

# SMODERP - uživatelská příručka

Kavka

13. prosince 2017

# **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
1.3 Povrchový odtok $o^{in}$ , $o^{out}$ . . . . .	5
<b>2 Plošný povrchový odtok</b>	<b>5</b>
2.1 Odvozené veličiny . . . . .	5
<b>3 Soustředěný odtok v rýhách</b>	<b>6</b>
3.1 Celková bilance . . . . .	7
3.2 Rýhový odtok $o_{rill}^{in}$ , $o_{rill}^{out}$ . . . . .	8
3.3 Poznámka nebo to dát do diskuse k článku . . . . .	8
<b>4 Odtok hydrografickou sítí</b>	<b>8</b>
<b>II Použití modelu</b>	<b>11</b>
<b>1 Vstupy do modelu</b>	<b>12</b>
1.1 Digitální model terénu . . . . .	12
1.2 Shapefile půd . . . . .	12
1.3 Shapefile využití území . . . . .	14
1.4 Tabulka parametrů půdy a vegetace . . . . .	15
1.5 Srážkový soubor . . . . .	18
1.6 Časový krok modelu a celková doba simulace . . . . .	18

1.7	Shapefile bodů pro generování hydrogramů . . . . .	18
1.8	Výstupní adresář . . . . .	19
1.9	Rýhový odtok . . . . .	19
1.10	Vícesměrný odtok . . . . .	19
1.11	Hydrografická síť . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Tok programu</b>	<b>19</b>
2.1	Programovací jazyk Python . . . . .	22
2.2	CFL podmínka - řešení nestability výpočtu . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Výstupy z modelu</b>	<b>23</b>
<b>III</b>	<b>Ukázka výsledků</b>	<b>32</b>
<b>1</b>	<b>Porovnání metod 1D a 2D</b>	<b>32</b>
<b>Seznam použitých zdrojů</b>		<b>36</b>

## Seznam zkratек

$a$	parametr MKWA	$PS$	potenciální srážka [m]
$A$	průtočná plocha [ $m^2$ ]	$O_{tot}$	odtokové množství za čas [ $m^3/s$ ]
$b$	parametr MKWA	$O^{in}$	objem přítoku ze sousední buňky za čas [ $m^3/s$ ]
$b$	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	$O^{out}$	objem odtoku z buňky za čas [ $m^3/s$ ]
$D8$	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]	$Q_{365}$	základní odtok. V případě dočasných prvků jako jsou příkopy je tato hodnota rovna nule, v případě vodních toků se jedná o základní odtok. [ $m^3/s$ ]
$\Delta t_{mult}$	multiplikátor časový krok [-]	$O$	omočený obvod [m]
$\Delta x$	prostorový krok [m]	$I_{POT}$	potencionální intercepce
$\frac{dS}{dt}$	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 srážky [m/s]	$q_{stream}$	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 [ $ms^{-1}$ ]	$\rho$	tíhové zrychlení @@@jj není to hustota? zrychlení má jiné jednotky [ $ms^{-1}$ ]
$Inf$	infiltrované množství [ $m^3/s$ ]	$rill_{ratio}$	parametr tvaru rýhy [-]
$inf$	intenzita infiltrace [m/s]	$ratio$	celočíselný 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 [@@@jj procenta nebo stupne]	$S_i$	sorptivita půdy v buňce $i$ [ $m\sqrt{s}$ ]
$K$	součinitel šířky (pro plošný odtok $K = 1$ )	$\tau_{sur}$	tečné napětí - povrchový odtok [Pa]
$K_i$	nasyacená hydraulická vodivost v buňce $i$ [m/s]	$V_{out}$	objem objem odtekého [ $m^3$ ]
$I_{LAI}$	poměrná plocha listová	$V_{crit}$	objem vody do kritické hladiny [ $m^3$ ]
$l_{rill}$	délka rýhy [m]	$v_{rill}$	rychlosť proudění - rýhový odtok [m/s]
$mfda$	vícesměrný odtokový algoritmus		
$m$	poměr sklonu svahů (pro obdélník je roven nule)		
$n$	mannigfot součinitel drsnosti		

