
SMODERP2D - UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA

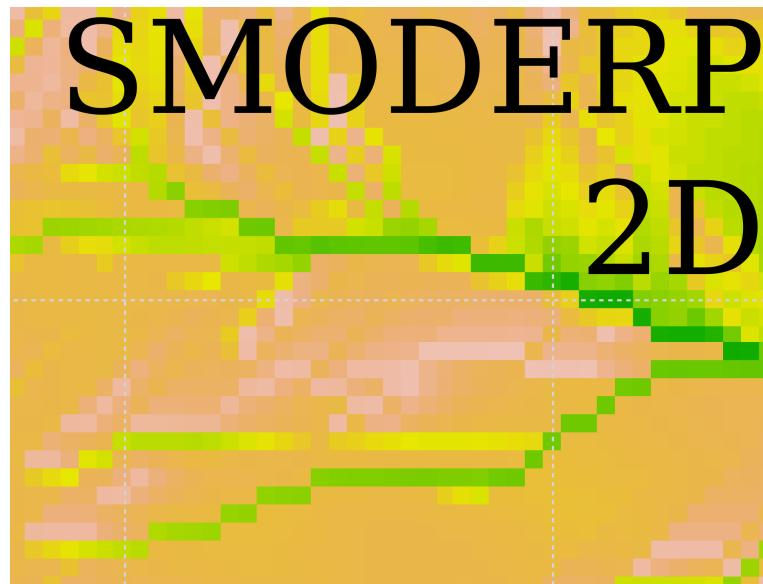
SIMULAČNÍ MODEL POVRCHOVÉHO ODTOKU A EROZNÍHO PROCESU

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	8
2.4 Poznámka nebo to dát do diskuse k článku	9
3 Odtok hydrografickou sítí	9
II Použití modelu	11
1 Vstupy do modelu	12
1.1 Digitální model terénu	12
1.2 Půdní data	14
1.3 Data o využití území	14
1.4 Tabulka parametrů půdy a využití území	15
1.5 Srážkový soubor	16
1.6 Časový krok modelu a celková doba simulace	17

1.7	Shapefile bodů pro generování hydrogramů	17
1.8	Výstupní adresář	17
1.9	Rýhový odtok	18
1.10	Vícesměrný odtok	18
1.11	Hydrografická síť	18
2	Tok programu	18
2.1	Programovací jazyk Python	21
2.2	CFL podmínka - řešení nestability výpočtu	21
3	Výstupy z modelu	22
3.1	Rastrové výstupy	25
3.2	Hydrogramy	27
3.3	Tabulka hodnot úseků	27
3.4	State - typ průtoku na buňce	28
III	Ukázka výsledků	31
Příloha	32
.1	asdf	32
Seznam použitých zdrojů		34

Seznam zkratek

a	parametr MKWA	O^{in}	přítok ze sousední buňky za čas [m^3/s]
A	průtočná plocha [m^2]	o^{in}	výška vtoku za čas [m/s]
b	parametr MKWA	o_{rill}^{in}	výška vtoku v rýze za čas [m/s]
b_{rill}	šířka rýhy [m]	O^{out}	odtok z buňky za čas [m^3/s]
CFL	Courant-Friedrich-Lewy podmínka	o^{out}	výška odtoku z buňky za čas [m/s]
$D8$	jednosměrný odtokový algoritmus	o_{rill}^{out}	výška odtoku v rýze za čas [m/s]
Δt	časový krok [s]	O	omočený obvod [m]
Δt_{max}	maximální časový krok [s]	I_{POT}	potencionální intercepce
Δt_{mult}	multiplikátor časový krok [-]	q_{rill}	průtok v rýhách [m^3/s]
Δx	prostorový krok [m]	q_{sur}	specifický plošný průtok [m^2/s]
$\frac{dS}{dt}$	změna zásoby [m^3/s]	q_{stream}	průtok v otevřeném korytě [m^3/s]
ES	efektivní srážka [m^3/s]	R_{rill}	hydraulický poloměr v rýze [m]
es	intenzita efektivní srážky [m/s]	R_{stream}	hydraulický poloměr v otevřeném korytě [m]
l_{eff}	efektivní vrstevnice [m]	ret	povrchová retence [m]
h_{crit}	kritická hloubka [m]	ρ	hustota [kg/m^3]
h_{rill}	hloubka rýhy [m]	$rill_{ratio}$	parametr tvaru rýhy [-]
h_{sur}	výška hladiny na povrchu [m]	$ratio$	celočíselný faktor dělící časový krok při výpočtu rýhového odtoku
k	nasycená hydraulická vodivost [ms^{-1}]	S	sorptivita půdy [$m\sqrt{s}$]
Inf	infiltrované množství [m^3/s]	S_i	sorptivita půdy v buňce i [$m\sqrt{s}$]
inf	intenzita infiltrace [m/s]	τ_{sur}	tečné napětí [Pa]
I_{tot}	celkový přítok za čas [m^3/s]	τ_{crit}	kritické tečné napětí [Pa]
I	sklon [-]	V_{out}	objem objem odtekého [m^3]
K	součinitel šírky (pro plošný odtok $K = 1$)	V_{crit}	objem vody do kritické hladiny [m^3]
K_i	nasycená hydraulická vodivost v buňce i [m/s]	v_{rill}	rychllosť proudění - rýhový odtok [m/s]
I_{LAI}	poměrná plocha listová	V_{rill}	objem vody v rýze v daném elementu [m^3]
l_{rill}	délka rýhy [m]	v_{sur}	rychllosť proudění - plošný odtok [m/s]
$mfda$	vícesměrný odtokový algoritmus	V_{tot}	celkový objem vody v elementu [m^3]
n	mannigův součinitel drsnosti	v_{crit}	kritická nevymílací rychlosť [m/s]
PS	potenciální srážka [m]	X	parametr MKWA
O_{tot}	odtokové množství za čas [m^3/s]		

Y parametr MKWA

P plocha buňky [m^2]

g gravitační zrychlení [m/s^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 modelu se jedná o fyzikálně založený plně distribuovaný dvourozměrný model epizodní model. Nově zavedené prostorové řešení (2D), které nahradilo dřívější profilovou verzi modelu, umožňuje komplexní řešení a náhled na celou řešenou lokalitu. Dvourozměrné řešení je z hlediska vstupních dat a vnitřních procesů složitější, nicméně benefity distribuovaného řešení převažují. Dostupnost vstupních dat v podrobném rozlišení se zlepšuje, stejně tak jako se zvyšuje výpočetní 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 je rozdělen na tři základní části. V první části jsou uvedeny výpočtové vztahy a popis jednotlivých zvolených procesů. Druhá část je věnována vstupním a výstupním datům a je zde stručně popsán tok programu. V třetí části jsou ukázány výsledky při řečení konkrétní lokality. Případné aktualizace modelu, vzorová data, ukázky využití a další informace jsou pak průběžně poskytovány na stránkách modelu (storm.fsv.cvut.cz/cinnost-katedry/volnestazitelne-vysledky/smoderp/).

Část I

Popis řešení

Tato část manuálu popisuje jednotlivé výpočetní vztahy použité v modelu. 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 III tabulka 9).

