně 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

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

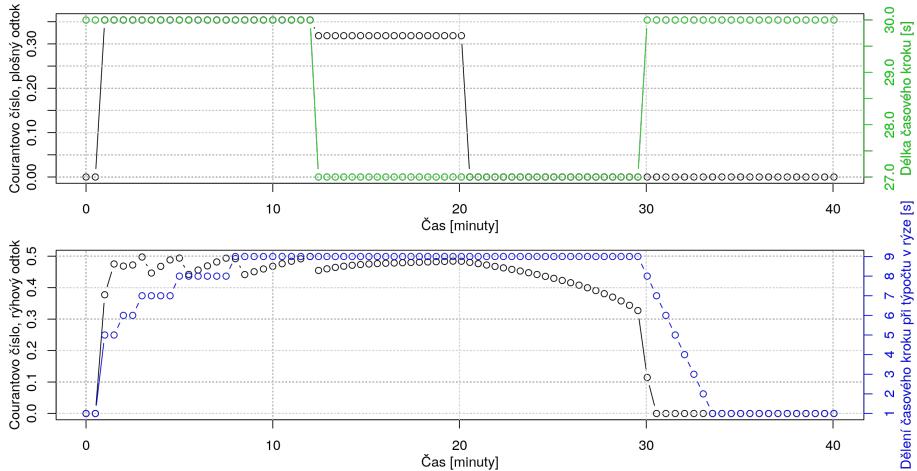
nové	$CFL_{rill} < 0.3$	$0.5 < CFL_{rill}$	$0.3 \geq CFL_{rill} \geq 0.5$ $\vee CFL_{rill} = 0.0$
$ratio$	$= MAX(ratio - 1; 1)$	$= MIN(ratio + 1; 9)$ pro $ratio = 10$	= původní $ratio$
Δt_{mult}	$= MIN((1/0.9)\Delta t_{mult}; 1)$	$= 0.9\Delta t_{mult}$	= původní Δt_{mult}
Δt		$= \Delta t\Delta t_{mult}$	

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} jsou shrnuta 5.

Obrázek 9 a 10 ukazují chování časového kroku v případě, že je řízen plošným obrázek 9 nebo soustředěným odtokem obrázek 10.



Obrázek 9: Časový krok řízen rychlosťí 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) délka časového kroku i $ratio$ vrátí na původní hodnoty.



Obrázek 10: Časový krok řízen rychlosťí 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) délka 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 spuštění 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 vypsáný v atributové tabulce vektorové vrstvy úseků (viz kapitola 4.2), prostorové rozložení jednotlivých úseků je uloženo také jako jeden s rastru (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). Další nadstandardní výstupy lze získat způsobem popsaným v příloze . 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 tři. Jedná se topologicky upravenou vrstvu 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 7. Tato vektorová vrstva slouží především ke kontrole správnosti přípravy vstupních dat či hledání chyb v nich. Při preprocessingu jsou z (nepovinné) bodové vrstvy pro zápis hydrogramů smazány body, které jsou mimo výpočetní oblast. Proto je ve výsledcích uložena vrstva s body, které jsou skutečné pro výpis hydrogramů použity. Tato bodová vrstva má název **pointsCheck**.

Tabulka 6: Přehled rastrových výstupů

Název souboru (ESRI nebo .acs)	Jednotka	Popis
cinfilt_m	m	Kumulativní infiltrace
crainf_m	m	Kumulativní srážka (bez intercepcie a povrchové retence)
csurvout_m3	m^3	Kumulativní objem odtoku z buňky
volrest_m3	m^3	Objem vody zbylé v buňkách po zkončení výpočtu
dmt	m	Výřez použitého digitálního modelu terénu
flowdir	NA	Rastr s uloženými směry odtoku
mshearstr_pa	Pa	Maximální tečné napětí
msurfl_m3_s	$m^3 s^{-1}$	Maximální celkový odtok v buňce
mvel_m_s	ms^{-1}	Maximální rychlosť proudění v buňce (plošného či soustředěného odtoku)
reachFID	NA	Označuje úseky toku (=fid + 1000), buňky s plošným odtokem (=0) a plošným i soustředěným odtokem (=1)
massbalance	m	Bilance všech vstupů a výstupu z a do buňky

4.3 Hydrogramy

Pokud jsou do vstupů zadány body pro výpis hydrogramů, vypíší se do textových souborů s příponou **.dat**. Vypsané veličiny jsou závislé na typu odtokového procesu. Popis vypsaných veličin při povrchovém odtoku je shrnut v tabulce 8. Pokud je v buňce úsek hydrografické sítě, vypisují se hodnoty tohoto celého úseku, přestože bod není na konci úseku. Názvy a význam veličin popisující úsek toku jsou popsány v tabulce 9. **(@@@ věta spis do prvni casi:)** 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. Název téhoto souboru je odvozen z FID upravené bodové vrstvy **pointsCheck** ve tvaru **pointpointsCheck:FID.dat**.