$V_{rill}$	objem vody v rýze v daném elementu [ $m^3$ ]	fické síťe [ $m/s$ ]
$v_{sur}$	rychllosť proudenia - plošný odtok [ $m/s$ ]	$X$ parametr MKWA
$V_{tot}$	celkový objem vody v elementu [ $m^3$ ]	$Y$ parametr MKWA
$v_{stream}$	rychllosť proudenia v úseku hydrogra-	$g$ gravitačné zrychlení [ $m/s^2$ ] $P$ plocha buňky [ $m^3$ ]

# Úvod

---

Dostává se Vám do ruky uživatelský manuál k modelu SMODERP2D. Model se celým názvem původně jmenoval 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 pro stanovení případných opatření pro snížení odtoku z povodí a pro snížení erozního ohrožení zemědělské půdy. Model neslouží jen pro navrhování konkrétních prvků na jednotlivých pozemcích, ale lze jej využít i při navrhování komplikovanějších soustav sběrných a odváděcích prvků. Dále je možné tento model využít i pro navrhování suchých nádrží a poldrů. 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 sloužící pro simulace konkrétních srážkových epizod. Nově zavedené prostorové řešení (2D), které nahradilo dřívější profilovou verzi modelu, umožňuje komplexní řešení a náhled na celou řešenou lokalitu. Z hlediska vstupních dat a vnitřních procesů se jedná sice o složitější variantu řešení. Nic méně benefity prostorového 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 rozdělen na dvě základní části. V první části jsou uvedeny výpočtové vztahy a popis jednotlivých zvolených procesů. V druhá část je pak věnována vstupním datům a výstupům. Případné aktualizace modelu, vzorová data, ukázky využití a další informace jsou pak průběžně poskytovány na stránkách modelu ([storm.fsv.cvut.cz/cinnost-katedry/volne-stazitelne-vysledky/smودerp/](http://storm.fsv.cvut.cz/cinnost-katedry/volne-stazitelne-vysledky/smودerp/)).

# Část I

## Popis řešení

---

Tato část uživatelského manuálu popisuje jednotlivé výpočetní vztahy, které jsou v modelu využity. Dále je zde pro lepší pochopení uveden hlavní tok programu a v případě, že to lépe popisuje zvolené řešení jsou zde uvedeny i popis příslušné části zdrojového kódu.

Základní odvození vztahů povrchových procesů v modelu SMODERP vychází z rovnice kontinuity a rovnice pohybové na základě kinematického principu s využitím experimentálních měření. Jak již bylo zmíněno v úvodu, jedná se o distribuovaný epizodní hydrologicko erozní model. Výpočet je řešen na pravidelné rastrové síti elementů (@@@jj neříká se tomu u rastru buňka?). Podrobnost řešení je dána rozlišením vstupního rastru. V celém řešeném prostoru je po jednotlivých elementech v každém časovém kroku provedena bilance zásoby a následně vypočteno odteklého množství za daný časový krok. Směr odtoky z elementu je stanoven pomocí odtokových algoritmů. Obecně se jedná o tři základní složky:

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

Proudění vody a množství odtoku na povrchu je pak podle řešeno třemi odlišnými typy odtoku. Mimo hydrografickou síť je se jedná o **povrchový odtok**, který je buď jako **plošný povrchový odtok** a nebo **soustředěný odtok v rýhách**. Ve vodních tocích a dočasně hydrografické síti se pak jedná o soustředěný odtok. V ploše povodí jsou směry odtoků resp. přítoků dány funkcí směru odtoku (@@@jj odvozeny na základě odtokových algoritmů). V místě vodních toků je pak veškerý tok směrován dále vodním tokem.