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 za daný časový krok. Směr odtoku z buňky je stanoven pomocí odtokových algoritmů. Formálně se jedná o metod konečných diferencí a explicitně řešeno časocou 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 typy povrchového odtoku. Mimo hydrografickou síť se jedná o **plošný povrchový odtok** nebo **soustředěný odtok v rýhách**. Ve vodních tocích a dočasné hydrografické síti se pak jedná o 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 vztahem řešení je bilance celkového zásoby v elementu.

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

kde $\frac{dS}{dt}$ je změna zásoby [m^3/s],
 I_{tot} je celkový přítok za čas [m^3/s],
 O_{tot} je odtokové množství za čas [m^3/s].

Podle složek povrchového odtoku lze I_{tot} a O_{tot} v rovnici (1) rozepsat podle složek povrchového odtoku použitých v modelu Smoderp2D

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

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

kde O^{in} je přítok ze sousední buňky za čas [m^3/s],
 O^{out} je odtok z buňky za čas [m^3/s],
 ES je efektivní srážka [m^3/s],
 Inf je infiltrované množství [m^3/s].

Bilanční rovnici pro každou 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 .

Toto m se liší podle použitého odtokového algoritmu jednosměrného $D8$ nebo více-směrného $mfda$ (*multi-flow direction algorithm*). 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 se jedná o epizodní model je srážka zadávána 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 výpočtovém čase je definována pomocí poměrné plochy listové I_{LAI} například .

Označme množství srážky který dopadá na povrch půdy i plodiny během Δt potenciální srážkou PS . Část PS , která zůstane v časovém kroku na rostlinách 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

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

V modelu je rovněž zahrnuta intercepční kapacita I_{POT} , která během začátku srážky naplňuje. Výsledná intenzita efektivní srážky v čase t je par určena jako

$$es_t = MAX(0; \sum_{\bar{t}=t_{init}}^t (PS_{\bar{t}}(1 - I_{LAI})) - I_{POT}) / \Delta t,$$

kde PS je potenciální srážka [m],
 I_{LAI} je poměrná plocha listová,
 I_{POT} je potencionální intercepce a
 $\sum_{\bar{t}=t_{init}}^t$ 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):

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

kde inf je intenzita infiltrace [m/s],
 S_i je sorptivita půdy v buňce i [$m\sqrt{s}$] a
 K_i je nasycená hydraulická vodivost v buňce i [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 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 Smoterp2D 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 kinematického přístupu řešení pohybové rovnice ,

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

kde q_{sur} je specifický plošný průtok [m^2/s],

a je parametr MKWA a

b je parametr MKWA.

Parametr a je řešený podle vztahu:

$$a = XI^Y,$$

kde X je parametr MKWA,

Y je parametr MKWA 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 9 v příloze III. 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

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

kde n je manningův součinitel drsnosti.

Odteklá resp. přiteklá výška je pak dopočítána jako

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

kde Δx je prostorový krok [m] a
 P je plocha buňky [m^2].

2.1.1 Odvozené veličiny

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

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

kde V_{out} je objem objem odtelkého [m^3] a
 l_{eff} je efektivní vrstevnice [m].

Efektivní vrstevnice l_{eff} je nejdelší vzdálenost přes buňku rastru rovnoběžnou s vrstevnicí. Směr odtoku je na tuto vrstevnici kolmý, jedná se tedy o průměr průtočné plochy mezi buňkami ve směru toku.

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 vody, která na jejím povrchu proudí. Je několik způsobů jak tento moment určit. V modelu Smoderp2D jsou implementovány dva způsoby odvození: překročením kritického tečného napětí nebo překročením nevymílací rychlosti. Z obou odvození je určena kritická výška hladiny povrchového odtoku po jejímž překročení začne vznikat rýha.

Tečné napětí dále využívané v modelu pak uvažuje výpočet tak, jak jej uvádí například (Schwab 1993)

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

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 odtok $K = 1$).

Vznik rýhy je také považován za limitní z hlediska erozní ohroženosti. Umístění prvků protierozní ochrany by mělo být vedeno tak, aby nedocházelo ke vzniku rýh. Limitní hodnoty krajních nevymílacích rychlostí a tečných napětí pro jednotlivé půdní druhy v závislosti na druhu vegetace jsou převzaty z předchozích verzí modelu (Dýrová E. 1984) a jsou uvedeny v tabulce. V literatuře se setkáme i s odlišnými hodnotami. Například M. A. Velikanov stanovil krajní nevymírající rychlosť pro půdy 0.24 m/s (Cabík 1963), což je hodnota nižší, než kterou stanovila E. Dýrová.

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

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

kde h_{crit} je kritická hloubka [m] a
 v_{crit} je kritická nevymílací rychlosť [m/s].

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

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

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

Pro každou buňku výpočetní oblasti je spočítáno h_{crit} z obou odvození (8) a (9). Model následně vybere menší z hodnot, která je pak pří výpočtu použita jako kritérium pro vznik rýhy. Nevymílací rychlosť proudění a kritické tečné napětí jsou vstupní parametry modelu. Návrh hodnot pro model Smoderp2D je ukázán v tabulce 10 v příloze III.

2.2 Soustředěný odtok v rýhách

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

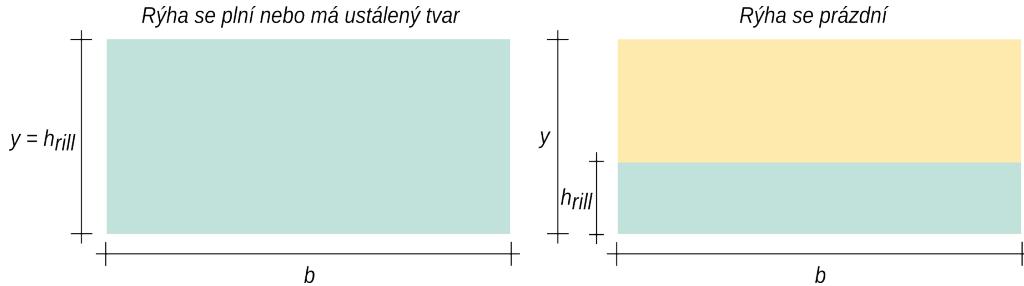
- Zavedení stejných zjednodušujících předpokladů výpočtu proudění jako v případě výpočtu plošného povrchového odtoku, přestože se nejedná o výpočet proudění o zanedbatelně malé hloubce. Předpokladem je, že se tok ve všech časech a ve všech buňkách vždy dostane do ustáleného, tedy že se vždy jedná o ustálené proudění. Při ustáleném proudění se předpokládá sklon dna I paralelní sklonu hladiny vody v rýze a drsnost neměnná v celé délce buňky. Průtok v rýze je tedy vyjádřen použitím 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].

- Soustředěný odtok vzniká v buňkách, kde dojde k překročení kritické výšky hladiny h_{crit} (viz 2.1.2), která je spočtena pro každou buňku na základě hodnot kritického tečného napětí nebo kritické nevymílací rychlosť podle vzorců (8) a (9).
- Objem vzniklé rýhy odpovídá nadkritickému objemu vody V_{rill} , který vychází ze vztahu:

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



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

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 kritická hloubka [m].