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 hydrogramů mimo úsek hydrografické sítě

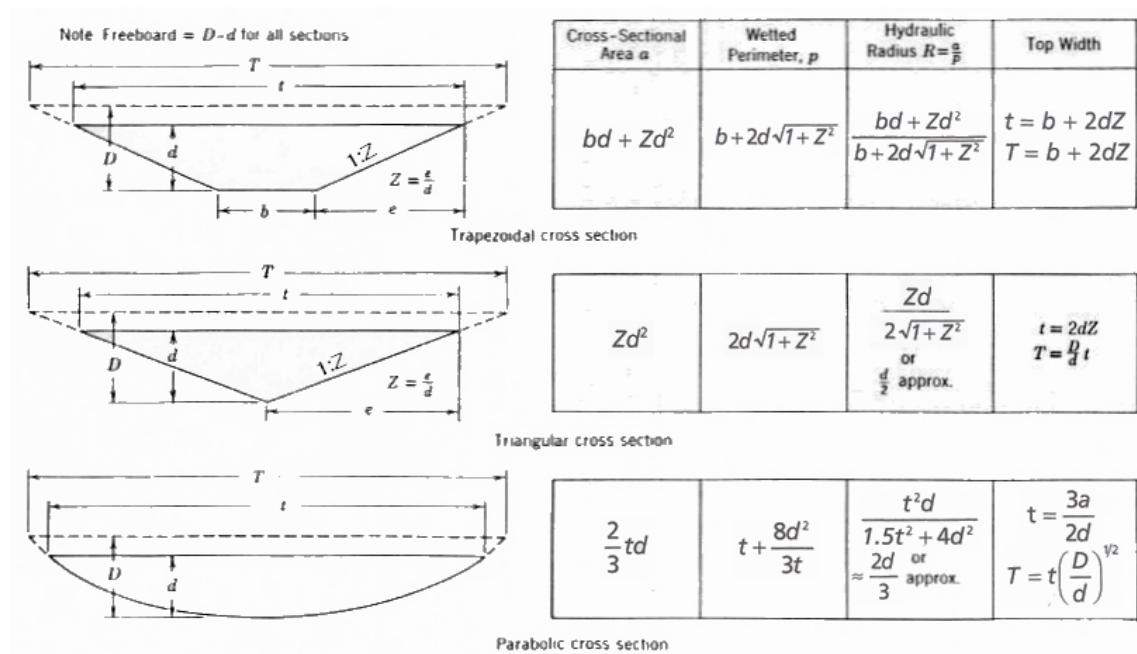
Název sloupce	Jednotka	Popis
time[s]	s	Čas od začátku simulace
deltaTime[s]	s	Aktuální délka časového kroku
rainfall[m]	m	Srážková výška v aktuálním časovém kroku
totalWaterLevel[m]	m	Celková výška hladiny
surfaceFlow[m ³ /s]	$m^3 s^{-1}$	Celkový průtok (plošný + soustředěný)
surfaceVolRunoff[m ³]	m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

Tabulka 9: Popis veličin hydrogramů v úsecích hydrografické sítě

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

A Příloha: doplňující tabulky a grafy



Obrázek 11: Tvary příčných průřezů úseků hydrografické sítě a použité vztahy na výpočet hydraulického poloměru

