

---

# SMODERP2D - UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA

---

SIMULAČNÍ MODEL POVRCHOVÉHO ODTOKU A EROZNÍHO PROCESU

EDITED BY

KAVKA

...

*ČVUT*



2017

PUBLISHER

# **Obsah**

<b>Obsah</b>	<b>ii</b>
Seznam zkratek . . . . .	iii
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>I Popis řešení</b>	<b>2</b>
<b>1 Bilanční rovnice</b>	<b>3</b>
1.1 Efektivní srážka $es$ . . . . .	4
1.2 Intenzita infiltrace $inf$ . . . . .	4
<b>2 Povrchový odtok <math>o^{in}</math>, <math>o^{out}</math></b>	<b>5</b>
2.1 Plošný povrchový odtok . . . . .	5
2.1.1 Odvozené veličiny . . . . .	6
2.1.2 Určení vzniku rýhy . . . . .	6
2.2 Soustředěný odtok v rýhách . . . . .	7
2.3 Celková bilance . . . . .	9
2.4 Poznámka nebo to dát do diskuse k článku . . . . .	9
<b>3 Odtok hydrografickou sítí</b>	<b>10</b>
<b>II Použití modelu</b>	<b>11</b>
<b>1 Instalace SMODERP2D a spištění v ArcGIS</b>	<b>12</b>
1.1 Použití modelu v ArcGIS . . . . .	13
<b>2 Vstupy do modelu</b>	<b>13</b>
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 . . . . .	20
2.8	Výstupní adresář . . . . .	20
2.9	Hydrografická síť . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Tok programu</b>	<b>21</b>
3.1	Programovací jazyk Python . . . . .	25
3.2	CFL podmínka - řešení nestability výpočtu . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Výstupy z modelu</b>	<b>26</b>
4.1	Rastrové výstupy . . . . .	29
4.2	Vektorové výstupy . . . . .	31
4.3	Hydrogramy . . . . .	31
<b>III</b>	<b>Ukázka výsledků</b>	<b>32</b>
<b>1</b>	<b>Porovnání metod 1D a 2D</b>	<b>33</b>
<b>Příloha</b>		<b>36</b>
<b>Seznam použitých zdrojů</b>		<b>38</b>

## Seznam zkratek

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

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

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

$X$  parametr rovnice plošného odtoku [?]

$Y$  parametr rovnice plošného odtoku [?]

$g$  gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ]

$P$  plocha buňky [ $m^2$ ]

# Úvod

---

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

# Část I

## Popis řešení

---

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

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jedná se o distribuovaný epizodní hydrologicko-erozní model. Výpočet je řešen na pravidelné rastrové síti. Prostorová diskretizace modelu je řízena rozlišením vstupního digitálního modelu terénu. V celém řešeném prostoru je po jednotlivých buňkách v každém časovém kroku provedena bilance vstupů a výstupů a následně vypočteno odteklého množství v daném časovém úseku. Směr odtoku z buňky je stanoven pomocí odtokových algoritmů. Formálně se jedná o řešení metodou konečných diferencí s explicitně řešenou časovou diskretizací. V bilanční rovnici jsou řešený tři základní složky:

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

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

# 1 Bilanční rovnice

Základním řešeným vztahem je aktuální bilance celkového zásoby

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 1.1 Efektivní srážka $es$

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

Označme množství srážky, které dopadá na povrch půdy i rostliny během  $\Delta t$  potenciální srážkou  $PS$ . Část  $PS$ , která zůstane na povrchu rostliny během časovém kroku  $\Delta t$ , 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 se během začátku srážky plní. Výsledná intenzita efektivní srážky v čase  $t$  je pak určena jako

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

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  $i$ ):

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

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

Philipova infiltráční rovnice byla zvolena především z důvodu relativně malého počtu vstupních parametrů. Tato zjednodušená rovnice má dva členy: nasycenou hydraulickou vodivost  $K_s$  a sorptivitu  $S$ . Autoři modelu si byli vědomi omezení použití Philipovy rovnice

vyplývající z podmínek, za kterých byla odvozena. Možné odchylky způsobené volbou této rovnice odpovídají odchylkám v heterogenitě půdy a kvalitě ostatních vstupů, na jejichž základě model pracuje. Čas  $t$  ve vztahu (4) je čas od začátku srážky, který by měl být v epizodním modelu totožný s počátečním časem výpočtu. Tato nezbytná podmínka by měla být brána v potaz při přípravě vstupních dat.

## 2 Povrchový odtok $o^{in}$ , $o^{out}$

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

### 2.1 Plošný povrchový odtok

Rovnice plošného odtoku vychází z použití teorie kinematické vlny při řešení pohybové rovnice Saint-Venantových (SV) rovnic. Použití toho přístupu předpokládá mělké povrchové proudění po dlouhém plochém<sup>1</sup> povrchu. Za těchto podmínek lze u pohybové rovnice SV rovnic zanedbat lokální změny kinetické a potenciální energie a lokální zrychlení. Při tomto zjednodušení lze řešit povrchový tok jako ustálené proudění (Miller 1984). Plošný povrchový odtok pak lze řešit pomocí obecného mocninného vztahu jako

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

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

Parametr  $a$  je řešený podle vztahu:

$$a = XI^Y,$$

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

Parametry  $a$  a  $b$  respektive  $X$  a  $Y$  jsou odvozeny na základě měření (Neumann & Kavka 2015), jejich hodnoty pro různé půdní typy jsou ukázány v tabulce 10 v příloze 1. Z vyhodnocení vyplývá, že parametr  $b$  je závislý pouze na půdním druhu. Parametr  $a$  je závislý nejen na půdním druhu, ale také na sklonu svahu  $I$ . Pokud je na povrchu půdy pokryt vegetací, je třeba provést korekci pomocí Manningova součinitele drsnosti pro povrchový odtok. Parametr  $a$  je pak definován jako

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

---

<sup>1</sup>Plochém ve smyslu ne příliš zakřiveném. Nejedná se tedy o hladký povrch.

kde  $n$  je množství součinitel drsnosti.

Odteklá resp. přiteklá výška je pak dopočítána jako

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

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

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

### 2.1.1 Odvozené veličiny

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

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

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

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

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

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

### 2.1.2 Určení vzniku rýhy

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

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

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

kde  $\tau_{sur}$  je tečné napětí [ $Pa$ ],

$\rho$  je hustota [ $kg/m^3$ ],

$g$  je gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ],

$I$  je sklon [–] a

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

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

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

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

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

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

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

kde  $\tau_{crit}$  je kritické tečné napětí [Pa].