# 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  $O_{tot}$  rovnici 1 rozepsat takto podle složek povrchového odtoku použitých v modelu SMODERP

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

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

kde  $O^{in}$  je objem přítoku ze sousední buňky za čas [ $m^3/s$ ],  
 $O^{out}$  je objem odtoku 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, odkud vtéká voda do buňky  $i$ .

Toto  $m$  se liší podle použitého odtokového algoritmu jednosměrného  $D8$  nebo více-směrného  $mfda$  (*multi-flow direction algorithm*). Model SMODERP2D řeší časový krok explicitně, veličiny na pravé straně rovnice jsou při řešení času  $t$  známé.

Při samotném řešení se v modelu SMODERP operuje s veličinami ve výškových jednotkách. Pokud celou rovnici 2 podělíme 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 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 potenciální intercepce  $I_{POT}$ . 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  $\Delta t$  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 se plní na začátku běhu modelu. 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 (?) v následujícím tvaru (pro příslušnou buňku  $i$ ):

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

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 rovnice byla zvolena především z důvodu relativně malého počtu nutných vstupních parametrů. tato zjednodušená rovnice má dva hlavní členy nasycenou hydraulickou vodivost  $K$  a sorbtivitu  $S$ . 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.

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

Povrchový odtok je v modelu rozdělen do dvou složek a to **plošný povrchový odtok** a **soustředěný odtok v rýhách**. Z hlediska výše uvedené rovnice 3 se odtok, resp. přítok skládá z těchto dvou složek. Vznik soustředěného odtoku je podmíněn překročením limitní rychlosti, resp. limitního tečného napětí (viz. kapitola 3).

## 2 Plošný povrchový odtok

Rovnice plošného odtoku vychází z kinematického přístupu k řešení pohybové rovnice,

$$q_{sur} = ah^{sur}b,$$

kde  $q_{sur}$  je specifický plošný průtok [ $m^2/s$ ],  
 $a$  je parametr MKWA ( $a = XI^Y$ ) a  
 $b$  je parametr MKWA.

Parametry  $a$  a  $b$  respektive  $X$  a  $Y$  jsou odvozeny na základě měření, viz kapitola ???. 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. Odteklá resp. přitulká výška je pak dopočítána jako

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

kde  $\Delta x$  je prostorový krok [ $m$ ] a  
 $P$  je plocha buňky [ $m^3$ ].

**ověřit sklon v%**

### 2.1 Odvozené veličiny

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

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

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

Pro posouzení erozní ohroženosti a pro výpočet vzniku rýh je v každém elementu vypočítávána rychlosť a tečné napětí. Za předpokladu, že se jedná a proudění vody o malé hloubce, lze rychlosť proudění odvodit ze specifického průtoku a výšky hladiny:

$$v_{sur} = \frac{q_{sur}}{h^{sur}}, \quad (5)$$

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

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

$$\mathbf{tau!} = \rho g h^{sur} I K, \quad (6)$$

kde **tau!** je **tau!**,

$\rho$  je tíhové zrychlení  $[@@jj]$  není to hustota? zrychlení ma jiné jednotky  $[ms^{-1}]$ ,

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

$I$  je sklon  $[@@jj]$  procenta nebo stupně] a

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

Vypočítaná rychlosť a tečné napětie sú hlavnými kritériami pre vznik soustredeného odtoku v rýhach. Vzniku rýh je také považovaný za limitný z hľadiska erozní ohrozenosti. Umiestnení prvkov protierozných ochrany by malo byť vedené tak aby nedocházelo ke vzniku rýh. Limitné hodnoty krajných nevymilajúcich rychlosťí a tečných napětie pre jednotlivé pôdné druhy v závislosti na druhu vegetácie sú priebežne z predchozích verzí modelu (?) a sú uvedené v tabuľke ???. V literatúre sa setkáme i s odlišnými hodnotami. Napríklad M. A. Velikanov stanovil krajnú nevymilajúcu rychlosť pre pôdy  $0,24\text{ m/s}$  (?), čož je hodnota nižšia, než ktorou stanovila E. Dýrová.

