
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 Instalace SMODERP2D a spištění v ArcGIS	12
1.1 Použití modelu v ArcGIS	13
2 Vstupy do modelu	13
2.1 Digitální model terénu	13
2.2 Půdní data	17
2.3 Data o využití území	18
2.4 Tabulka parametrů půdy a využití území	18

2.5	Srážková data	19
2.6	Časový krok modelu a celková doba simulace	19
2.7	Shapefile bodů pro generování hydrogramů	19
2.8	Výstupní adresář	20
2.9	Hydrografická síť	20
3	Tok programu	21
3.1	Programovací jazyk Python	25
3.2	CFL podmínka - řešení nestability výpočtu	25
4	Výstupy z modelu	26
4.1	Rastrové výstupy	29
4.2	Vektorové výstupy	31
4.3	Hydrogramy	31
III	Ukázka výsledků	32
1	Porovnání metod 1D a 2D	33
Příloha		36
Seznam použitých zdrojů		38

Seznam zkratек

a	parametr MKWA	n	mannigfův součinitel drsnosti
A	průtočná plocha [m^2]	PS	potenciální srážka [m]
b	parametr MKWA	O_{tot}	odtokové množství za čas [m^3/s]
b	šířka dna příčného profilu hydrografické sítě [m]	O^{in}	přítok ze sousední buňky za čas [m^3/s]
b_{rill}	šířka rýhy [m]	o^{in}	výška vtoku za čas [m/s]
CFL	Courant-Friedrich-Lewy podmínka	o_{rill}^{in}	výška vtoku v rýze za čas [m/s]
$D8$	jednosměrný odtokový algoritmus	O^{out}	odtok z buňky za čas [m^3/s]
Δt	časový krok [s]	o^{out}	výška odtoku z buňky za čas [m/s]
Δt_{max}	maximální časový krok [s]	o_{rill}^{out}	výška odtoku v rýze za čas [m/s]
Δt_{mult}	multiplikátor časový krok [-]	Q_{365}	základní průtok [m^3/s]
Δx	prostorový krok [m]	O	omočený obvod [m]
$\frac{dS}{dt}$	změna zásoby [m^3/s]	I_{POT}	potencionální intercepce
ES	efektivní srážka [m^3/s]	q_{rill}	průtok v rýhách [m^3/s]
es	intenzita efektivní srážky [m/s]	q_{sur}	specifický plošný průtok [m^2/s]
l_{eff}	efektivní vrstevnice [m]	q_{stream}	průtok v otevřeném korytě [m^3/s]
h_{crit}	kritická hloubka [m]	R_{rill}	hydraulický poloměr v rýze [m]
h^{rill}	hloubka rýhy [m]	R_{stream}	hydraulický poloměr v otevřeném korytě [m]
h^{sur}	výška hladiny na povrchu [m]	ret	povrchová retence [m]
k	nasyacená hydraulická vodivost [ms^{-1}]	ρ	hustota [kg/m^3]
Inf	infiltrované množství [m^3/s]	$rill_{ratio}$	parametr tvaru rýhy [-]
inf	intenzita infiltrace [m/s]	$ratio$	celočiselný faktor dělící časový krok při výpočtu rýhového odtoku
I_{tot}	celkový přítok za čas [m^3/s]	S	sorptivita půdy [$m\sqrt{s}$]
I	sklon [-]	S_i	sorptivita půdy v buňce i [$m\sqrt{s}$]
K	součinitel šířky (pro plošný odtok $K = 1$)	τ_{sur}	tečné napětí [Pa]
K_i	nasyacená hydraulická vodivost v buňce i [m/s]	τ_{crit}	kritické tečné napětí [Pa]
I_{LAI}	poměrná plocha listová	V_{out}	objem objem odtekého [m^3]
l_{rill}	délka rýhy [m]	V_{crit}	objem vody do kritické hladiny [m^3]
$mfda$	vícesměrný odtokový algoritmus	v_{rill}	rychlosť proudění - rýhový odtok [m/s]
m	poměr sklonu svahů (pro obdélník je ro- ven nule)	V_{rill}	objem vody v rýze v daném elementu [m^3]

v_{sur} rychlosť proudenia - plošný odtok [m/s] Y parametr MKWA

V_{tot} celkový objem vody v elementu [m^3] g gravitačné zrychlenie [m/s^2]

v_{crit} kritická nevymíiaci rychlosť [m/s] P plocha buňky [m^2]

X parametr MKWA

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, umožnuje 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 měreny (viz příloha ?? tabulka 10).

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jedná se o distribuovaný epizodní hydrologicko-erozní model. Výpočet je řešen na pravidelné rastrové síti. Prostorová diskretizace modelu je řízena rozlišením vstupního digitálního modelu terénu. V celém řešeném prostoru je po jednotlivých buňkách v každém časovém kroku provedena bilance vstupů a výstupů a následně vypočteno odteklého množství 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 mfd (*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} ,

$$PS I_{LAI}$$

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 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 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 10 v příloze ???. 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 nevymílající 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 11 v příloze ??.

2.2 Soustředěný odtok v rýhách

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

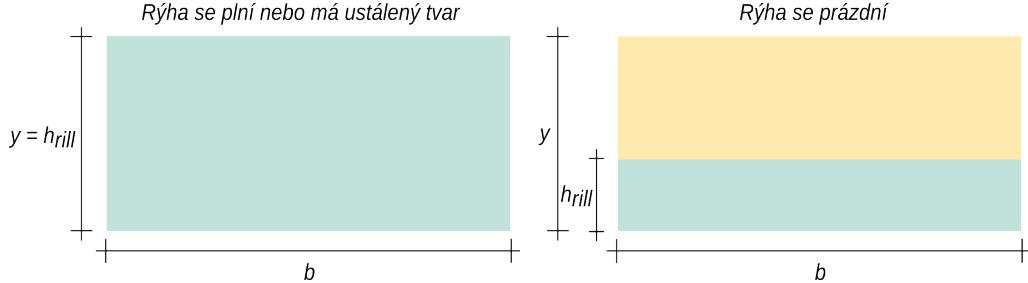
- Zavedení stejných zjednodušujících předpokladů výpočtu proudění jako v případě výpočtu plošného povrchového odtoku, přestože se nejedná o výpočet proudění o zanedbatelně malé hloubce. Předpokladem je, že se tok ve všech časech a ve všech buňkách vždy dostane do ustáleného, tedy že se vždy jedná o ustálené 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 manigovův 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 (nalevo)

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].

4. 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

SMODERP2D je zamýšlen také jako nástroj pro navrhování 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 (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 ?? v tabulce na obrázku 18. 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 úsekům hydrografické sítě je určen jednoduše jako

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

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).