Pro každou buňku výpočetní oblasti je spočítáno  $h_{crit}$  pomocí obou odvození (8) a (9). Podmínka v modelu následně vybere menší z hodnot, která je pak při výpočtu použita jako kritérium vzniku rýh. Kritická nevymílací rychlosť a kritické tečné napětí jsou vstupní parametry modelu. Návrh hodnot pro model SMODERP2D je ukázán v tabulce 11 v příloze 1.

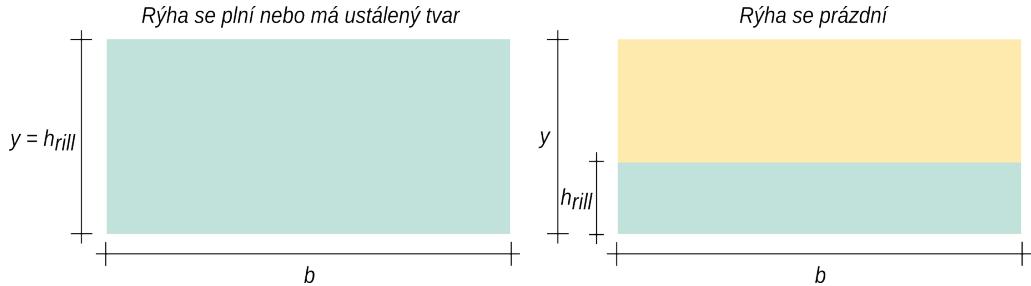
## 2.2 Soustředěný odtok v rýhách

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

- Zavedení stejných zjednodušujících předpokladů výpočtu proudění jako v případě výpočtu plošného povrchového odtoku (teorie kinematické vlny). Předpokladem je, že se tok ve všech časech a ve všech buňkách vždy dostane do ustáleného, tady že se vždy jedná o ustálené proudění. Při ustáleném proudění se předpokládá sklon dna  $I$  paralelní se sklonem hladiny vody v rýze a neměnná drsnost v celé délce buňky. Průtok v rýze je tedy vyjádřen pomocí Chézyho rovnice v Mannigově tvaru:

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

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



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

2. Soustředěný odtok vzniká v buňkách, kde dojde k překročení kritické výšky hladiny  $h_{crit}$  (viz 2.1.2). Tato hodnota je určena pro každou buňku zvlášť na základě hodnot kritického tečného napětí nebo kritické nevymílající rychlosti podle vzorců (8) a (9).
3. V každé buňce výpočetní oblasti může vzniknout pouze jedna rýha bez ohledu na velikost kroku prostorové diskretizace.
4. Objem vzniklé rýhy odpovídá nadkritickému objemu vody  $V_{rill}$ , který vychází ze vztahu:

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

kde  $V_{rill}$  je objem vody v rýze v daném elementu [ $m^3$ ],  
 $V_{tot}$  je celkový objem vody v elementu [ $m^3$ ],  
 $V_{crit}$  je objem vody do kritické hladiny [ $m^3$ ] a  
 $h_{crit}$  je výška hladiny [m].

5. Tvar přísného profilu rýhy je reprezentován obdélníkem, s pevným poměrem stran  $rill_{ratio} = \text{výška}/\text{šířka rýhy}$ . Velikost rýhy se zvětšuje pokud je nadkritické množství  $V_{rill}$  větší než objem samotné rýhy, tak aby byl splněn předpoklad v předchozím bodě. Při zvětšované 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 **soustředěný** odtok v Rovnici 3 vypadá následovně

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

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

$o_{rill}^{out}$  je výška odtoku v rýze za čas [m/s].

$n$  jsou buňky, odkud vtéká voda z rýh do buňky  $i$ .

$n$  může být prázdná množina pokud není překročena kritická výška nebo no může rovnat  $m$  z rovnice 3 pokud je použit odtokový algoritmus D8 a na všech sousedních buňkách buňky  $i$  je překročena kritická výška hladiny.

### 2.4 Poznámka nebo to dát do diskuse k článku

- Výsledný tvar blíží 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 (síť vodních toků, příkopy, průlehy, atp.) jsou zadávány v rámci jednoho shapefile. Každý jednotlivý úsek je zadán jako konkrétní linie (feature). Výpočetně model pracuje v rastrové síti. V případě, že se na dané buňce rastru vyskytuje úsek hydrografické sítě, je voda dále odváděna tímto úsekem ve směru jeho sklonu bez ohledu na směr plošného či soustředěného odtoku.

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

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

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

Pro vlastní výpočet je třeba zadat typ a příčný profil daného prvku. Délka úseku a sklonu jsou převzaty z liniové vrstvy a z digitálního modelu terénu. Protože je model určen pro malá povodí jsou v modelu předpokládány pouze základní tvary příčných profilů (trojúhelník, obdélník, lichoběžník, parabola). Vzorce pro výpočet odtoku různými geometriemi jsou uvedeny v příloze 1 v tabulce na obrázku 17. 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).

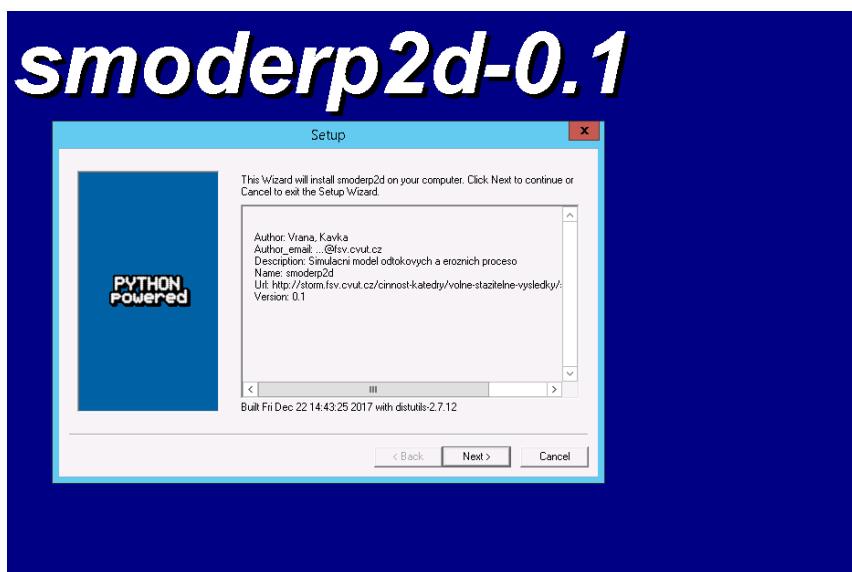
## 1 Instalace SMODERP2D a spuštění v ArcGIS