### 3 Soustredený odtok v rýhach

Výpočet soustredeného odtoku v rýhach implementovaný do modelu SMODERP vychádza z niekoľkých predpokladov:

- Zavedenie stejných zjednodušujúcich predpokladov výpočtu proudenia obdobne ako v prípade výpočtu plošného povrchového odtoku, pretože se nejedná o výpočet proudenia o zanedbatelně malé hloubce. Predpokladom je, že se v jednotlivých elementech v relativne malých časových krocích jedna o rovnomenne ustálené proudenie. Při rovnomenne proudení se predpokláda sklon dna  $I$  rovný sklonu hladiny vody v rýze a shodná drsnosť v celé dĺžke elementu. Průtok v rýze je tedy vyjádřen použitím Chézyho rovnice v Mannigově tvaru:

$$q_{rill} = v_{rill} A = A \frac{1}{n} R_{rill}^{2/3} I^{1/2}, \quad (7)$$

kde  $q_{rill}$  je průtok v rýhách  $[m^3/s]$ ,

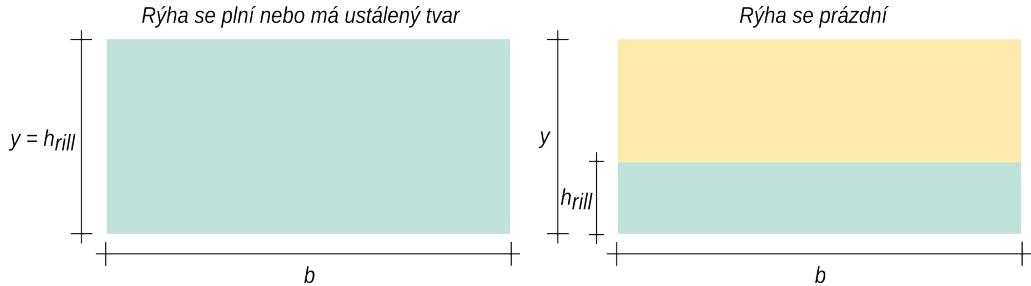
$v_{rill}$  je rychlosť proudenia - rýhový odtok  $[m/s]$ ,

$A$  je prútočná plocha  $[m^2]$ ,

$n$  je manningovou součinitel drsnosti a

$R_{rill}$  je hydraulický polomer v rýze [m].

- Soustredený odtok vzniká v elementech, kde dojde k prekročeniu kritického hladiny  $h^{crit}$  (viz. 2), ktorá je spočtena pre každý element na základe hodnot kritického tečného napětie 6 nebo rychlosťí 5.



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

3. 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 kritická hloubka [m].

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

$$R_{rill} = \frac{A}{O} = \frac{h^{rill} b_{rill}}{b_{rill} + 2h^{rill}} = \frac{b_{rill}^2 rill_{ratio}}{b_{rill}(rill_{ratio} + 2)}$$

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 pouze jako

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

$rill_{ratio}$  tedy určuje tvar rýhy pouze při jejím zvětšování.

### 3.1 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

$$h^{sur}_{i,t} = h^{sur}_{i,t-1} + \Delta t \left( es_{i,t-1} + \sum_j^m o^{in}_{j,t-1} - inf_{i,t-1} - o^{out}_{i,t-1} + \sum_k^n o^{in}_{rillk,t-1} - o^{out}_{rilli,t-1} \right), \quad (8)$$

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.

### 3.2 Rýhový odtok $o^{in}_{rill}$ , $o^{out}_{rill}$

Výška odtoku (resp. vtoku) z rýhy do dané výpočetní buňky je vypočtena za základě Chézyho rovnice 7 takto:

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

kde  $l_{rill}$  je délka rýhy [m].