- Další z zjednodušením je tvar příčného profilu rýhy, který je v modelu reprezentován obdélníkem, s pevným poměrem stran $rill_{ratio} = \text{výška}/\text{šířka rýhy}$. Velikost rýhy se zvětšuje pokud je nadkritické množství V_{rill} větší než objem samotné rýhy, tak aby byl splněn předpoklad v předchozím bodě. Při zvětšovaná rýhy se tedy výška rýhy rovná výšce 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, ale velikost rýhy zůstává konstantní (vpravo na obrázku 1). Dochází pouze k poklesu hladiny. Hydraulický poloměr rýhy, která se zvětšuje nebo je konstantní, lze určit podle následujícího vztahu:

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

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

Hydraulický poloměr rýhy, kde hladina oproti výšce rýhy klesá, se určuje jako

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

Výška odtoku (resp. vtoku) z rýhy je vypočtena za základě Chézyho rovnice 10 takto:

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

kde l_{rill} je délka rýhy [m].

2.3 Celková bilance

Pokud dojde k vzniku rýh, rovnici celkové bilance 3 je možné rozepsat členy vyjadřující přítok a odtok odděleně pro **plošný povrchový** a **soustředený** odtok v Rovnici 3 vypadá

následovně

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

kde o^{in}_{rill} je výška vtoku v rýze za čas [m/s] a

o^{out}_{rill} 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

Smoper2D je zamýšlen také jako nástroj pro navrhování opatření v ploše povodí. Cílem je simulovat 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 (sít vodních toků, příkopy, průlehy, atp.) jsou zadávány v rámci jednoho shapefile. Každý jednotlivý úsek je zadán jako konkrétní linie (feature). Výpočetně model pracuje v rasterové 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 uvedeny v příloze III v tabulce na obrázku 9. Model Smoterp2D 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 1.11 tohoto manuálu.

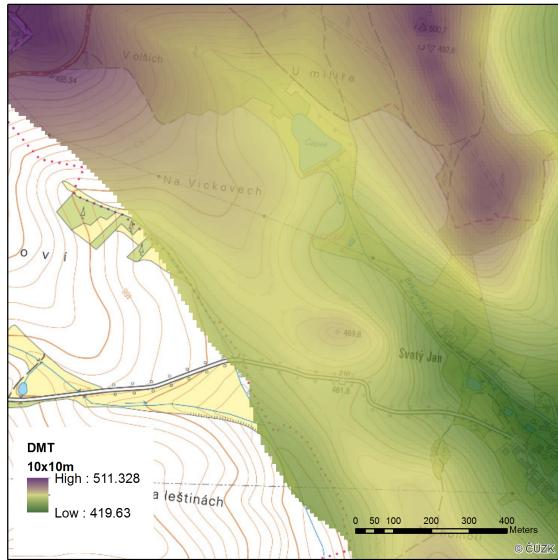
Objem vody, který teče mezi jednolivými úsekům hydrografické sítě je určen jednoduše jako

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

Část II

Použití modelu

Model SMODERP 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 1), tok programu (kapitola 2) a výstupy z modelu (kapitola 3).



Obrázek 2: Výřez digitálního modelu terénu povodí Býkovice

1 Vstupy do modelu

Vstupní data modelu jsou 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 attributové tabulce pod specifickým názvem pole. V následujícím textu jsou popsány náležitosti vstupních dat. Přehled vstupů do modelu je ukázán v tabulce 1.

1.1 Digitální model terénu

Rastr digitálního modelu terénu nebo také DMT, či anglicky DTM (Digital Terrain Model) je souvislý povrch území obvykle znázorňující morfologii určité části Země. DMT rastr je složen z jednotlivých buněk. Nejčastější formou jsou buňky čtvercové, ale mohou mít i jiný tvar. 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. Důležitá je i celková rozloha rastru, tedy počet buněk. Model byl testován na rastrech o velikosti od několika málo tisíc buněk. DMT jednoho z testovacích, povodí Nučice, obsahuje přes 125 tisíc buněk. Příklad DMT dalšího testovacího povodí Býkovice je ukázán na obrázku 2.

Tabulka 1: Tabulka s přehledem vstupních dat modelu

Název	Typ dat	Povinný / volitelný	Poznámka	Více v kapitole
digitální model terénu	raster	Povinný	Tento vrstvou se řídí i prostorová diskre-	1.1
prostorové rozložení půd	vektor - polygony	Povinný	tizace V atributové tabulce identifikátor typu půdy	1.2
prostorové rozložení typu vegetace	vektor- polygony	Povinný	V atributové tabulce identifikátor typu vegetace	
strážková data	.txt soubor	Povinný	Kumulativně zadaná strážka	1.5
maximální časový krok	reálné číslo	Povinný	Model mění délku časového podle odtokových podmínek; doporučuje se 30 - 60 sekund	1.6
výstupní adresář	text	Povinný	Adresář k uložení výsledků (při spuštění výpočtu se obsah adresáře vymaže!)	1.8
bodové výstupy hydrogramů	vektor - body	Volitelný	Body pro výpis výsledků	1.7
typ výpočtu	text	Povinný	Uživatel má na výběr: pouze plošní odtok, plošný i rýhový odtok, plošný, rýhový odtok i odtok hydrografickou sítí	1.9
volba výcesměrného odtoku	logická proměnná	Povinný	Jednosměrný (výchozí) nebo vícesměrný odtok	1.10
parametry půdy a vegetace	tabulka	Povinný	Tabulka parametrů půdy a vegetace. Názvy sloupců mají definované označení.	1.4
hydrografická síť	vektor - linie	Volitelný	Hodnoty se spojí s vektorovými vrstvami. Prostorové rozložení hydrografické sítě.	1.11
parametry hydrografické sítě	tabulka	Volitelný	Atributová tabulka obsahuje identifikátor tvaru jednotlivých úseků.	
volba arcgis výstupů	logická proměnná	Povinný	Tabulka parametrů jednotlivých úseků hydrografické sítě	1.11
			Výchozí formát výstupních rastrů je proprietární formát ERSL. Uživatel může zvolit textový formát ASCII.	—

1.2 Půdní data

Datové zdroje vlastností půd jsou v rámci České Republiky roztržtěné. Model Smoderp2D pracuje s jednou vstupní vrstvou půd. Příprava této vrstvy z dostupných dat je otázkou preprocessingu a spojení relevantních zdrojů. V zásadě jsou tři základní dostupné datové zdroje půdních vlastností. Odděleně připravená data na zemědělské a lesní půdě nebo bezešvá vrstva půd KPP odpovídající měřítku 1:200000.

V České Republice se na zemědělské půdě standardně využívá rozdělení podle Novákovi klasifikace. Půda je rozdělena podle obsahu tzv. jílových částic na půdy ? :

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

Na lesních půdách je v České Republice standardně využíván popis kategorií podle klasifikace USDA. Obrázek 3b 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 používané modelem patří: k - nasycená hydraulická vodivost $[ms^{-1}]$; S - sorptivita půdy $[m\sqrt{s}]$; n - mannigův součinitel drsnosti, a - parametr MKWA, b - parametr MKWA, X - parametr MKWA, Y - parametr MKWA. Hodnoty těchto parametrů jsou definované v tabulce, která popsána v kapitole 1.4, v atributové tabulce je připraven pouze identifikátor daného polygonu. Fyzikální význam těchto parametrů a jejich implementace v modelu jsou popsány v části I toho manuálu.