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](https://github.com) ... lze stáhnout aktuální zdrojový či vývojové vrze. Na stránkách [github.com](https://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 ??). 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 ???. 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

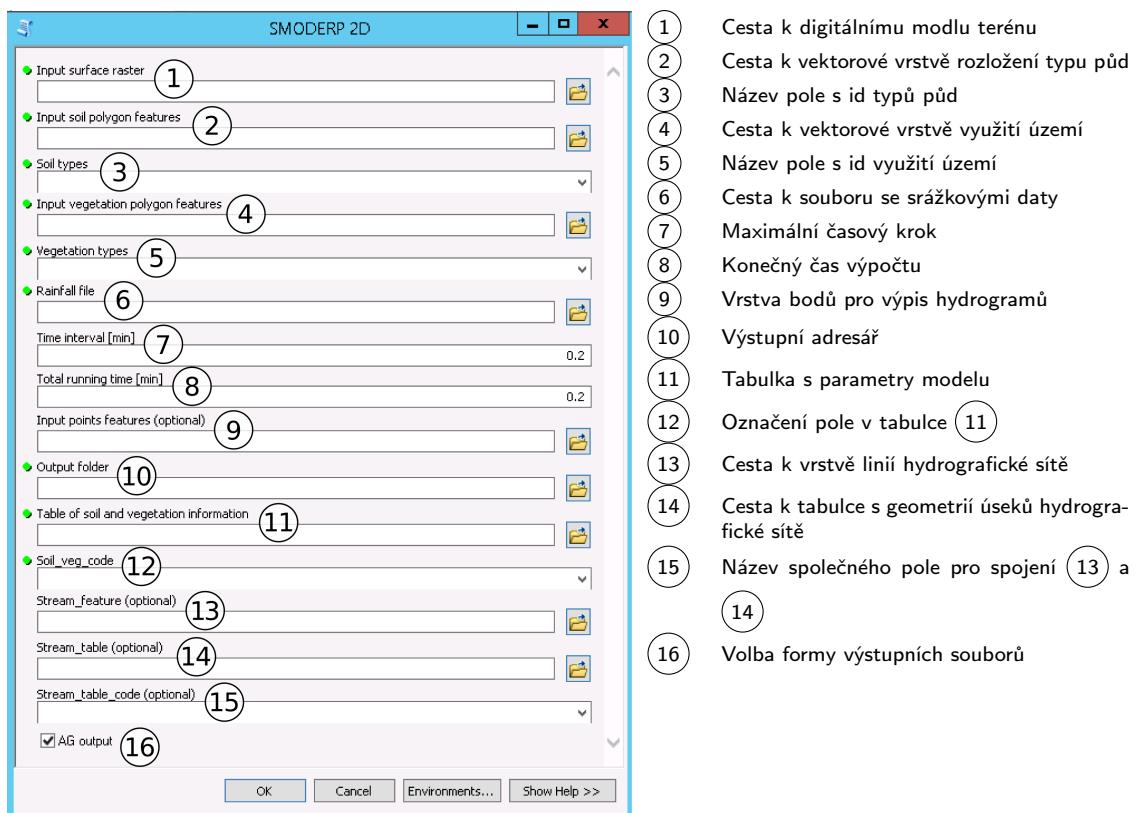
Rastr digitálního modelu terénu nebo také DMT, či anglicky DTM (Digital Terrain Model) je souvislý povrch území obvykle znázorňující morfologii určité části Země. DMT rastr je složen z jednotlivých buněk. Nejčastější formou jsou buňky čtvercové, ale mohou mít i jiný tvar. Velikost buněk se liší v závislosti 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 ingnored !!!
Computing critical level
Data preparation has been finished
Surface:
    Rill flow:
        ON
    Kinematic approach
    D8 flow algorithm
Stream:
    OFF
Subsurface:
    OFF
Save cumulative and maximum values from:
    Surface
-----
Corrected time step is 0.2 [s]
Hydrographs files has been created...
Saving data...
-----
Total computing time: 11.4509999752
press enter ...=
```

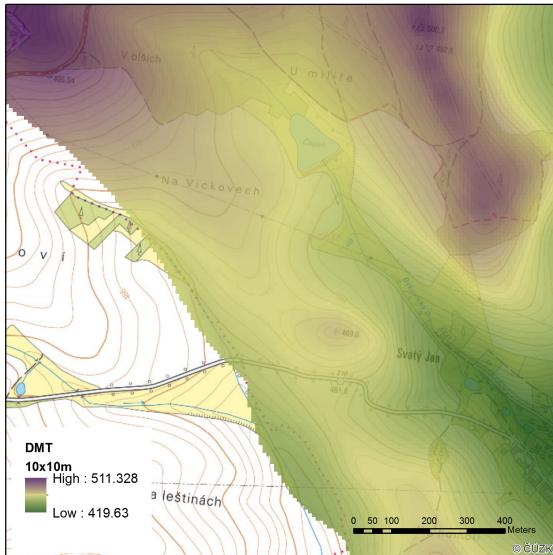
Obrázek 4: Zdárný průběh testovacího skriptu modelu



Obrázek 5: This is the caption for figure

**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 6: 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 6.

## 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 rozdelení 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 7b ukazuje výřez připravené vrstvy. Pro určení charakteristik je nutné, aby atributová tabulka dané vrstvy obsahoval identifikátor půdního typu.