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

- Výsledný tvar blíží Manningově rovnici

$$Q = \frac{A}{1} n R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (9)$$

- 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:

$$Q = \frac{1}{n} h^{2/3} S^{1/2} \quad (10)$$

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

## 4 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 erozní 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 rasterové síti, ale 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:

$$q_{stream} = A \frac{1}{n} R_{stream}^{2/3} I^{1/2}, \quad (11)$$

kde  $q_{stream}$  je průtok v otevřeném korytě [ $m^3/s$ ],  
 $v_{stream}$  je rychlosť proudění v úseku hydrografické sítě [ $m/s$ ],  
 $A$  je průtočná plocha [ $m^2$ ],  
 $n$  je mannigův 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). Zadávání tvaru příčného profilu není součástí atributové tabulky shapefile, ale pro ulehčení jsou parametry zadávány v samostatná tabulce. V případě, že jsou některé charakteristiky shodné, je tak možné jim přiřadit shodné atributy z tabulky. V rámci zjednodušení výpočtu jsou zadávány profily parametricky. Zjednodušený výpočetný model neuvažuje rozlivy z koryta zpět do buněk odtoku. Jednotlivé prvky narůstají podle zvolených parametrů, tak aby veškerá voda zůstala v korytě. Přehled parametrů je uveden v tabulce 1

**Tabulka 1:** Příklad tabulky s parametry jednotlivých úseků hydrografické sítě

cislo	smoderp	tvar	b	m	drsnost	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	
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 mannigův součinitel drsnosti,  
 $Q365$  je základní odtok. V případě dočasných prvků jako jsou příkopy je tato hodnota rovná 0.  
 $R_{stream}$  je hydraulický poloměr v otevřeném korytě [m].

Tímto způsobem jsou zadány tvary prvků, které se v řešené lokalitě vyskytují. **sem dát obrázek těch profilů**

**doplnit text jak probíhá vlastní výpočet** - tzn jak na sebe navazují jednotlivé

úseky . a dát semka asi i nějaké obrázky, jak to funguje. Je to v nějaké DP tuším (to najdu PK)

# Část II

## Použití modelu

---

Model SMODERP je napsán v programovacím jazyce Python. Příprava dat a samotný výpočet v časové smyčce jsou od sebe oddělny. Příprava dat využívá v současné době nástroje z knihoven ArcGIS, což byl jeden z primárních důvodů volby programovacího jazyka Python, který je pro prostředí ArcGIS nativním programovacím jazykem. Proces samotného výpočtu již využívá pouze standardní knihovny Python, jako je knihovna `numpy`, nebo `math`, atp. Pro přehlednost je text rozdělen do třech částí, vstupní data 1 a tok programu 2.

# 1 Vstupy do modelu

## Nutno dodělat

- upravit podle aktuálního stavu
- upravit a zjednosušit tuto kapitolu
- propojit s tabulkama co jsou jinde v textu
- vložit sem tabulky parametrů výpočtu pokud nejsou jinde

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 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 2

## 1.1 Digitální model terénu

Rastr digitálního modelu terénu nebo také DMT, či anglicky DTM (Digital Terrain Model) je souvislý povrch území obvykle znázorňující morfologii určité části Země. DMT rastr je složen z jednotlivých buněk. Nejčastější formou jsou buňky čtvercové, ale mohou mít i jiný tvar. Velikost buněk se liší v závislosti na velikosti zobrazovaného území. Pro účely modelu SMODERP 2D by minimální velikost buněk měla být 3 metry a výše. Optimum je však 5 metrů a více. Důležitá je i celková rozloha rastru, tedy počet buněk. Model byl testován na rastrech o velikosti od několika málo tisíc buněk. DMT jednoho z testovacích, povodí Nučice, obsahuje přes 125 tisíc buněk. Příklad DMT dalšího testovacího povodí Býkovice je ukázán na obrázku 2.