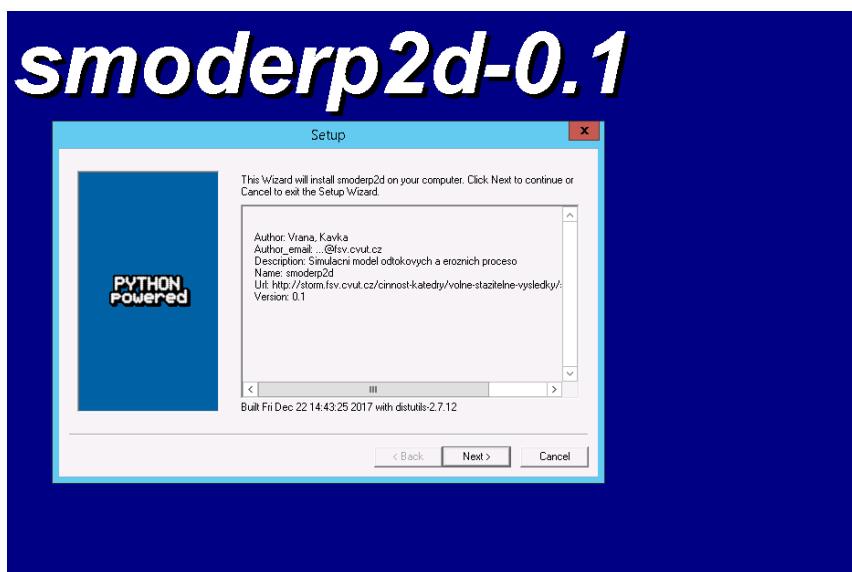
1 Instalace SMODERP2D a spuštění v ArcGIS

SMODERP2D je distribuován pod GPL licencí, takže uživatel má dvě možnosti jak získat model SMODERP2D: jako zdrojový kód a jako binární knihovnu.

Na stránkách katedry ... lze stáhnout aktuální zdrojový kód modelu. Na stránkách github.com ... lze stáhnout aktuální zdrojový či vývojové vrze. Na stránkách github.com ... lze rovněž stáhnout zdrojový kód toho manuálu.

Druhou možností je stáhnuté spustitelného instalačního souboru. Tento soubor je k dispozici ke stažení na odkazu Po spuštění toto souboru se spustí průvodce k instalaci standardního balíčku Python (úvodní obrazovka průvodce je ukázána na obrázku 2). Po ukončení instalace lze model SMODERP2D importovat do Python skriptu příkazem `import smoderp2d`.

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 adrese Testovací skript s názvem `importrun.py` uložte do společné složky s testovacími daty `test-data`. Po spuštění skripty se otevře okno terminálu příkazové řádky. Pokud instalace malíčku SMODERP2D neproběhla nebo proběhla chybně vypíše testovací skript hlášení ukázané na obrázku 3. Pokud nainstalované jiné nezbytné může se chybové hlášení lišit. Pokud například chybí balíček `numpy` vypadá třetí řádek hlášení následovně: `No module named numpy`. V takovém případě je nutné chybějící balíčky doinstalovat běžným způsobem. Pokud proběhne testovací běh modelu SMODERP2D bezchybně, proběhne v okně terminálu hlášení ukázané na obrázku 4. Výstupní soubory jsou pak uložený do stejného adresáře do složky `test-out`. V tento moment je model SMODERP2D a nezbytné malíčky zdánlivě nainstalovaný a je připraven k použití.



Obrázek 2: Úvodní obrazovka při instalaci malíčku SMODERP2D

1.1 Použití modelu v ArcGIS

Současná verze modelu SMODERP2D využívá k přípravě vstupních dat výhradně software ArcGIS a Python malíčkem `arcpy`. Proto je potřeba vytvořit skript, který načte s spustí model SMODERP2D. Takový skript (s názvem `start-smoderp2d.py`) může vypadat následovně:

```
import smoderp2d.main as sm  
sm.run()
```

Následně je třeba vytvořit ArcGIS toolbox, kde je soubor `start-smoderp2d.py` nastavený jako zdrojový (obrázek 5). Další krok je nastavení parametrů ArcGIS toolbox odkud se načítají. Pořadí zadávaných hodnot je nutné dodržet. Ukázka ArcGIS toolbox a vysvětlení parametrů je ukázáno na obrázku 6. Detailnější popis vstupních hodnot je v kapitole 2.

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

Princip pouštění modelu SMODERP2D v programu ArcGIS je popsán na konci této kapitoly (sekce ??).

2.1 Digitální model terénu

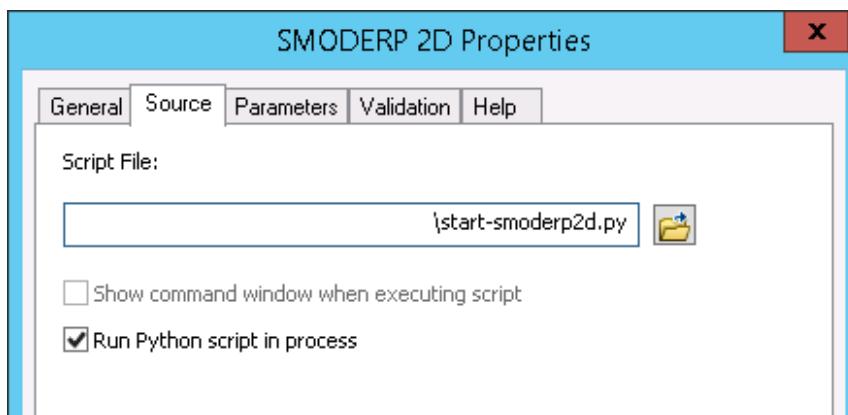
Rastr digitálního modelu terénu nebo také DMT, či anglicky DTM (Digital Terrain Model) je souvislý povrch území obvykle znázorňující morfologii určité části Země. DMT rastr je složen z jednotlivých buněk. Nejčastější formou jsou buňky čtvercové, ale mohou mít i jiný tvar. Velikost buněk se liší v závislosti 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