Identifikátor odkazuje na půdní charakteristiky, které jsou ale uložené ve zvláštní tabulce (viz níže). Mezi půdní charakteristiky a parametry používané modelem patří:  $k$  - nasycená hydraulická vodivost [ $m s^{-1}$ ];  $S$  - sorptivita půdy [ $m \sqrt{s}$ ];  $n$  - mannigův součinitel drsnosti,  $a$  - parametr rovnice plošného odtoku [?],  $b$  - parametr rovnice plošného odtoku [?],  $X$  - parametr rovnice plošného odtoku [?] a  $Y$  - parametr rovnice plošného odtoku [?]. 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 širokorádkové<sup>2</sup>
- zemědělské plodiny úzkorádkové<sup>3</sup>

Shapefile popisující využití území je ukázán na obrázku 7c. Obdobně jako u půd v předchozí sekci je třeba atributovou tabulkou tohoto shapefilu doplnit o identifikátor daného využití území. Tento identifikátor odkazuje na charakteristiky daného povrchu definované ve zvláštní tabulce (popsáno v sekci 2.4). Parametry související s využitím území, které 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 7e je ukázán příklad takové tabulky. V prvních dvou sloupcích jsou identifikátory (id) typu půd (Soil) a typu využití území (Land Co.). Spojením těchto dvou id jsou označeny parametry pro danou kombinaci typu půdy a využití území (třetí sloupec v tabulce na obrázku 7e s označením soilveg). Význam jednotlivých veličin je popsán v tabulce 2. Při přípravě dat je nutné dodržet označení parametrů!

Na obrázku 7 jsou i ukázky jednotlivých vektorových vrstev před (obrázek 7b a 7c) a po protnutí (intersect; obrázek 7d).

<sup>2</sup>Širokorádkové plodiny jsou například brambory, kukuřice, řepa, sója a slunečnice.

<sup>3</sup>Úzkorádkové 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	$n$	mannigův součinitel drs- nosti
pi	$I_{POT}$	potencionální intercepce