1.3 Data o využití území

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 širokořádkové¹

¹Širokořádkové plodiny jsou například brambory, kukuřice, řepa, sója a slunečnice.

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

Hlavička v tabulce	Popis
k	nasycená hydraulická vo- divost [$m s^{-1}$]
s	sorptivita půdy [$m \sqrt{s}$]
n	mannigfův součinitel drs- nosti
pi	potencionální intercepce
ppl	poměrná plocha listová
ret	povrchová retence [m]
b	parametr MKWA
x	parametr MKWA
y	parametr MKWA
tau	tečné napětí [Pa]
v	rychlosť proudění - plošný odtok [m/s]

- zemědělské plodiny úzkořádkové²

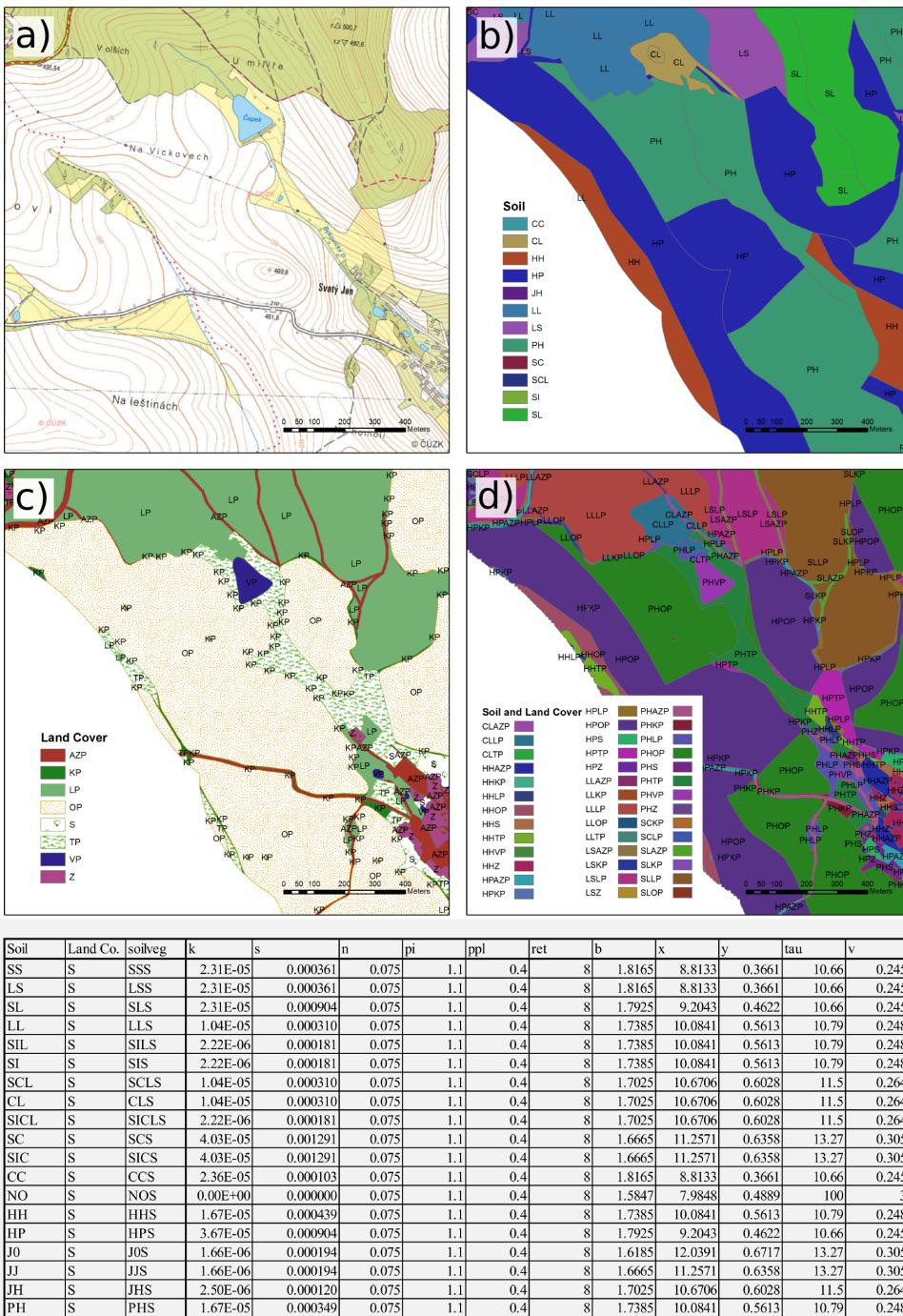
Shapefile popisující využití území je na obrázku 3c. Obdobně jako u půd v předchozí sekci je třeba atributovou tabulkou tohoto shapefilu doplnit o identifikátor daného využití území. Tento identifikátor odkazuje na charakteristiky daného povrchu definované v dalším vstupech (popsáno v sekci 1.4). Parametry, související s využitím území, které vstupují do modelu jsou zejména I_{POT} - potencionální intercepce a I_{LAI} - poměrná plocha listová. Jejich konkrétní použití je popsáno v části I toho manuálu.

1.4 Tabulka parametrů půdy a využití území

Tento 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 v atributových tabulkách polygonových vrstev. Tato tabulka může být do modelu vložena jako textový soubor. Na obrázku 3e 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 3e s označením soilveg). Význam jednotlivých veličin je popsán v tabulce 2. Při přípravě dat je nutné dodržet označení parametrů!

Na obrázku 3 jsou i ukázky jednotlivých vektorových vrstev před (obrázek 3b a 3c) a po protnutí (intersect; obrázek 3d).

²Úzkořádkové plodiny jsou obiloviny nebo řepka.



Obrázek 3: Princip propojení vektorových vrstev s tabulkou obsahující parametry typu půdy a vegetace.
 a): mapa daného území; b): rozložení typu půdy; c): rozložení typu vegetačního pokryvu; d): protnutí obou předchozích vrstev; e): tabulka s parametry

1.5 Srážkový soubor

Dalším vstupem je textový soubor obsahující srážková data. Srážky se zadávají jako textový soubor se dvěma sloupcí. V levém je časový interval v minutách v pravém **kumu-**

#	cas [minuty]	úhrn [mm]
10		3
60		43
70		43

Obrázek 4: Ukázka srážkových dat. V intervalu 0 - 10 minut je úhrn 3 mm, v intervalu 10 - 60 minut je úhrn 40 mm a v intervalu 60 - 70 úhrn 0 mm

lativní úhrn za daný časový interval v **milimetrech**. Například hodnoty na obrázku 4 ukazují, že za prvních 10 minut běhu modelu napří na každou buňku rastru 3 mm, v období 10 - 60 minut 40 mm a od 60. minut je srážka 0 mm.