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

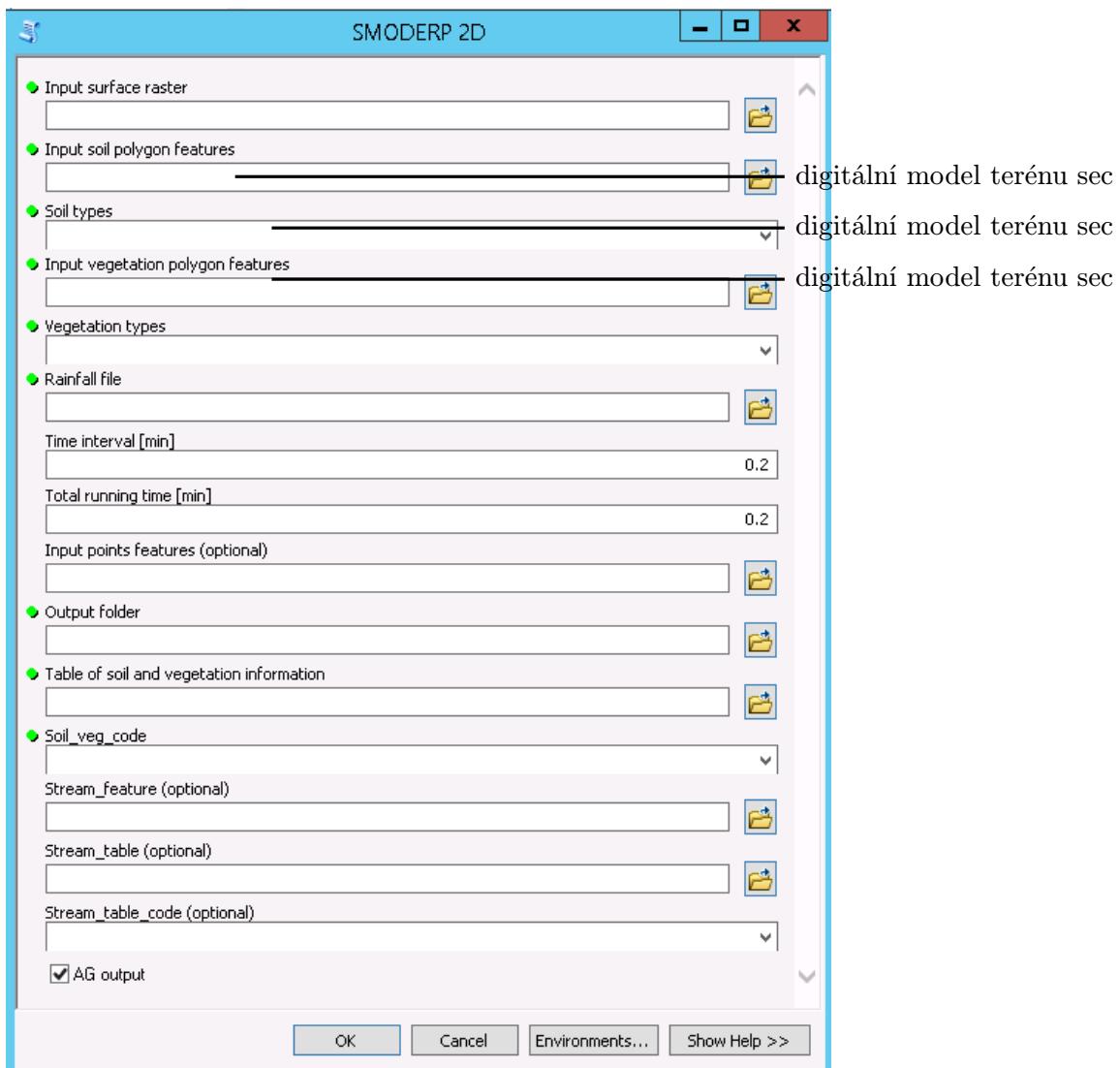
Obrázek 3: Hlášení při chybné instalaci malíčku modelu SMODERP2D

```
importing smoderp2d ...
initiating computation ...
Creating of the output directory: test-out
Creating of the temp: test-out\temp
DMT preparation...
Clip of the source data by intersect
!!! Points at coordinates [x,y]:
[1.5451226538439402, 8.254702156499043]
[1.608297884877964, 5.736637309688466]
are outside the computation domain and will be ignored !!!
Computing critical level
Data preparation has been finished
Surface:
    Rill flow:
        ON
    Kinematic approach
    D8 flow algorithm
Stream:
    OFF
Subsurface:
    OFF
Save cumulative and maximum values from:
    Surface
-----
Corrected time step is 0.2 [s]
Hydrographs files has been created...
Saving data..
-----
Total computing time: 11.4509999752
press enter ...
```

Obrázek 4: Zdárný průběh testovacího skriptu modelu



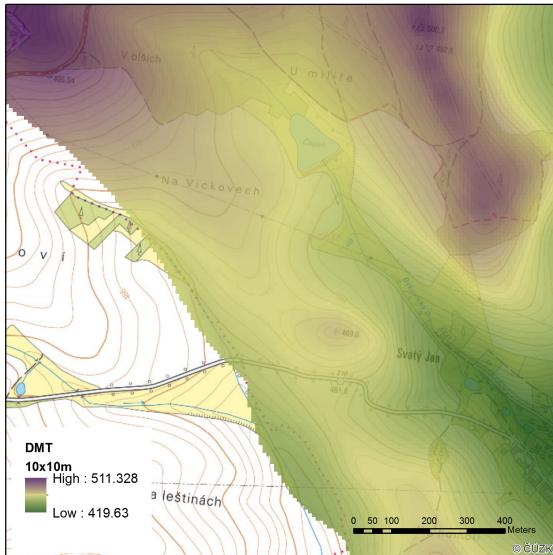
Obrázek 5: Ukázka puštění modelu SMODERP2D v ArcGIS toolbox



Obrázek 6: Ukázka parametrů ArcGIS toolbox

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 typu vegetace	vektor- polygony	Povinný	V atributové tabulce identifikátor typu ve- getace	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 odto- kových podmínek; doporučuje se 30 - 60 sekund	2.6
výstupní adresář	text	Povinný	Adresář k uložení výsledků (při spuštění výpočtu se obsah adresáře vymaže!)	2.8
bodové výstupy hydrogramů	vektor - body	Volitelný	Body pro výpis výsledků	2.7
parametry půdy a vegetace	tabulka	Povinný	Tabulka parametrů půdy a vegetace. Ná- zvy sloupců mají definované označení. Hodnoty se spojí s vektorovými vystavami.	2.4
hydrografická síť	vektor - linie	Volitelný	Prostorové rozložení hydrografické sítě. Atributová tabulka obsahuje identifikátor tvaru jednotlivých úseků.	2.9
parametry hydrografické sítě	tabulka	Volitelný	Tabulka parametrů jednotlivých úseků hydrografické sítě	2.9
volba arctgis výstupů	logická proměnná	Povinný	Výchozí formát výstupních rasterů je pro- prietární formát ERSL. Uživatel může zvo- lit textový formát ASCII.	—



Obrázek 7: Výřez digitálního modelu terénu povodí Býkovice

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 7.

2.2 Půdní data

Datové zdroje vlastností půd jsou v rámci České Republiky roztríštěné. Model SMO-DERP2D 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 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 8b 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 [$m s^{-1}$]; S - sorptivita půdy [$m \sqrt{s}$]; n - manigův součinitel drsnosti, a - parametr MKWA, b - parametr MKWA, X - parametr MKWA a Y - parametr MKWA. Hodnoty těchto parametrů jsou definované v tabulce v kapitole 2.4. Fyzikální význam těchto parametrů a jejich implementace v modelu jsou popsány v části I toho manuálu.

2.3 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 širokorádkové¹
- zemědělské plodiny úzkorádkové²

Shapefile popisující využití území je ukázán na obrázku 8c. 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 vstupující do modelu jsou zejména I_{POT} - potencionální intercepce a I_{LAI} - poměrná plocha listová. Jejich konkrétní použití je popsáno v části I toho manuálu.

2.4 Tabulka parametrů půdy a využití území

Další povinný vstup je tabulka, která obsahuje hodnoty jednotlivých parametrů popsaných v předešlých kapitolách a části I toho manuálu. Na tuto tabulku se odkazují identifikátory půdního typu a typu využití území definované jako pro jednotlivé polygony. Tato tabulka může být do modelu vložena jako textový soubor. Na obrázku 8e 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 8e s označením soilveg). Význam jednotlivých veličin je popsán v tabulce 2. Při přípravě dat je nutné dodržet označení parametrů!