Tabulka 10: Nahrnuté kritické hodnoty hodnoty třetího 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	6.940E-06	9.746E-05	1.817E+00	8.813E+00	3.661E-01	1.066E+01	2.450E-01
medium	MF	1.390E-06	1.291E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
medium fine	MF	2.640E-07	1.162E-04	1.793E+00	9.204E+00	4.622E-01	1.066E+01	2.450E-01
fine	FF	2.780E-06	4.746E-05	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
very fine	VF	1.670E-06	1.291E-04	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
sand	SS	1.000E-06	1.291E-04	1.817E+00	8.813E+00	3.661E-01	1.066E+01	2.450E-01
loamy sand	LS	1.000E-06	1.291E-04	1.817E+00	8.813E+00	3.661E-01	1.066E+01	2.450E-01
sandy loam	SL	5.140E-06	9.746E-05	1.793E+00	9.204E+00	4.622E-01	1.066E+01	2.450E-01
loam	LL	1.670E-06	1.291E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
silt loam	SIL	1.390E-07	1.033E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
silt	SI	1.670E-07	1.033E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
sandy clay loam	SCL	5.140E-06	9.746E-05	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
clay loam	CL	1.940E-06	4.746E-05	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
silty clay loam	SICL	1.670E-07	1.033E-04	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
sandy clay	SC	5.140E-06	9.746E-05	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
silty clay	SIC	1.940E-06	4.746E-05	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
clay	CC	1.940E-06	4.746E-05	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
nosoil	NO	0.000E+00	0.000E+00	1.585E+00	7.985E+00	4.889E-01	1.000E+02	3.000E+00
hlinitá	HH	1.670E-06	1.291E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
hlinitopísčitá	HP	3.670E-06	7.746E-05	1.793E+00	9.204E+00	4.622E-01	1.066E+01	2.450E-01
jíl	J0	1.660E-07	1.033E-04	1.619E+00	1.204E+01	6.717E-01	1.327E+01	3.050E-01
jílovitá	JJ	1.660E-07	1.033E-04	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
jílovitohlinitá	JH	2.500E-07	1.162E-04	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
písčitohlinitá	PH	1.670E-06	1.291E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
písčitá	PP	1.670E-05	1.936E-04	1.817E+00	8.813E+00	3.661E-01	1.066E+01	2.450E-01

```

smoderp2d/
└── main.py ..... Hlavní skript volající ostatní. Upravuje / kontroluje formát vstupních parametrů.

src/
    └── flow_algorithm/ ..... Adresář obsahuje metody pro práci s odtokovými algoritmy.

    ├── io_functions/ ..... Adresář obsahuje metody pro I/O (vstup/výstup) operace.

    ├── main_classes/ ..... Adresář obsahuje hlavní datové struktury modelu.

    ├── processes/ ..... Adresář obsahuje metody pro výpočet jednotlivých procesů (odtok, aktuální srážka atd).

    ├── stream_functions/ ..... Adresář obsahuje metody pro preprocessing úseků hydrografické sítě a výpočet jednotlivých geometrií příčného profilu.

    ├── tools/ ..... Adresář obsahuje obecné nástroje, které přímo nesouvisí s řešenými procesy nebo výpočtem.

    ├── constants.py ..... Soubor obsahuje proměnné s pořadím jednotlivých parametrů pro načítání z ArcGIS toolboxu.

    ├── courant.py ..... Soubor obsahuje definici třídy pro správu délky časového kroku.

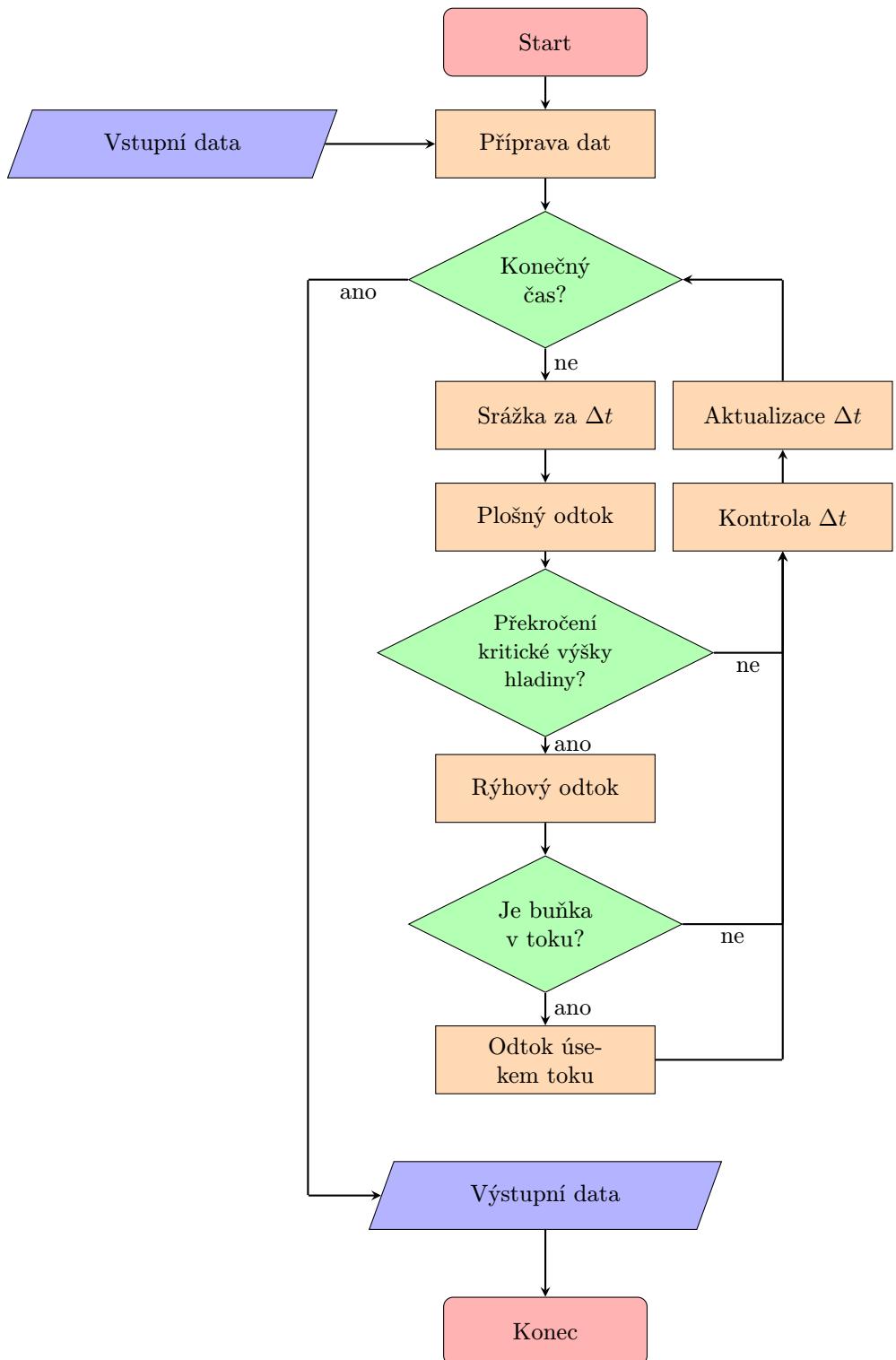
    ├── data_preparation.py ..... Soubor obsahuje metodu pro preprocessing většiny vstupních dat s využitím balíčku arcpy.

    ├── runoff.py ..... Soubor obsahuje hlavní metodu run(), která obsahuje výpočetní časovou smyčku.

    └── time_step.py ..... Soubor obsahuje postup výpočtu jednoho časového kroku.