ppl	$I_{LAI}$	poměrná plocha listová
ret	$ret$	povrchová retence [m]
c	$b$	parametr rovnice plošného odtoku [?]
x	$X$	parametr rovnice plošného odtoku [?]
y	$Y$	parametr rovnice plošného odtoku [?]
tau	$\tau_{crit}$	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 sloupcí. V levém sloupci je časový interval v minutách v pravém sloupci je **kumulativní úhrn** za daný časový interval v **milimetrech**. Ukázka jednoduché srážky a grafické reprezentace kumulativních dat jsou zobrazeny na obrázku 8.

## 2.6 Časový krok modelu a celková doba simulace

Časový krok modelu označený  $\Delta t$  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 zjištování 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 úseky ve vektorové vrstvě ve sloupci *smoderp*. Rovnice použity pro určení hydraulického poloměru jednotlivých tvarů příčných profilů jsou na ukázány v příloze 1 na obrázku 17

**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 9. 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/`.

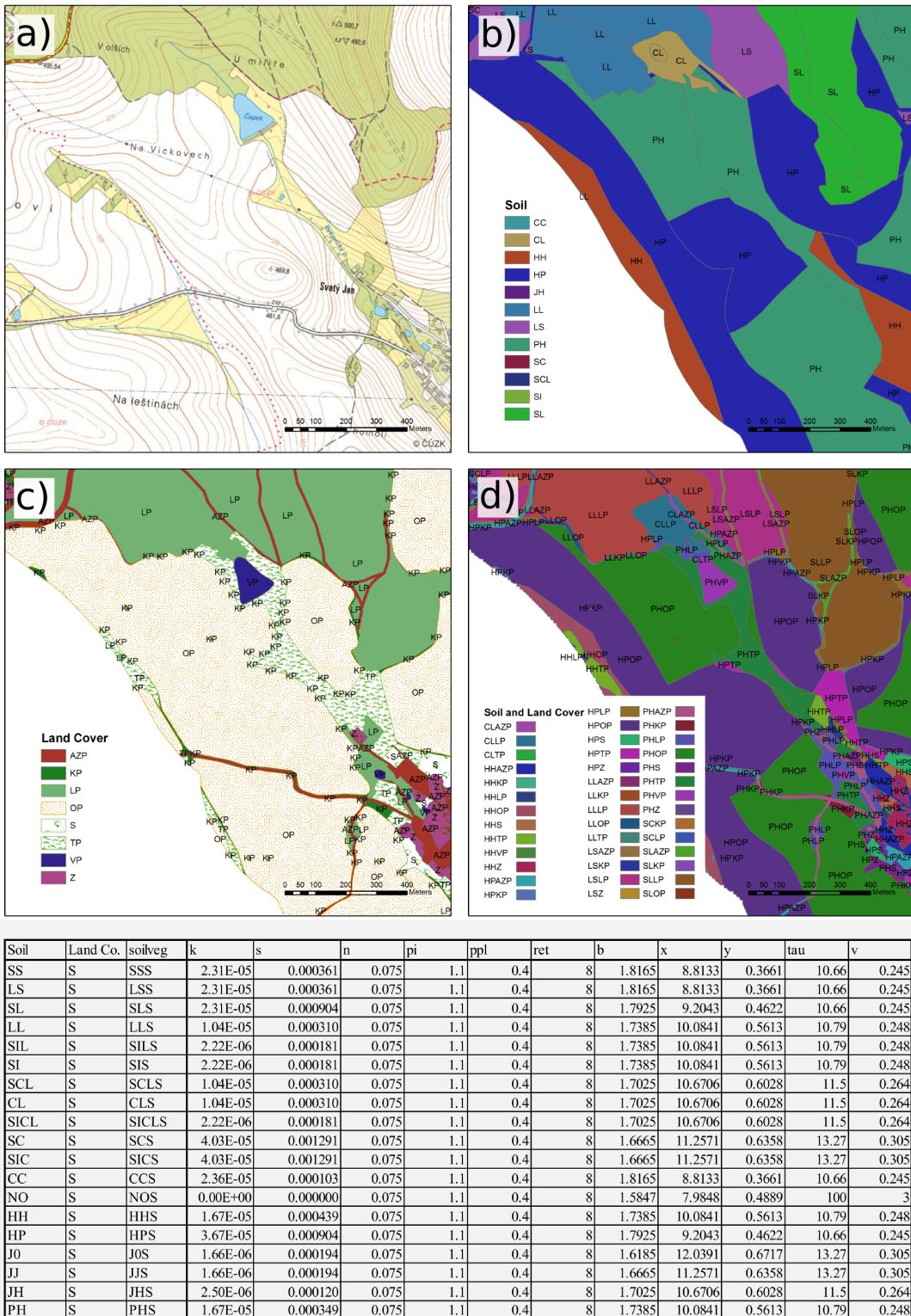
Program SMODERP2D je napsaný v jazyce Python. Python je často používaný GIS softwary jako skriptovací jazyk a jsou pro ně k dispozici knihovny pro efektivní práci s geodatami<sup>4</sup>. Programy či skripty napsané pomocí Python jsou spustitelné v prostředí daných GIS softwarů. Současná verze modelu SMODERP2D používá Python 2.7.X, který je kompatibilní s ArcGIS 10.X.

Na obrázku 12 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.

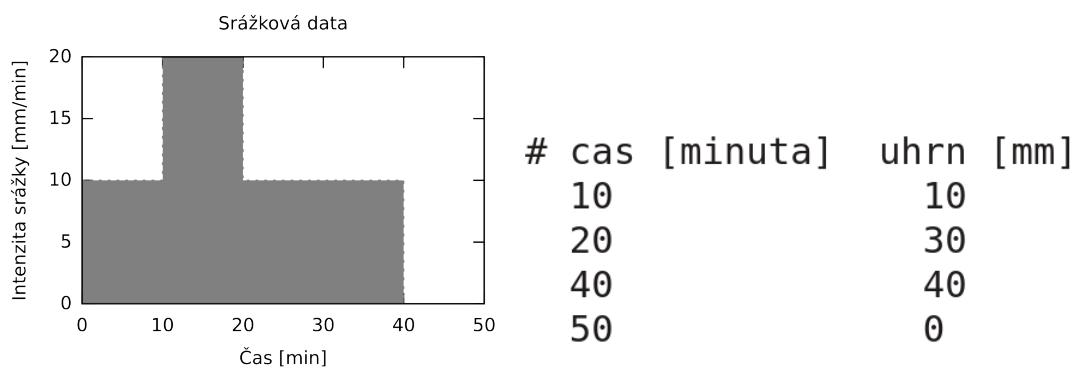