Na obrázku 8 jsou i ukázky jednotlivých vektorových vrstev před (obrázek 8b a 8c) a po protnutí (intersect; obrázek 8d).

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

²Úzkorádkové plodiny jsou obiloviny nebo řepka.

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

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

2.5 Srážková data

Dalším vstupem je soubor obsahující srážková data. Srážky se zadávají jako textový soubor se dvěma sloupci. V levém sloupci je časový interval v minutách v pravém sloupci je **kumulativní úhrn** za daný časový interval v **milimetrech**. Ukázka jednoduché srážky a grafické reprezentace kumulativních dat jsou zobrazeny na obrázku 9.

2.6 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 časové diskretizace. 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 kde by v tom příkladě Courantova kritérium povolovalo příliš velký časový krok. Zvolené řešení adaptace časového kroku je detailněji popsáno v kapitole 3.2.

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

2.7 Shapefile bodů pro generování hydrogramů

Jedná se o bodovou vrstvu. V těchto bodech se budou ukládat časové řady počítaných veličin. Tento volitelný vstupní parametr je podrobněji popsán v kapitole popisující výstupy

z modelu 4.3.

2.8 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!

2.9 Hydrografická síť

Hydrografickou sítí jsou myšleny nejen vodní toky, ale i prvky dočasné hydrografické sítě jako jsou příkopy, průlehy, cesty s příkopy a pod. Výpočet v modelu probíhá po jednotlivých úsecích pomocí Manningovi rovnice pro výpočet průtoku (popsáno v části I). Prostorové umístění jednotlivých úseků je definování pomocí shapefile liniové vrstvy. Charakteristiky jednotlivých úseků jsou definovány ve zvláštní tabulce, kde jsou uvedeny charakteristiky pro jednotlivé úseky. Pro propojení prostorové informace s charakteristikami úseků je třeba mít v této tabulce shodný kód 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: obdélník (výchozí; tvar:0), lichoběžník (tvar:1), trojúhelník (tvar:2) a parabola (tvar:3). V tomto případě je kód připojující charakteristiky s úseků ve vektorové vrstvě ve sloupci *smoderp*. Rovnice použity pro určení hydraulického poloměru jednotlivých tvarů příčných profilů jsou na ukázány v příloze ?? na obrázku 18

Tabulka 3: Příklad tabulky s parametry jednotlivých úseků hydrografické sítě

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

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

3 Tok programu

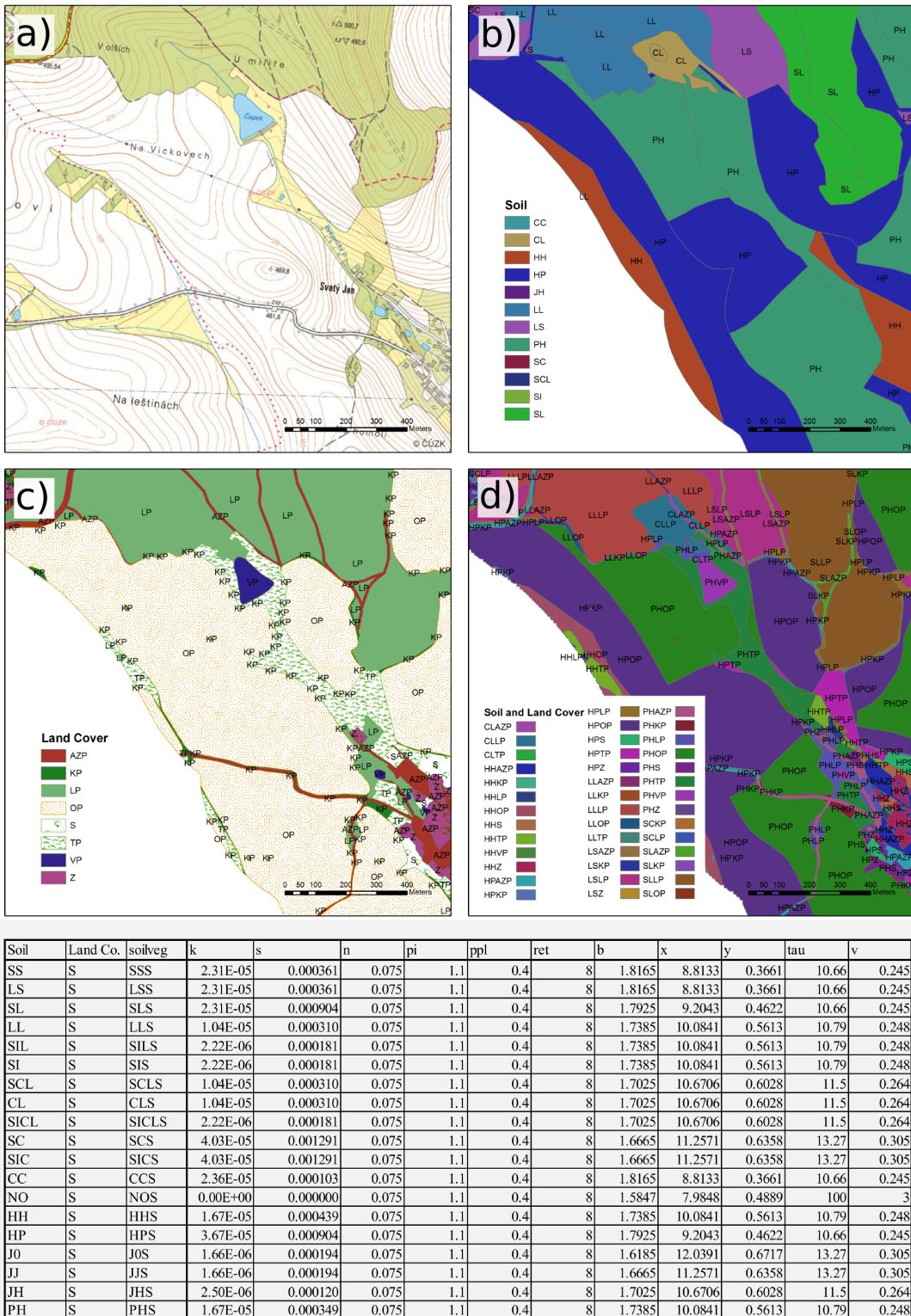
Samotný program je rozdělen do několika podadresářů a souborů. Adresářová struktura s popisem nejdůležitějších adresářů a souborů je ukázána na obrázku 10. Klíčový soubory je `data_preparation.py`, kde je proveden *preprocessing* vstupních dat. Dalšími důležitými soubory jsou `runoff.py` a `time_step.py`, kde probíhá probíhá samotný výpočet. Soubory v adresáři `main_clasess/` obsahují definici datových struktur jednotlivých řešených dějů a skládají dohromady metody k řešení jednotlivých částí modelu. Tato metody jsou pak definované v adresáři `processes/`.