1.6 Časový krok modelu a celková doba simulace

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 je v průběhu výpočtu upravován podle Courantovy podmínky, tak aby bylo zachována numerická stabilita explicitního řešení. Velikost 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 kde by v tom příkladě Courantova kritérium povolovalo příliš velký časový krok. Zvolené řešení změn časového kroku je detailněji popsáno v kapitole 2.2.

Délka běhu modelu je hodnota v minutách určující čas, do kterého se model po jednotlivých časových krocích dostane a skončí. Volba délky běhu modelu by měla dostatečně dlouhá, tak aby odtekla veškerá voda z řešeného území, především při zjišťování celkového objemu odtoku.

1.7 Shapefile bodů pro generování hydrogramů

Jedná se o bodovou vrstvu. V této bodech se budou uživateli ukládat časové řady počítaných veličin. Tento volitelný vstupní parametr je podrobněji popsán ve výstupech 3.2.

1.8 Výstupní adresář

Výstupní adresář je složka, do které se uloží veškeré výsledné rastry a výstupní textové soubory. 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 uložena důležitá data!

1.9 Rýhový odtok

Tento volitelný parametr po zaškrnutí umožní výpočet soustředěného odtoku. Soustředěný odtok je popsán v sekci 2.2.

1.10 Vícesměrný odtok

Parametr volby vícesměrného odtoku je volitelný. Více o tomto typu odtoku je v části ??

1.11 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. Prostorové umístění jednotlivých prvků je formou shapefile (**Vrstva toků - Stream feature**). Jednotlivé vektory reprezentují úsek se stejnými charakteristikami. Tvar úseku, drsnost, základní průtok jsou pak zadávány pomocí externí tabulky kde jsou uvedeny charakteristiky pro jednotlivé typy úseků (**Tabulka vodních toků - Stream table**). Pro propojení prostorové informace s charakteristikami úseků je třeba mít v atributové tabulce shodný kód jako ve vrstvě vodních toků (**Kód vodních toků - Steam table code**).

2 Tok programu

Samotný program je rozdělen do několika podadresářů a souborů. Adresářová struktura s popisem nejdůležitějších adresářů a souborů je ukázána na obrázku 5. Klíčový soubory je `data_preparation.py`, kde je proveden *preprocessing* vstupních dat. Dalšími důležitými souborem jsou soubory `runoff.py` a `time_step.py` zde je samotné řešení modelu. Soubory v adresáři `main_clasess/` obsahují definici datových struktur jednotlivých řešených dějů a skládají dohromady metody k řešení jednotlivých dějů modelu. Tuto metody jsou pak definované v adresáři `processes/`.

Program SMODERP 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 geodatami³. Programy či skripty napsané pomocí Python jsou spustitelné v prostředí daných GIS softwarů. Současná verze modelu SMODERP používá Python 2.7.X, který je kompatibilní s ArcGIS 10.X.

Na obrázku 8 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 rýhový odtok. Bilanční rovnice je rozšířena (rovnice 11). Pokud je řešená buňka tok, načítá se celkový přítok $\sum_j^m o^{in}_{j,t-1}$ (případně $\sum_k^n o^{in}_{rillk,t-1}$) v rovnici 3 (11) do daného úseku toku, kde se odtok řeší pomocí Chezyho rovnice.