Pokud v daném časovém kroku překročí rychlosť v jakémkoli buňce Courantovo kritérium, dojde ke zmenšení časového kroku a výpočet se v daném kroku opakuje. Pokud je Courantovo kritérium nízké, je možné časový krok zvýšit. To odpovídá kontrole a aktualizaci časového kroku v diagramu na obrázku 12. Po dosažení konečného času dojde k uložení výsledných hodnot a ukončení programu.

---

<sup>4</sup>knihovna `arcpy` pro ArcGIS či knihovny `grass.script` pro GRASS GIS



**Obrázek 7:** 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 8:** 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 9: 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 [ $m/s$ ],  
 $\Delta t$  je časový krok [ $s$ ] a  
 $\Delta x$  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  $\Delta t$ . Pokud dojde ke změně  $\Delta t$  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	$CFL < 0.75 \vee 1.0 < CFL \vee 0.75 \geq CFL \geq 1.0 \vee CFL = 0.0^*$	
$\Delta t$	$= MIN(\frac{0.5601\Delta x}{v}; \Delta t_{max})$	= původní $\Delta t$

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

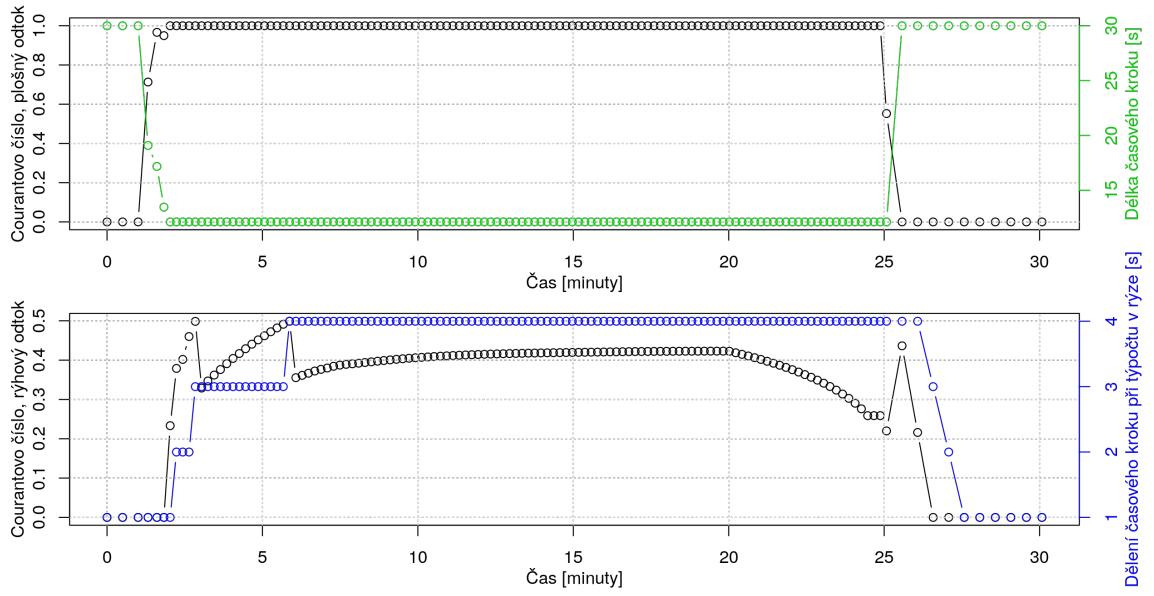
nové	$CFL_{rill} < 0.3$	$0.5 < CFL_{rill}$	$0.3 \geq CFL_{rill} \geq 0.5$ $\vee CFL_{rill} = 0.0$
$ratio$	$= MAX(ratio - 1; 1)$	$= MIN(ratio + 1; 10)$ pro $ratio = 10$	= původní $ratio$
$\Delta t_{mult}$	$= MIN((1/0.9)\Delta t_{mult}; 1)$	$= 0.9\Delta t_{mult}$ $\Delta t$	= původní $\Delta t_{mult}$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

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  $\Delta t_{mult}$ , který se po každém překročení maximální  $CFL$  zmenší na 90 % své dosavadní hodnoty. Pokud je  $CFL$  kritérium příznivé (začíná se zmenšovat) multiplikátor  $\Delta t_{mult}$  se postupně zvětšuje vždy o 10 % na hodnoty 1. Pravidla pro změnu faktoru  $ratio$  a multiplikátoru  $\Delta t_{mult}$  jsou shrnuta 5.

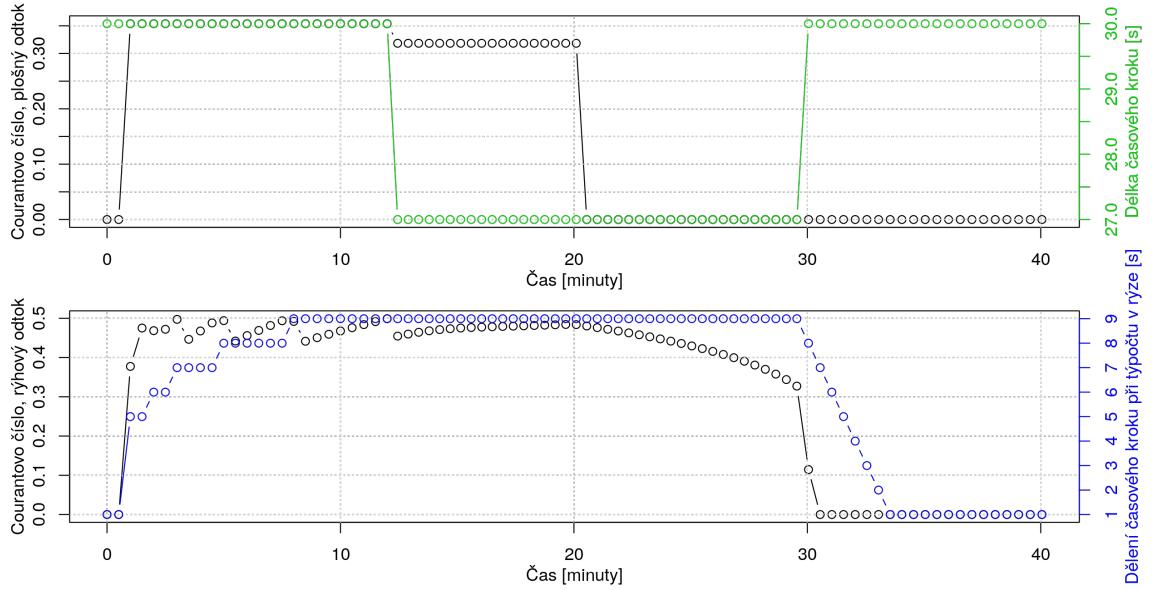