Program SMODERP2D je napsaný v jazyce Python. Python je často používaný GIS softwary jako skriptovací jazyk a jsou pro ně k dispozici knihovny pro efektivní práci s geodatami³. 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.

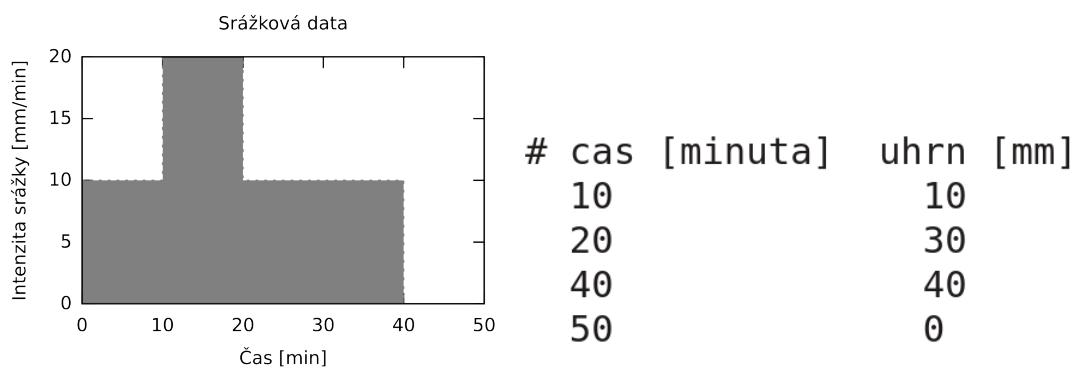
Na obrázku 13 je zjednodušený diagram toku programu. Program řeší v každém časovém kroku rovnici 3. Pokud je překročena kritická výška a půda se začne vymílat, začne se do celkového odtoku započítávat i rýhoví odtok. Bilanční rovnice je rozšířena (11). Pokud je řešená součástí hydrografické sítě, načítá se celkový přítok $\sum_j^m o^{in}_{j,t-1}$ (případně $\sum_k^n o^{in}_{rillk,t-1}$) v rovnici (3) nebo (11) do daného úseku toku, kde se odtok řeší pomocí Chezyho rovnice.

Pokud v daném časovém kroku překročí rychlosť v jakémkoli buňce Courantovo kritérium, dojde ke zmenšení časového kroku a výpočet se v daném kroku opakuje. Pokud je Courantovo 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.

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



Obrázek 8: Princip propojení vektorových vrstev s tabulkou obsahující parametry typu půd a vegetace.
a): mapa daného území; b): rozložení typu půdy; c): rozložení typu vegetačního pokryvu; d): protnutí obou předchozích vrstev; e): tabulka s parametry