³knihovna arcpy pro ArcGIS či knihovny grass.script pro GRASS GIS

Pokud v daném časovém kroku překročí rychlosť v jakékoli buňce Courantovo kritérium dojde ke zmenšeniu časového kroku a výpočet sa v daném kroku opakuje. Pokud je Courantovo kritérium nízké, je možné časový krok zvýšiť. To odpovedá kontrole a aktualizaci časového kroku v diagramu na obrázku 8. Po dosažení konečného času dojde k uloženiu výsledných hodnot a ukončeniu programu.

```

/
└── 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 5: soubory a adresa modelu SMODERP

2.1 Programovací jazyk Python

Python je 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 není závislý na platformě, na které běží ?. Zajímavým rozšířením jazyka Python je NumPy. Je to balíček užívaný pro vědecké výpočty. Umožňuje podporu velkých, multi-dimenziornálních polí a matic, spolu s velkou knihovnou matematických funkcí pro práci s těmito poli ?. Pomocí tohoto balíčku bylo v programu operováno s naprostou většinou polí a matic. V současnosti (Prosinec 2013) je nejnovější verze jazyka 3.3.3. Poslední verze vývojové větve 2.x Pythonu vyšla v roce 2010 a byla to verze 2.7. Nyní všechna vylepšení jazyka už jsou dělána pro vývojovou větev 3.x. K tvorbě programu byla zvolena verze 2.6.5, která je kompatibilní s programem ArcGIS 10.0.

2.2 CFL podmínka - řešení nestability výpočtu

V předchozím verzích programu SMODERP nebyla ošetřena podmínka stability výpočtu, která vychází z explicitního řešení časově derivace. Při větších rychlostech toku či nevhodně zvolené délce časového kroku došlo k situaci, kdy z buňky odteklo více vody než v ní bylo. Situace byla nazvána přetečení. Program se ukončil a uložil se poslední úspěšný časový krok.

V současné verzi programu SMODERP 2D je tento problém vyřešen Courant-Friedrich-Lowy (*CFL*) podmínkou. Splnění této podmínky zajišťuje konvergenci explicitního řešení pokus je platí, že $CFL < 1.0$. Z obecné rovnice CFL podmínky byla odvozena a upravena podmínka pro účely modelu SMODERP 2D na následující tvar:

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

kde CFL je Courant-Friedrich-Lowy podmínka,
 v je rychlosť plošného či rýhového toku,
 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 porovná s kritickou hodnotou a podle pravidel znázorněných v tabulce 3 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.

Proudění 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 musel být velmi 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 rýhového odtoku přistoupilo k lokálnímu krácení

Tabulka 3: 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	$= MIN(\frac{0.5601\Delta x}{v}; \Delta t_{max})$	= původní Δt

Tabulka 4: Kritéria změny faktoru $ratio$ při dělení časového kroku při výpočtu rýhového odtoku

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

časového kroku pouze v buňkách, kde k rýhovému odtoku skutečně dojde. Časový krok v rýhách je dělen celočíselně faktorem označeným jako $ratio$. CFL číslo se proto ukládá zvlášť u plošného a zvlášť u rýhového odtoku. Ke změně časového kroku plošného odtoku dojde pokud $ratio > 10$. Časový krok plošného odtoku je pak násoben multiplikátorem Δt_{mult} , který se po každém překročení maximální CFL zmenší na 90 % své dosavadní hodnoty. Pokud je CFL příznivé multiplikátor Δt_{mult} se postupně zvětšuje vždy o 10 % na hodnoty 1. Pravidla pro změnu faktoru $ratio$ a multiplikátoru Δt_{mult} jsou shrnutý 4.

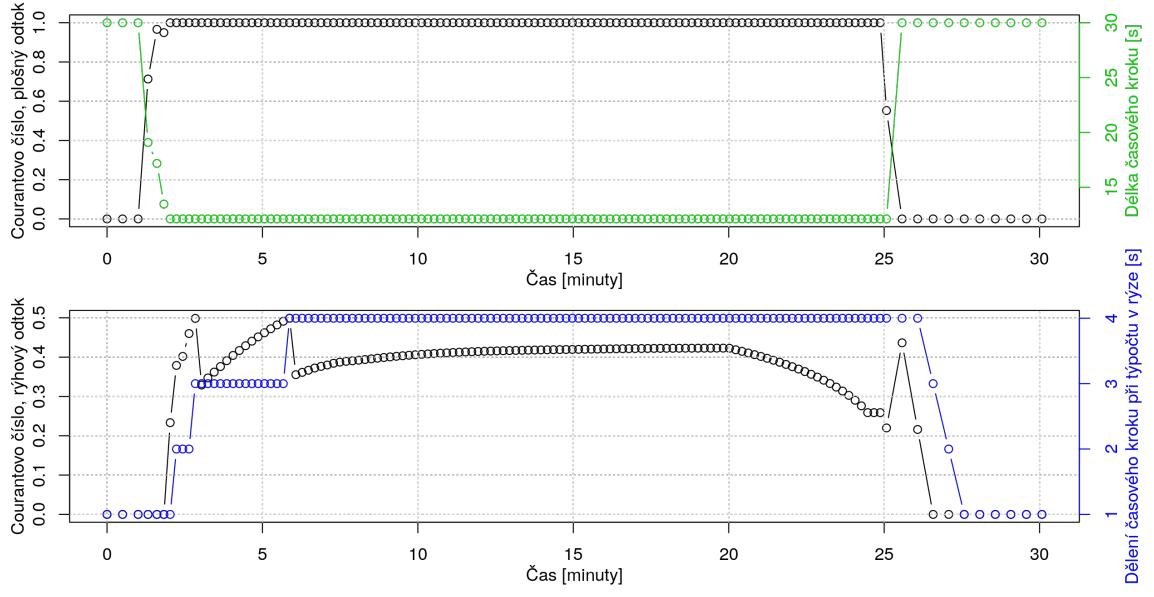
Obrázek 6 a 7 ukazují chování časového kroku v případě, že je řízen plošným obrázek 6 nebo rýhovým odtokem obrázek 7.

3 Výstupy z modelu

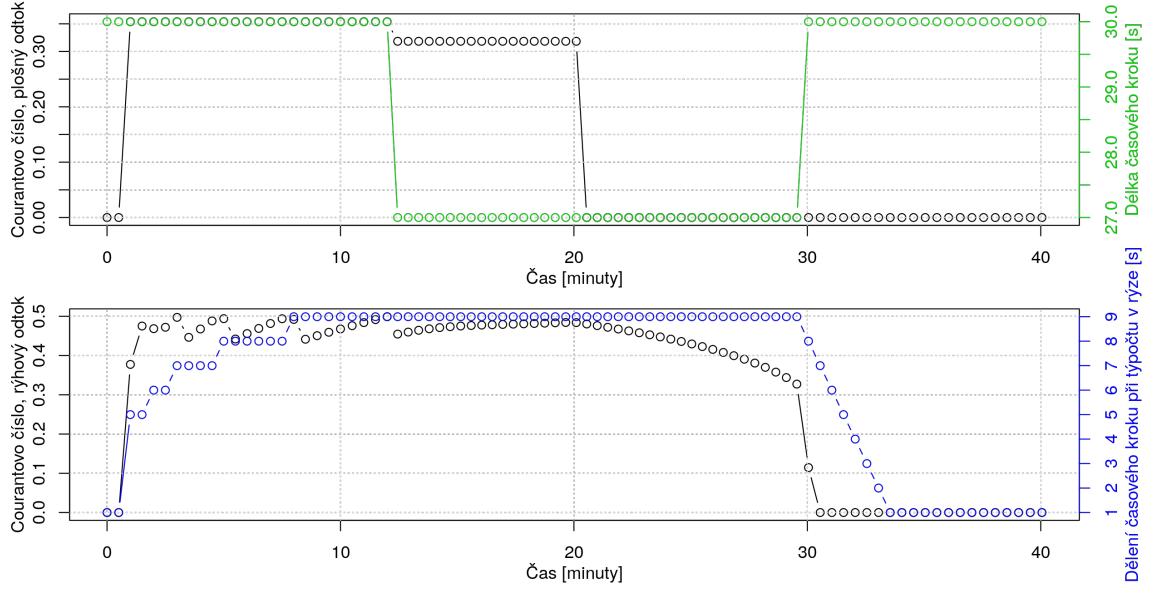
Zde dodelat

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

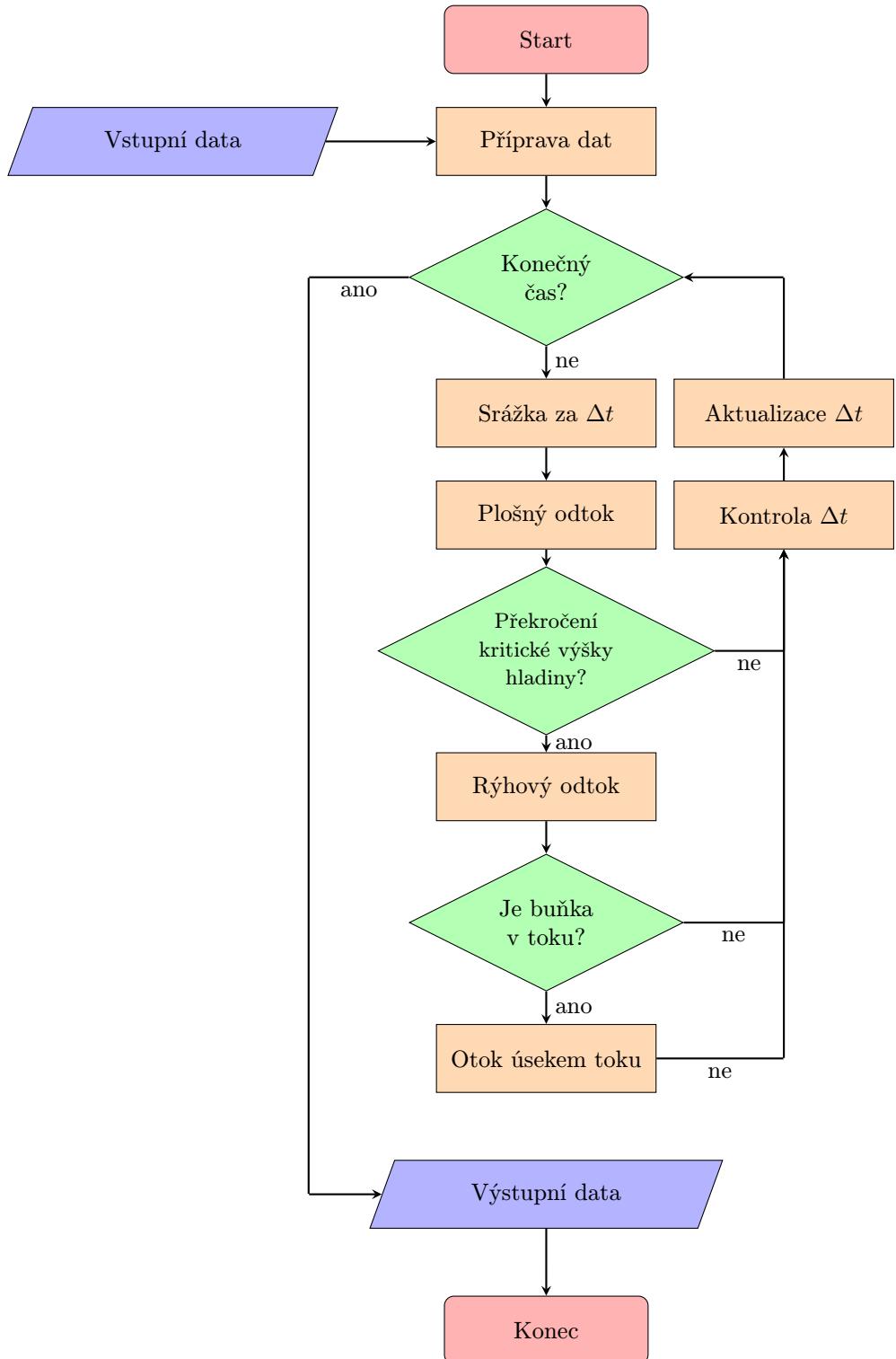
Výstupy modelu jsou uloženy do složky zadané mezi vstupními parametry (obsah složky je při spuštění programu vymazán!). Kumulativní nebo maximální hodnoty na celém řešeném území jsou na konci výpočtu uloženy v rastrovém formátu (viz. kapitola 3.1). Volitelné výstupy hydrogramů v bodech ve formě časových řad jsou uloženy do textových souborů s příponou dat (viz. kapitola 3.2). Pokud model počítá i úseku hydrografické sítě, jsou kumulativní nebo maximální hodnoty veličin jednotlivých úseků vypsáný v tabulce v textovém formátu (viz. kapitola 3.3), prostorové rozložení jednotlivých úseků je uloženo jako jeden s rastrů (viz. kapitola 3.1). Jednotlivé výstupy jsou dále popsány podrobněji.