Obrázek 10 a 11 ukazují chování časového kroku v případě, že je řízen plošným obrázek 10 nebo soustředěným odtokem obrázek 11.

## 4 Výstupy z modelu

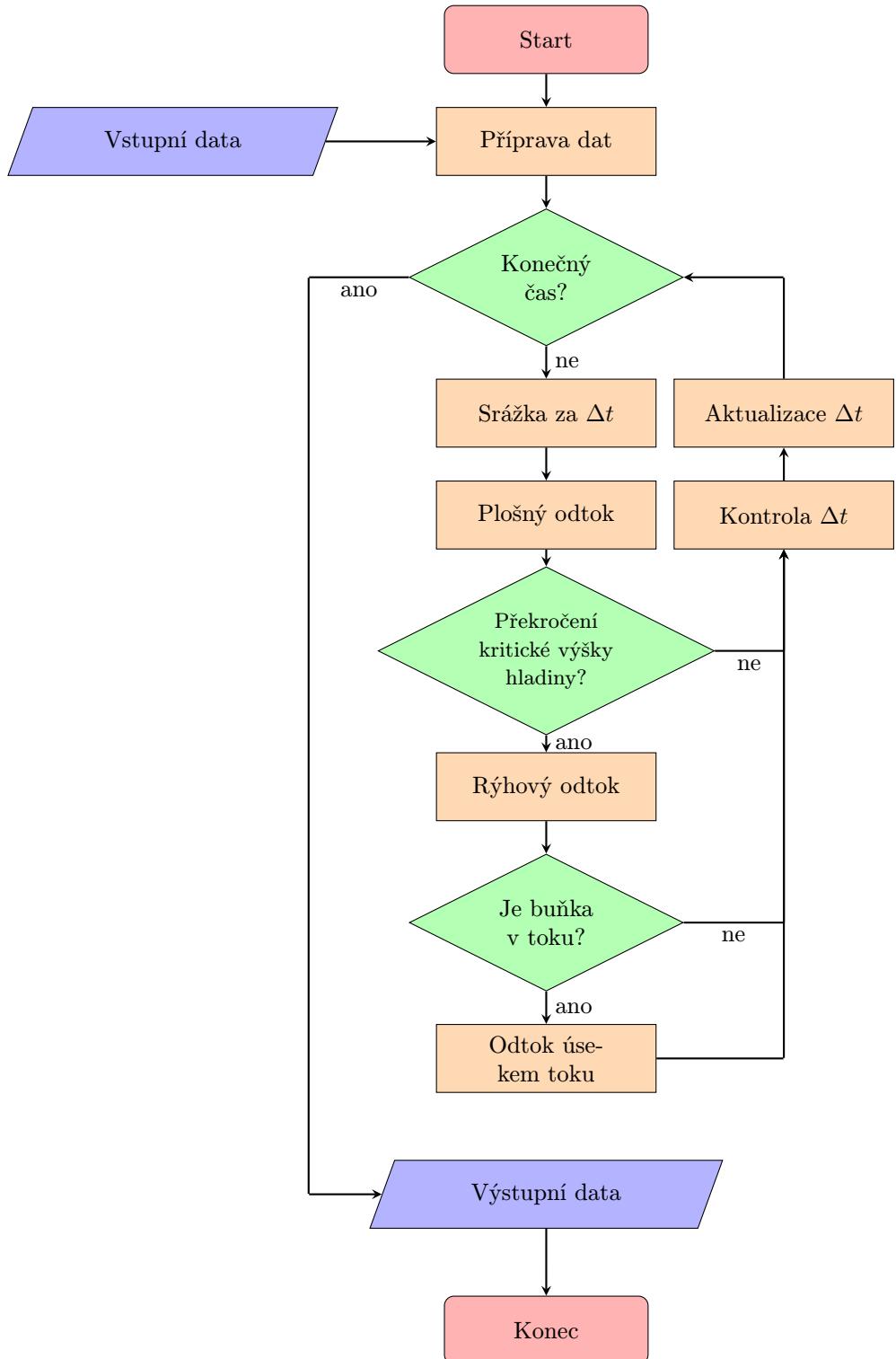
Výstupy modelu jsou uloženy do složky zadané mezi vstupními parametry (obsah složky je při spuštění programu vymazán!). Kumulativní nebo maximální hodnoty na celém řešeném území jsou na konci výpočtu uloženy v rastrovém formátu (viz kapitola 4.1). Průnik polygonů prostorového rozlišení typu půd a využití 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 10:** 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) dálka časového kroku i  $ratio$  vrátí na původní hodnoty.



**Obrázek 11:** 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) dálka časového kroku i  $ratio$  vrátí na původní hodnoty.



Obrázek 12: 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 7d. 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 <sup>3</sup> /s]	$m^3 s^{-1}$	Celkový průtok (plošný + soustředěný)
surfaceVolRunoff[m <sup>3</sup> ]	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 <sup>3</sup> /s]	$m^3 s^{-1}$	Průtok plošného odtoku
reachVolRunoff[m <sup>3</sup> ]	$m^3$	Odteklý objem plošného odtoku

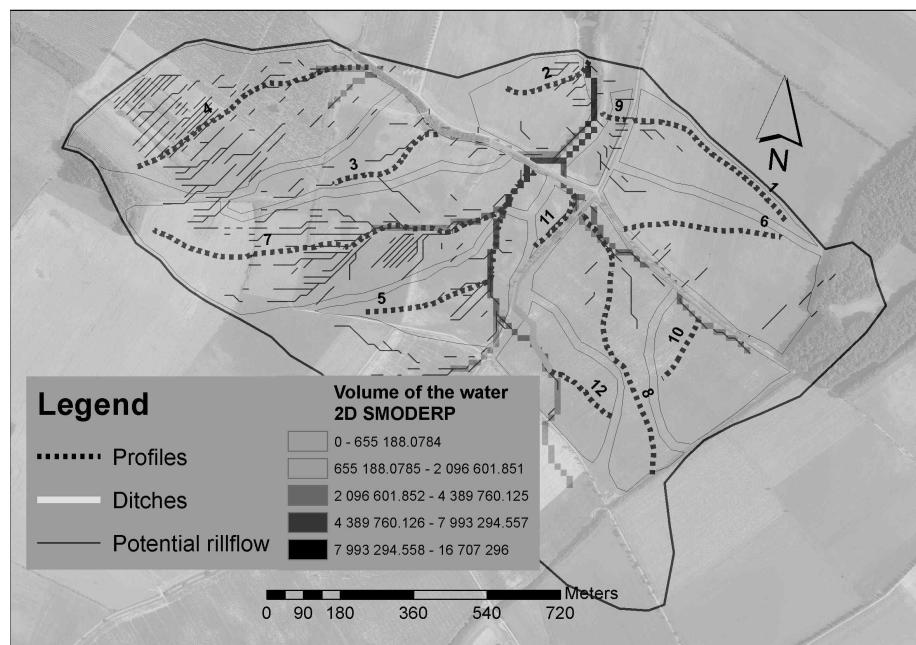
## Část III

### Ukázka výsledků

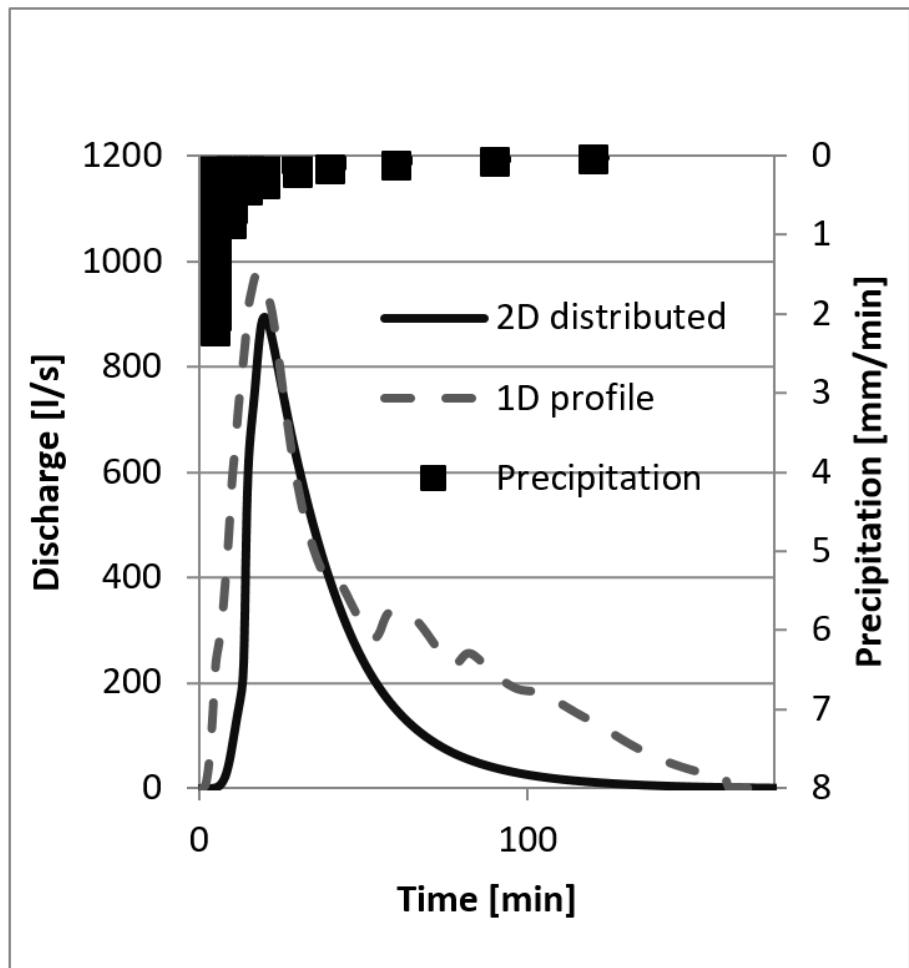
V poslední části manuálu jsou ukázány výsledky modelu SMODERP2D a jejich porovnání s původní 1D profilovou verzí na experimentálním povodí Býkovice.

## 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  $1.5 \text{ km}^2$ . Při výpočtu 1D řešení bylo vybráno 12 reprezentativních profilů. Řešené území i jednotlivé profily vybrané pro 1D výpočet jsou ukázaný na mapě na obrázku 13

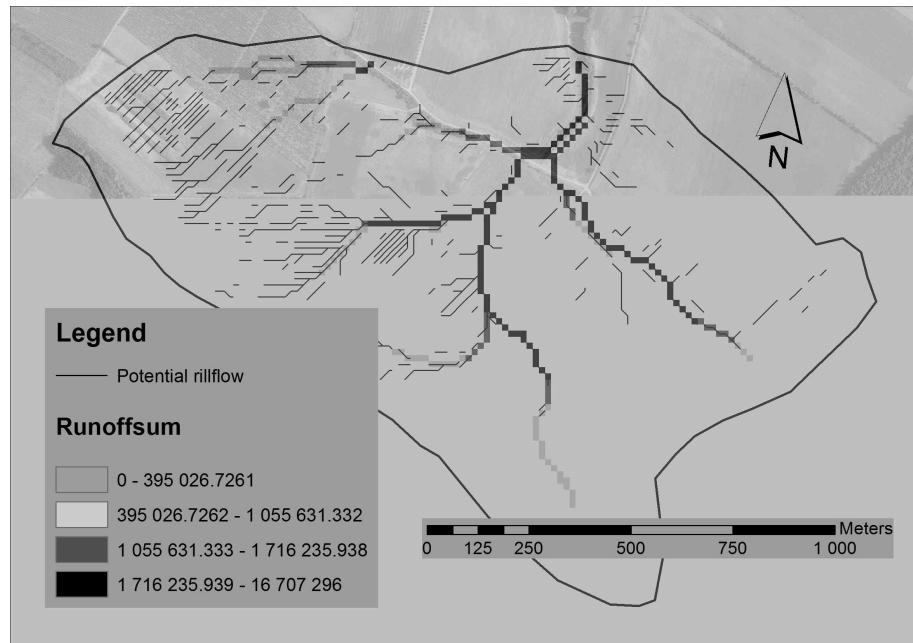