## 1.2 Shapefile půd

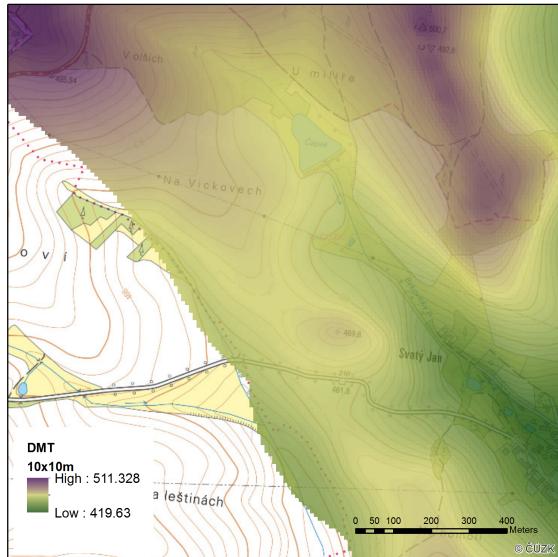
Datové zdroje fyzikálních vlastností jsou v rámci České Republiky roztríštěné. Model SMODERP 2D pracuje s jednou vstupní vrstvou půd. Příprava této vrstvy z dostupných dat je otázkou preprocessingu. V zásadě jsou tři základní dostupné datové zdroje půdních vlastností. Odděleně na zemědělské a lesní půdě nebo bezešvá vrstva půd KPP odpovídající měřítku 1:200000.

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

- písčité
- hlinitopísčité

**Tabulka 2:** Tabulka s přehledem vstupních dat modelu

Název	Typ dat	Povinný / volitelný	Popis	Více v kapitole
digitální model terénu	raster	Povinný	Tento vrstvou se řídí i prostorová diskretizace	1.1
prostorové rozložení půd	vektor - polygony	Povinný	Atributová tabulka vrstvy identifikátor typu půdy	1.2
prostorové rozložení typu vegetace	vektor- polygony	Povinný	Atributová tabulka vrstvy identifikátor typu vegetace	1.3 a 1.4
síťková data	.txt soubor	Povinný	Kumulativně zadávaná strážka	1.5
maximální časový krok	reálné číslo	Povinný	Model mění délku časového podle odtokových podmínek; doporučuje se 30 - 60 sekund	1.6
výstupní adresář	text	Povinný	Adresář k uložení výsledků (při zátku výpočtu se adresář vyčistí!)	1.8
bodové výstupy hydrogramů	vektor - body	Volitelný	Body, kde se vypíší výsledky.	1.7
volba výpočtu	text	Povinný	Uživatel má na výběr: pouze plošní odtok, plošný i rýhový odtok, plošný rýhový odtok i odtok hydrografickou sítí	1.9
volba výcesměrného odtoku	logická proměnná	Povinný	Výchozí je jednosměrný odtok. Uživatel může zvolit vícesměrný odtok.	1.10
parametry půdy a vegetace	tabulka	Povinný	Tabulka parametrů půdy a vegetace. Názvy sloupců mají definované označení. Hodnoty se spojí s vektorovými vrstvami.	1.4
hydrografická síť	vektor - linie	Volitelný	Prostorové rozložení hydrografické sítě. Atributová tabulka obsahuje identifikátor jednotlivých linií hydrografické sítě.	1.11
parametry hydrografické sítě	tabulka	Volitelný	Tabulka parametrů jednotlivých úseků hydrografické sítě	1.11
volba arégis výstupů	logická proměnná	Povinný	Výchozí formát výstupních rastrů je proprietární formát ERSI. Uživatel může zvolit textový formát ASCII.	—