Obrázek 6: 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) délka časového kroku i $ratio$ vrátí na původní hodnoty.



Obrázek 7: 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) délka časového kroku i $ratio$ vrátí na původní hodnoty.



Obrázek 8: Flow chart toku programu

3.1 Rastrové výstupy

V rastrech jsou uloženy vybrané veličiny na celém řešeném území. Jako rastrový formát lze zvolit proprietární ESRI formát nebo textový formát ASII. Přehled rastrových výstupních souborů je shrnut v tabulce 5. 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 5).

Tabulka 5: Přehled rastrových výstupů

Název souboru (ESRI nebo .acs)	Jednotka	Popis
cInfiltrationM	m	Kumulativní infiltrace
cRainfallM	m	Kumulativní srážka (bez intercepcí a povrchové retence)
cVolInM3	m^3	Kumulativní objem přítoků do buňky (plošný + rýhový)
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 v buňce
mVelocityM_S	ms^{-1}	Maximální rychlosť proudenia v buňce (plošného či soustredeného odtoku)
mReachFlowM3_S	NA	doplnením
mShearStressPa	Pa	tečné napätie
reachFID	NA	Buňky mimo tok mají NODATA hodnotu nebo id daného úseku toku.
massBalance	m	Bilance všech vstupů a výstupu z a do buňky

3.2 Hydrogramy

Pokud jsou do vstupů zadány body pro výpis hydrogramů, vypíší se do testových souborů s příponou `.dat`. Vypsáne veličiny jsou závislé na typu odtokového procesu resp. typu výpočtu. Popis veličin při povrchovém resp. povrchovému i soustředěnému odtoku (typ výpočtu `only sheet runoff` resp. `rill and sheet runoff`, viz kapitola 1.9) je shrnut v tabulce 6. Pokud je v buňce úsek hydrografické sítě, vypisují se pouze hodnoty celého úseku. Názvy a význam veličin popisující úsek toku je popsán v tabulce 7. Model v současné verzi uvažuje, že pokud je v buňce úsek toku, zabírá úsek celou buňku, přestože jeho šířka menší než je šířka samotné buňky.

Tabulka 6: Popis veličin v `.dat` souborech

Název sloupce	Jednotka	Popis
time[s]	s	Čas výpočetního kroku
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 výšky hladiny v rýze, ale v nadkritická výška hladiny vztažená na celou plochu výpočetní buňky

Tabulka 7: Popis veličin v `.dat` souborech

Název sloupce	Jednotka	Popis
time[s]	s	Čas výpočetního kroku
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

3.3 Tabulka hodnot úseků

V této tabulce uložené v textovém formátu jsou zapsány maximálních a kumulativních hodnot jednotlivých úseků. Hodnoty tabulce lze následně přiřadit podle identifikační hodnoty v prvním sloupci k jejich geografické reprezentaci v libovolném GIS softwaru. Názvy sloupců tabulky a jejich popis je stručně proveden v tabulce 8

Tabulka 8: 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)

3.4 State - typ průtoku na buňce

Jak bylo popsání no v kapitole 2 v modelu je možné řešit několik typů povrchového odtoku: plošný odtok, soustředěný odtok a odtok hydrografickou sítí. Topografie hydrografické sítě je definována uživatelem. Vznik soustředěného odtoku je podmíněn překročením kritické výšky (popsáno v kapitole 2.2). V programu jsou typy odtoku rozlišeny celočíselným identifikátorem označeným State, kde pokud State

- = 0 dochází v buňce pouze k plošnému odtoku pokud
- = 1 dochází v buňce k plošnému i soustředěnému odtoku nebo pokud
- = 2 @@@ plošný odtoku a rýha jen odtéká
je to v teto verzi? Je to zajímavé pro uživatele?
- >= 1000 je v buňce úsek hydrografické sítě.

Identifikátor hydrografické sítě nemusí začínat číslem 1000 a nemusí být vzestupný (cestupný) u navazujících úseků. Tento identifikátor je v modelu definován jako 1000 + fid, je tedy definován uživatelem nebo přiřazen použitým GIS softwarem.

tenhle seznam doplnit popisem o co tam jde a v jakých je to jednotkách

- VRestEndRillL3.asc
- TotalBil.asc
- toky.asc
- SurRet.asc
- stream.shp
- ShearStress.asc
- body hydrogamů (*.dat) - průběh veličin pro jednotlivé body zadané v kapitole XXXX

- MaxWaterRillL.asc
- MaxWateL.asc
- MaxVelocity.asc
- CumVRestL3.asc
- CumVOutRillL3.asc
- CumVOutL3.asc
- CumVInL3.asc
- AreaRill.asc

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 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 rychlosťí je výstupem sloužící k určení erozní ohroženosti. Porovnávány jsou hodnoty skutečných rychlosťí s limitními nevymílacími rychlosťmi (viz tab. č. 3). napětí.

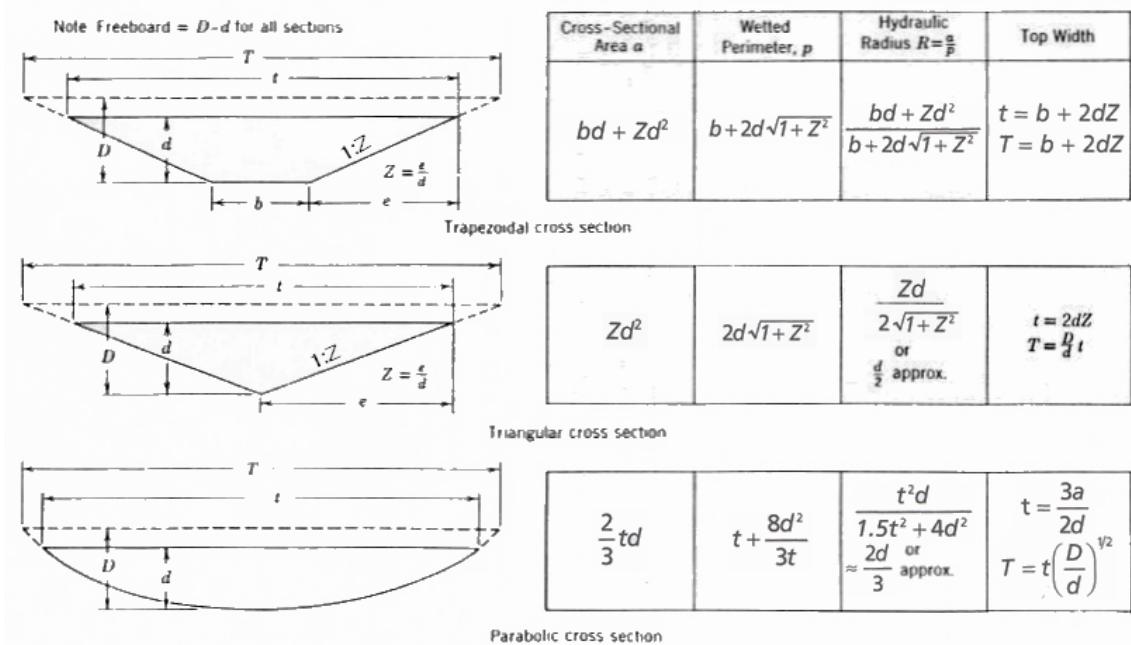