Obrázek 13: Profiles and runoff concentration - Horany

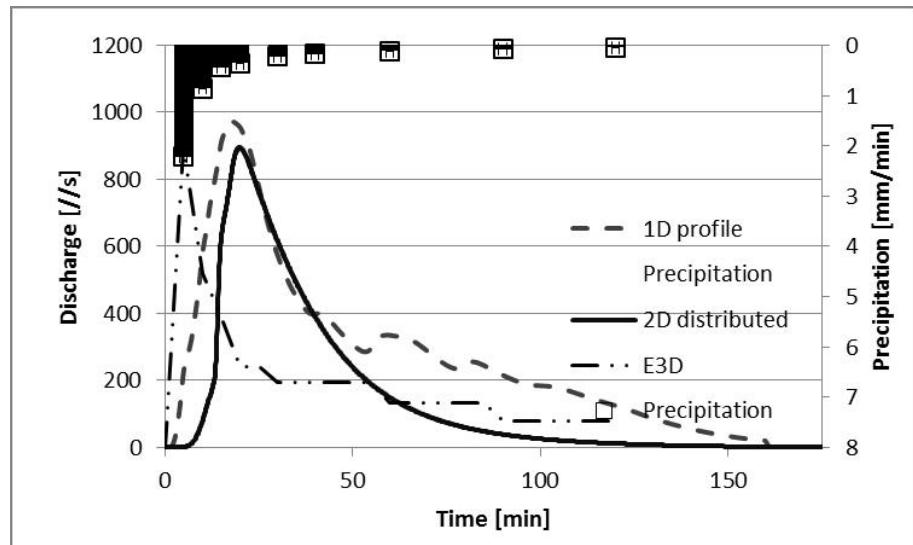


**Graf 14:** Hydrographs 1D and 2D Smoerdp - Horany study area

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 15: Profiles and runoff concentration - Bykovicky catchment



Graf 16: Hydrographs 1D and 2D Smoerop - Bykovicky catchment

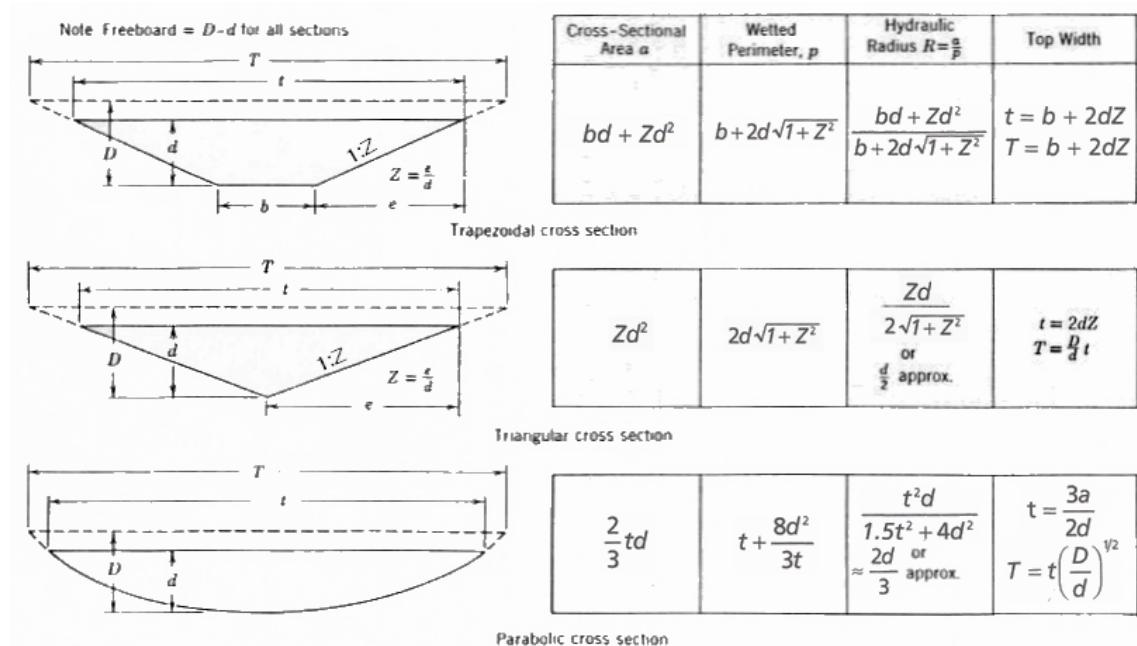
The results based on hydrograph measurements taken from individual profiles in both locations were progressively added to the breach profile (outlet). In order to compare the discharge process, the values of surface level, discharge and a cell of the breach profile were extracted in the 2D model version 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 17:** 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	[m/s]	k+d	s-d	s	[m.s-0.5]	s+d	třída	b	x	y	v	m/s	Tau	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.

Miller, J. E. (1984), Basic concepts of kinematic-wave models, Technical report.

Neumann, M. & Kavka, P. (2015), Využití dvou metod měření rychlosti povrchového odtoku ke kalibraci srážko-odtokových modelů, in ‘Voda a krajina 2015’, Praha, CZ, pp. 81–89.

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

Python Software Foundation (2017), *Python Language Reference, verze 2.7*. Dostupné na <http://www.python.org>.

Schwab, G. O. (1993), *Soil and water conservation engineering*, Wiley.

van der Walt, S., Colbert, S. C. & Varoquaux, G. (2011), ‘The numpy array: A structure for efficient numerical computation’, *Computing in Science & Engineering* **13**(2), 22 – 33.

**URL:** <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5725236&isnumber=5725228>