Obrázek 9: Ukázka srážkových dat. Vlevo: grafická reprezentace zadaných dat (srážka zobrazena v intenzitách; Napravo: ukázka dat v požadovaném formátu)

```

/
└── 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 10: soubory a adresa modelu SMODERP

3.1 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 (Python Software Foundation 2017). Zajímavým balíčkem jazyka Python je `numpy` (van der Walt et al. 2011). Je to balíček užívaný pro vědecké výpočty. Umožňuje podporu velkých, multi-dimenziorních 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 2017) je nejnovější verze jazyka Python 3.6. Poslední verze vývojové větve 2.7 Pythonu vyšla v roce 2010. Aktuální verze modelu SMODERP2D používá Python 2.7. Podpora Python 2.7 je plánována do jara 2020 (přesné datum zatím není stanoveno). Proto bude docházek k migraci modelu SMODERP2D na verzi Python 3.

3.2 CFL podmínka - řešení nestability výpočtu

V předchozích verzích programu SMODERP 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-Lowy (*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:

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

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

Po dopočítání časového kroku je uložena nejvyšší hodnota CFL zjištěná z **plošného odtoku** pomocí vztahu 15. Poté se porovná s kritickou hodnotou 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

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

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

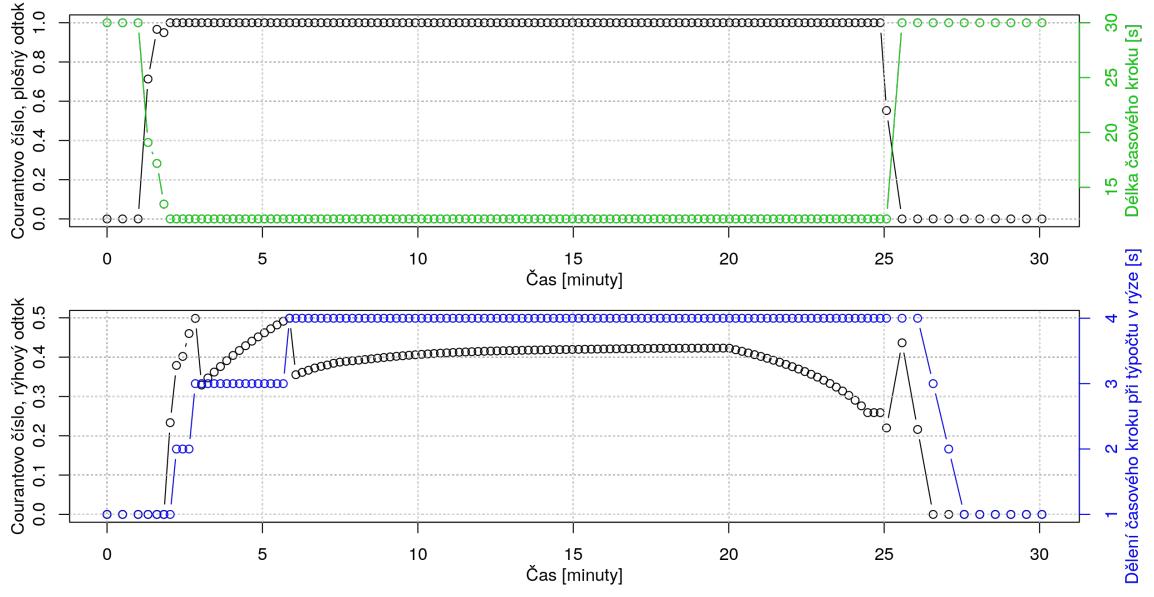
nové	$CFL_{rill} < 0.3$	$0.5 < CFL_{rill}$	$0.3 \geq CFL_{rill} \geq 0.5$ $\vee CFL_{rill} = 0.0$
$ratio$	$= MAX(ratio - 1; 1)$	$= MIN(ratio + 1; 10)$ pro $ratio = 10$	= původní $ratio$
Δt_{mult}	$= MIN((1/0.9)\Delta t_{mult}; 1)$	$= 0.9\Delta t_{mult}$ Δt	= původní Δt_{mult} $= \Delta t \Delta t_{mult}$

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 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 soustředěného odtoku. Ke změně časového kroku plošného odtoku dojde až 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 kritérium příznivé (začíná se zmenšovat) multiplikátor Δt_{mult} se postupně zvětšuje vždy o 10 % na hodnoty 1. Pravidla pro změnu faktoru $ratio$ a multiplikátoru Δt_{mult} jsou shrnuta 5.

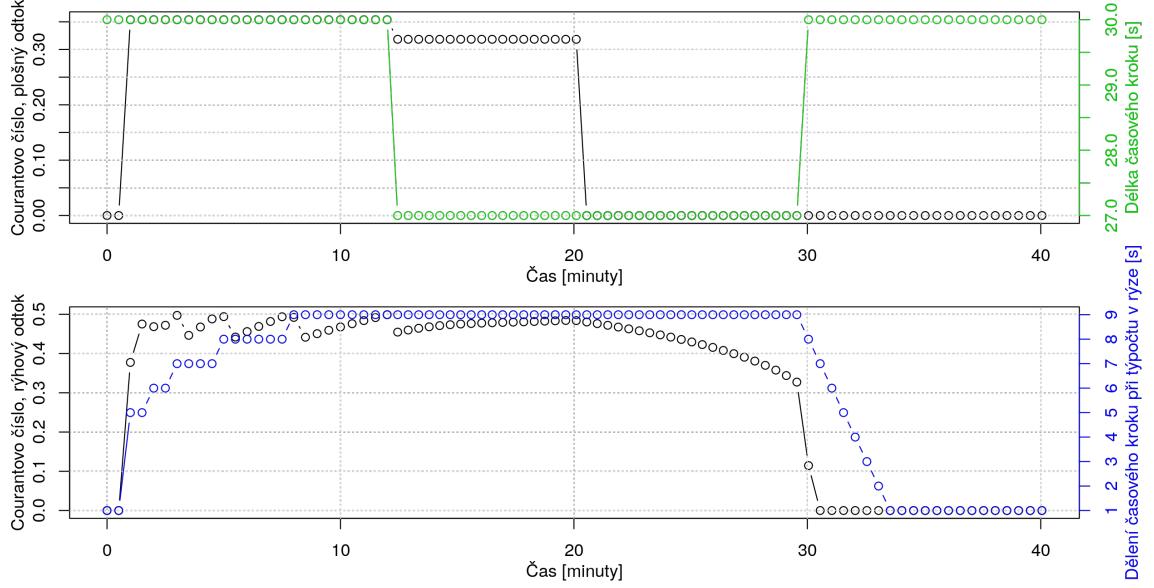
Obrázek 11 a 12 ukazují chování časového kroku v případě, že je řízen plošným obrázek 11 nebo soustředěným odtokem obrázek 12.