Obdobou je rastr tečného napětí. Slouží k určení míst potencionálně nebezpečných. Hodnoty limitních hodnot tečného napětí jsou uvedeny ve stejné tabulce jako rychlosti průtok v rýze (viz tab. č. 3).

Průtok v rýze je rastrová vrstva znázorňující maximální průtok 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 rychlosťi v buňkách, kde je rýha vytvořena. Výpočet v rýhách probíhá odlišně oproti povrchovému odtoku. Jedná se o větší rychlosťi, 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, průtoku, napětí, rychlosťi 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



Obrázek 9: Tvary příčných průlezů úseků hydrografické sítě a použité vztahy na výpočet hydraulického poloměru

Příloha

.1 asdf

Tabulka 9: 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

Tabulka 10: Natrhnuté kritické hodnoty třetího napětí a nevymílání rychlosti

Sloupec1	Sloupec2	k-d	k	k+d	s-d	s	[m.s-0.5]	s+d	třída	b	x	y	v	Tau
			[m/s]										m/s	Pa
coarse	CC	2.22E-07	6.94E-06	2.36E-05	7.10E-05	0.000097459	0.0000361478	5	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245	
medium	ME	2.22E-07	1.39E-06	1.04E-05	0.002581989	0.000129099	0.000309839	4	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248	
medium fine	MF	2.22E-08	2.64E-07	2.22E-06	7.10E-05	0.00011619	0.000180739	3	1.7925	9.2043	0.4622	10.66	0.245	
fine	FF	2.22E-07	2.78E-06	4.03E-05	8.39E-05	0.000047459	0.001290994	2	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264	
very fine	VF	4.72E-07	1.67E-06	3.47E-05	7.10E-05	0.000129099	0.000180739	1	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305	
sand	SS	2.22E-07	1.00E-06	2.31E-05	7.10E-05	0.000129099	0.000361478		1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245	
loamy sand	LS	2.22E-07	1.00E-06	2.31E-05	7.10E-05	0.000129099	0.000361478		1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245	
sandy loam	SL	2.22E-07	5.14E-06	2.31E-05	2.45E-04	0.000097459	0.000903696		1.7925	9.2043	0.4622	10.66	0.245	
loam	LL	2.22E-07	1.67E-06	1.04E-05	1.29E-04	0.000129099	0.000309839		1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248	
silt loam	SIL	2.22E-08	1.39E-07	2.22E-06	7.10E-05	0.00010328	0.000180739		1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248	
silt	SI	2.22E-08	1.67E-07	2.22E-06	7.10E-05	0.00010328	0.000180739		1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248	
sandy clay loam	SCL	2.22E-07	5.14E-06	1.04E-05	8.39E-05	0.000097459	0.000309839		1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264	
clay loam	CL	2.22E-07	1.94E-06	1.04E-05	8.39E-05	0.000047459	0.000309839		1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264	
silty clay loam	SICL	2.22E-07	1.67E-07	2.22E-06	7.10E-05	0.00010328	0.000180739		1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264	
sandy clay	SC	1.67E-07	5.14E-06	4.03E-05	7.23E-05	0.000097459	0.001290994		1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305	
silty clay	SIC	2.22E-07	1.94E-06	4.03E-05	8.39E-05	0.000047459	0.001290994		1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305	
clay	CC	1.11E-09	1.94E-06	3.47E-05	7.10E-05	0.000047459	0.000232379		1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305	
nosoil	NO	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0		1.5847	7.9848	0.4889	100	3	
hlinitá	HH	1.67E-07	1.67E-06	1.67E-05	1.01E-04	0.000129099	0.000438938	2	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248	
hlinitopísčitá	HP	3.67E-07	3.67E-06	3.67E-05	8.39E-05	0.000077459	0.000903696	2	1.7925	9.2043	0.4622	10.66	0.245	
jíl	J0	1.66E-07	1.66E-06	7.10E-05	0.00010328	0.000193649	1	1.6185	12.0391	0.6717	13.27	0.305		
jílovitá	JJ	1.66E-08	1.66E-07	1.66E-06	7.10E-05	0.00010328	0.000193649	1	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305	
jílovitohlinitá	JH	0.000000025	2.50E-07	2.50E-06	7.10E-05	0.00011619	0.000120062	4	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264	
písčitohlinitá	PH	1.67E-07	1.67E-06	1.67E-05	7.23E-05	0.000129099	0.000348569	2	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248	
písčitá	PP	1.67E-06	1.67E-05	1.67E-04	7.10E-05	0.000142009	0.000193649	5	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245	

Seznam použitých zdrojů

Reference

- Cabík, J., J. K. (1963), *Protierozní ochrana půdy*.
- Dýrová E. (1984), *Ochrana a organizace povodí. Návody ke komplexnímu projektu a diplovnímu semináři*, SNTL - VUT Brno, Brno, CZ.
- 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.
- Schwab, G. O. (1993), *Soil and water conservation engineering*, Wiley.