```

Obrázek 12: důležité soubory a adresáře modelu SMODERP2D



Obrázek 13: Flow chart toku programu

B Příloha: další výstupy

Rozsah výstupních souborů, které jsou popsané v kapitole 4, může být v určitých případech nedostatečný. Obecně mohou být tyto případy dva. V prvním případě je jejich rozsah nedostatečný z hlediska efektivního hledání chyb ve vstupních datech. V druhém případě vyžaduje samotná aplikace modelu detailnější vhled do řešených procesů (například při vědeckých aplikacích). Proto existuje v modelu SMODERP2D možnost detailnějších výpisů.

Při běhu *preprocessingu* jsou ukládány dočasné vrstvy do adresářů `temp` a `temp_dp` (pokud jsou řešeny i úseky hydrografické sítě). Tyto adresáře jsou ve výchozím nastavení smazány na konci výpočtu. Dále pak je možné získávat detailnější informaci vypisovanou do hydrogramů a více výstupních rastrů souborů s dalšími veličinami.

Pro získání těch detailnějších výsledků je třeba změnit jeden z parametrů modelu. Tento parametr je nejvíce využívána při vývoji modelu a proto se zadává v jednom ze zdrojových skriptů modelu.

V hlavním souboru v balíčku SMODERP2Dsmoderp2d/main.py se volají metody ke načtení vstupních dat, *preprocessingu* a k spuštění samotného výpočtu. V tomto souboru je metoda `run()`. V těle této metody je *if*-konstrukt, který určí princip načtení vstupních dat na základě platformy na, které je model spuštěn.

```
51  if platform.system() == "Linux" :
52      from smoderp2d.src.main_classes.General import initLinux
53      init = initLinux
54  elif platform.system() == "Windows" :
55      from smoderp2d.src.main_classes.General import initWin
56      init = initWin
57      sys.argv.append('#')                      # mfda
58      sys.argv.append(False)                   # extra output
59      sys.argv.append('outdata.save')        # in data
60      sys.argv.append('full')                  # castence nee v arcgis
61      sys.argv.append(False)                 # debug print
62      sys.argv.append('-')                   # print times
63  else :
64      from smoderp2d.src.main_classes.General import initNone
65      init = initNone
```

Na řádku 58⁷ je přidaná proměnná s hodnotou `False` a s komentářem `# extra output`. Pokud je tato proměnná změněna na `True` nebude se mazat dočasné adresáře a hydrogramy a výstupní rastry budou doplněny o další proměnné.

⁷číslování řádků se může lišit

Seznam použitých zdrojů

Reference

- Cabík, J., J. K. (1963), *Protierozní ochrana půdy*.
- Dýrová E. (1984), *Ochrana a organizace povodí. Návody ke komplexnímu projektu a diplomičnímu 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>