4 Výstupy z modelu

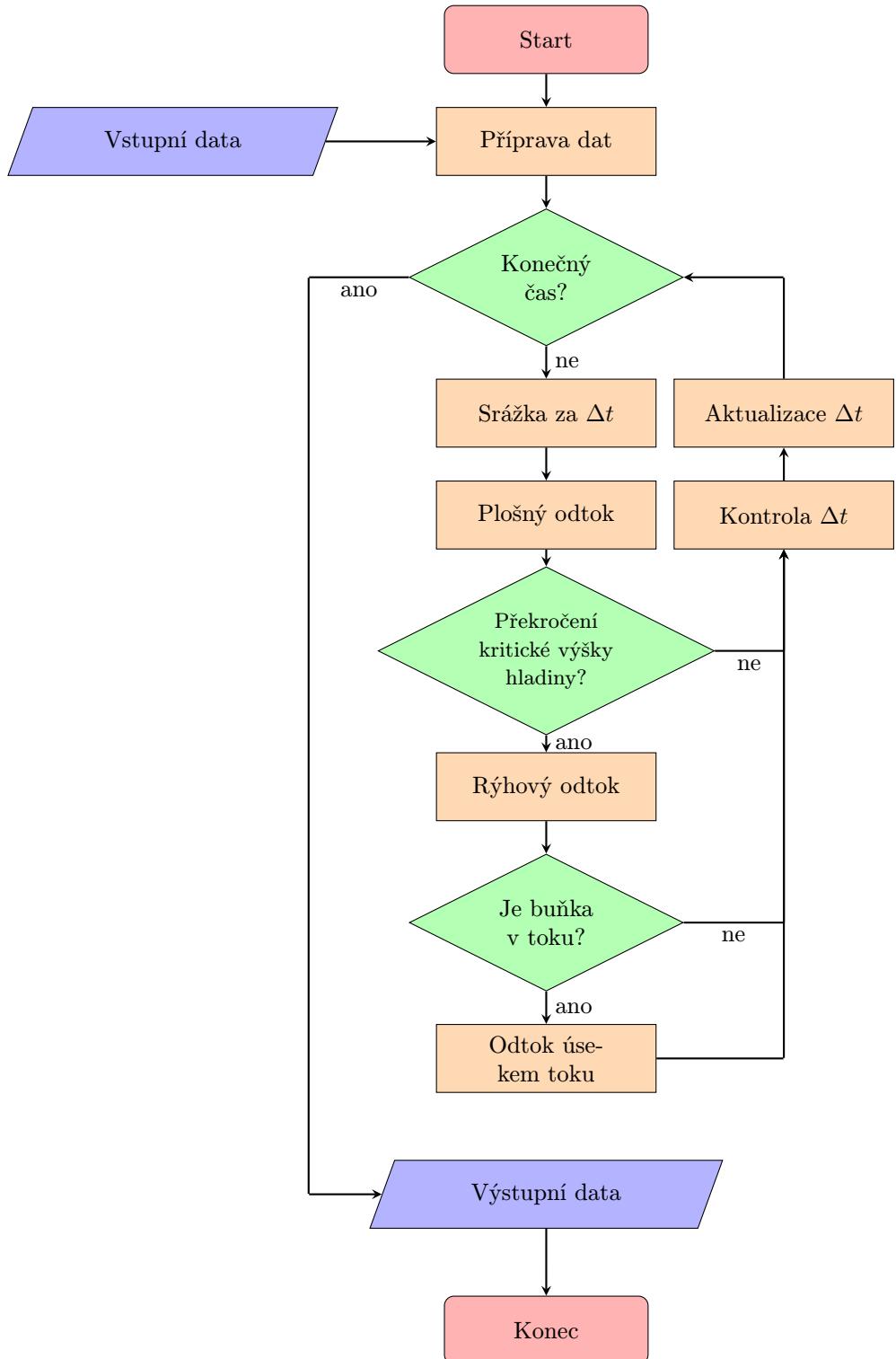
Výstupy modelu jsou uloženy do složky zadané mezi vstupními parametry (obsah složky je při spuštění programu vymazán!). Kumulativní nebo maximální hodnoty na celém řešeném území jsou na konci výpočtu uloženy v rastrovém formátu (viz kapitola 4.1). Průnik polygonů prostorového rozlišení typu půd a využití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



Obrázek 11: 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 12: 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.



Obrázek 13: Flow chart toku programu

4.1 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 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).

Tabulka 6: 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

4.2 Vektorové výstupy

Výstupní data modelu ve vektorovém formátu jsou dva. Jedná se topograficky upravenou vrstvu úseků hydrografické sítě (`hydReach`), kde jsou do její atributové tabulky přidány 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 8d. Tato vektorová vrstva slouží především ke kontrole správnosti přípravy vstupních dat či hledání chyb v nich.

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)

4.3 Hydrogramy

Pokud jsou do vstupů zadány body pro výpis hydrogramů, vypíší se do testových souborů s příponou `.dat`. Vypsáné veličiny jsou závislé na typu odtokového procesu. Popis veličin při povrchovém odtoku je shrnut v tabulce 8. Pokud je v buňce úsek hydrografické sítě, vypisují se pouze hodnoty celého úseku. Názvy a význam veličin popisující úsek toku jsou popsány v tabulce 9. Model v současné verzi uvažuje, že pokud je v buňce úsek hydrografické sítě, zabírá úsek celou buňku, přestože je eho šířka menší než šířka samotné buňky.

Tabulka 8: 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 9: 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

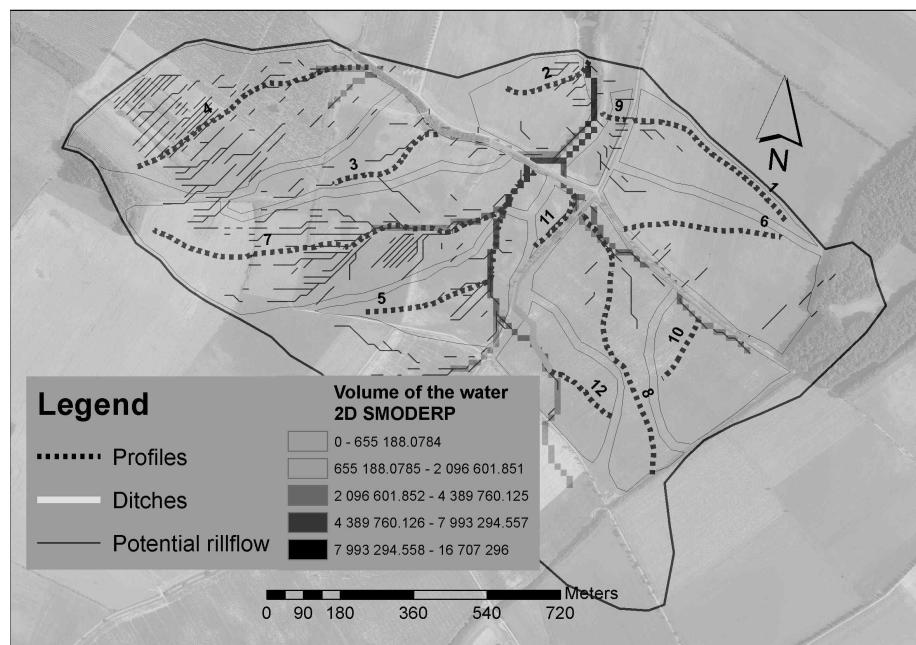
Část III

Ukázka výsledků

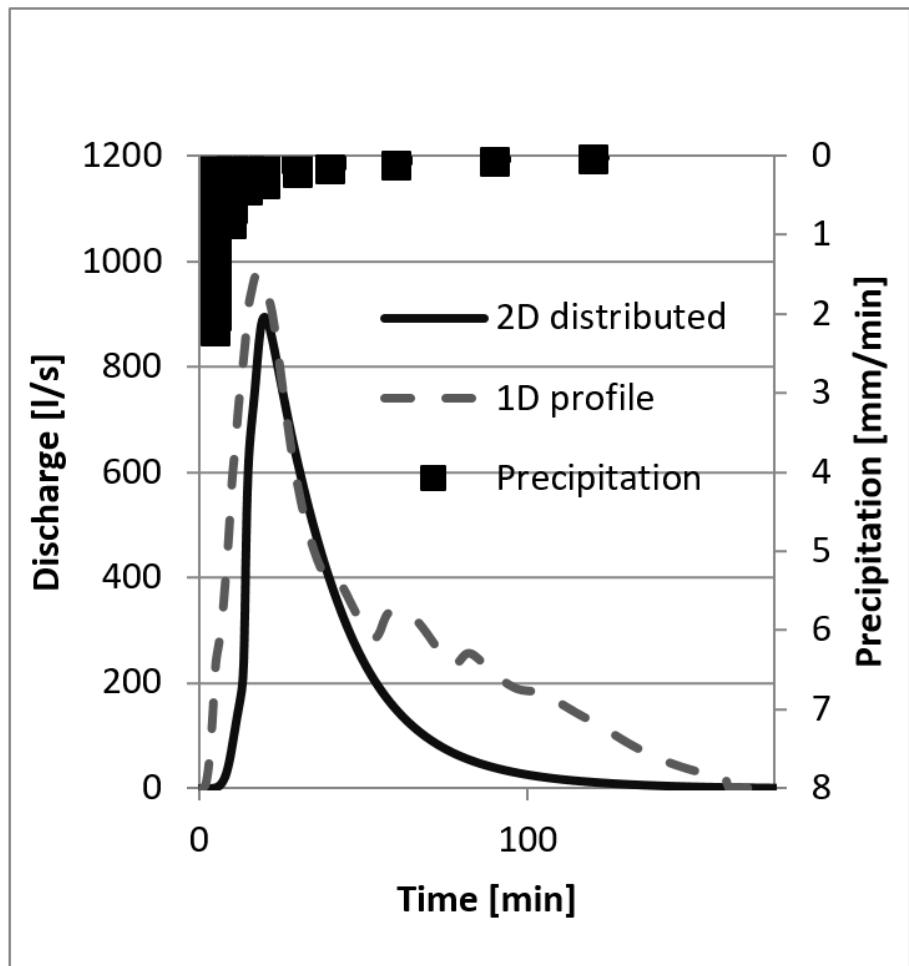
V poslední části manuálu jsou ukázány výsledky modelu SMODERP2D a jejich porovnání s původní 1D profilovou verzí na experimentálním povodí Býkovice.

1 Porovnání metod 1D a 2D

1D a 2D přístup byl porovnán na pomocí výpočtu průtoku a odteklého objemu na erozně narušených profilech. Pro toto porovnání bylo vybráno monitorované území povodí Býkovice a Hořovického potoka o celkové rozloze 1.5 km^2 . Při výpočtu 1D řešení bylo vybráno 12 reprezentativních profilů. Řešené území i jednotlivé profily vybrané pro 1D výpočet jsou ukázaný na mapě na obrázku ??

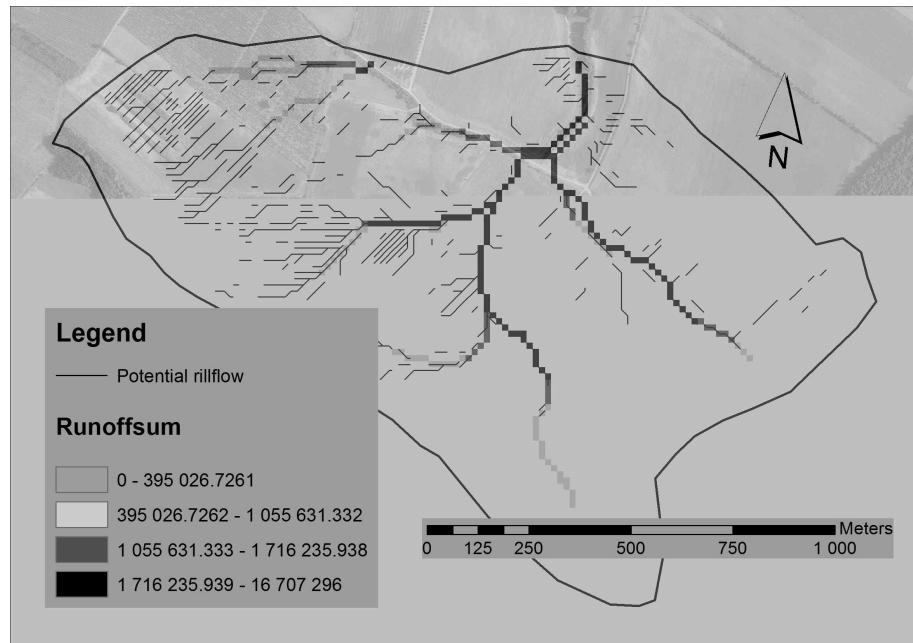


Obrázek 14: Profiles and runoff concentration - Horany

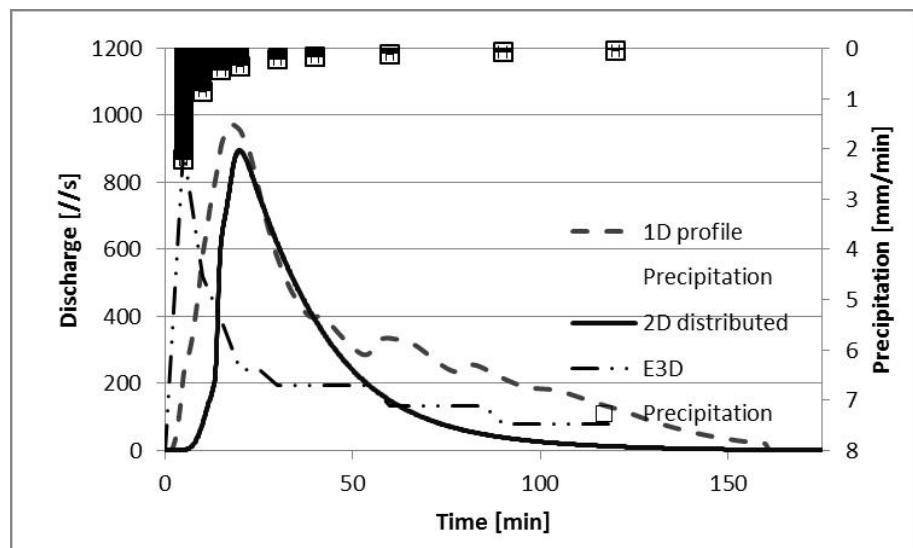


Graf 15: Hydrographs 1D and 2D Smoerdp - Horany study area

The second location is formed by the independent agricultural plot situated in the Býkovický potok basin (Benešov u Prahy) with a morphologically distinctive lane of concentration runoff. Experimental measurements of erosion processes were carried out on the given plot for a considerable period of time. It is thus possible to compare the final results for the appropriate model with measured values. Six characteristic profiles were created on the given plot (size of ten acres). This number exceeds considerably the amount of profiles which were necessary for the description of the given small area. The number of profiles was appointed in order to make comparisons between 1D and 2D approaches, as well as from the reasons explaining the influence of a large number of profiles on the final characteristics. Standardized field erosion plots were installed and situated on a farmer plot in the surveyed area for monitoring the overland flow and sediment transport. The resulting cooperation between the 1D and 2D approaches was executed during the real rainstorm with measured surface runoff.



Obrázek 16: Profiles and runoff concentration - Bykovicky catchment



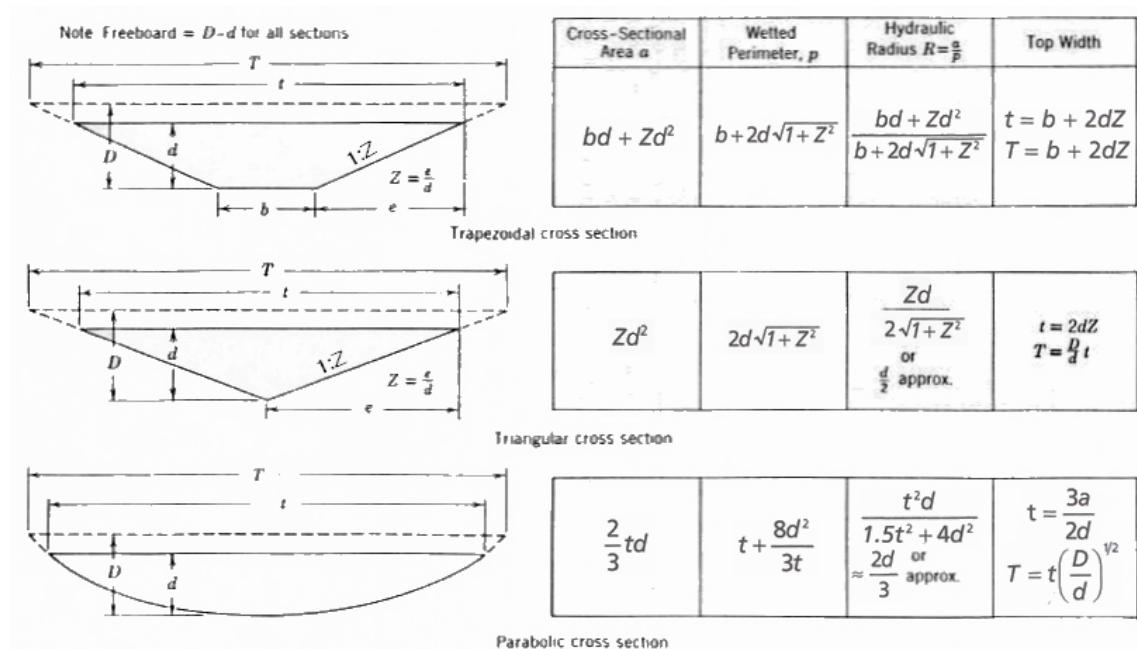
Graf 17: Hydrographs 1D and 2D Smoerop - Bykovicky catchment

The results based on hydrograph measurements taken from individual profiles in both locations were progressively added to the breach profile (outlet). In order to compare the discharge process, the values of surface level, discharge and a cell of the breach profile were extracted in the 2D model version for testing. The implementation of this process is enabled in the development environment of the particular model.

Příloha

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

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



Obrázek 18: Tvary příčných průřezů úseků hydrografické sítě a použité vztahy na výpočet hydraulického poloměru

Tabulka 11: 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 diplomičnímu 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.

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>