**Obrázek 2:** Výřez digitálního modelu terénu povodí Býkovice

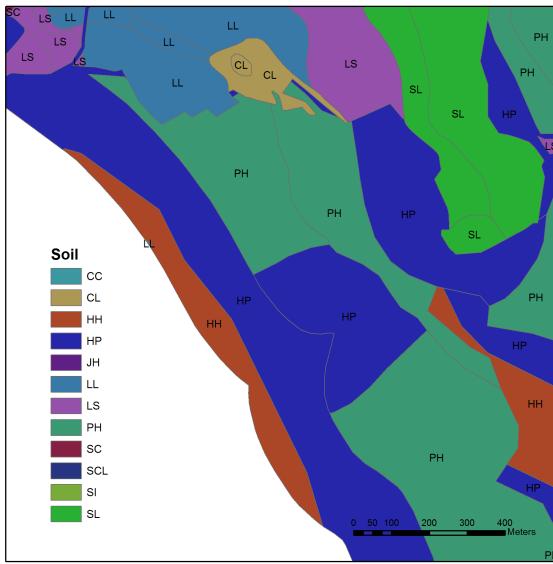
- písčitohlinité
- hlinité
- jílovitohlinité
- jílovité
- jíl

Na lesních půdách je v České Republice standardně využíván popis kategorií podle klasifikace USDA. Obrázek 3 ukazuje výřez připravené vrstvy po spojení z různých datových zdrojů. Pro určení charakteristik je nutné aby obsahoval atributové pole udávající identifikátor půdního typu. Identifikátor odkazuje na půdní charakteristiky, které jsou definované v dalších vstupech (popsáno v sekci 1.4).

### 1.3 Shapefile 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



Obrázek 3: výřez půdní mapy s vyznačenými půdními druhy

- zemědělské plodiny širokořádkové
- zemědělské plodiny úzkořádkové

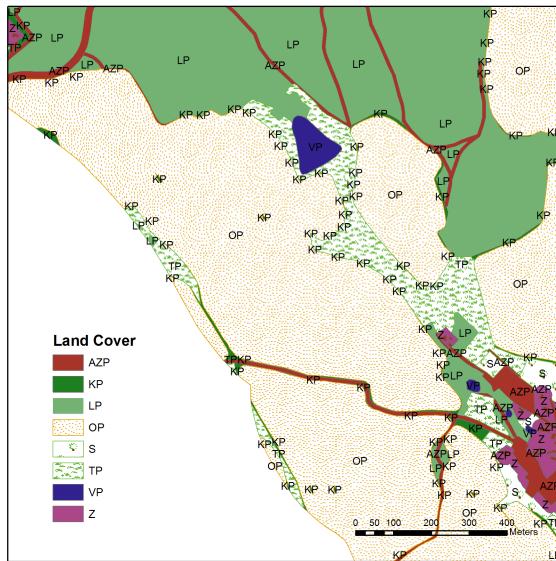
*Širokořádkové plodiny jsou například brambory, kukurice, řepa, sója a slunečnice. Úzkořádkové plodiny jsou obiloviny nebo řepka.* Shapefile popisující typ vegetace je na obrázku 4. Obdobně jako u půd v předchozí sekci je třeba atributovou tabulkou tohoto shapefilu doplnit o identifikátor daného typu vegetace. Tento identifikátor odkazuje na charakteristiky daného vegetačního povrchu definované v dalším vstupech (popsáno v sekci 1.4).

#### 1.4 Tabulka parametrů půdy a vegetace

Tento vstup je tabulka, na kterou se odkazují identifikátory půdního typu a typu vegetačního pokryvu v atributových tabulkách polygonových vrstev. Tato tabulka může být do modelu vložena jako textový soubor. Na obrázku 5 je ukázán příklad takové tabulky. V prvních dvou sloupcích jsou složeny identifikátory (id) typu půd (Soil) a typu vegetace (Land Co.). Spojením těchto dvou id jsou označeny parametry pro danou kombinaci typu půdy a vegetačního pokryvu (třetí sloupec v tabulce na obrázku 5 s označením soilveg). Význam jednotlivých veličin je popsán v tabulce 3. Při přípravě dat je nutné dodržet označení parametrů.

Na obrázku 5 jsou i ukázky jednotlivých vektorových vrstev před a po protnutí (intersect).

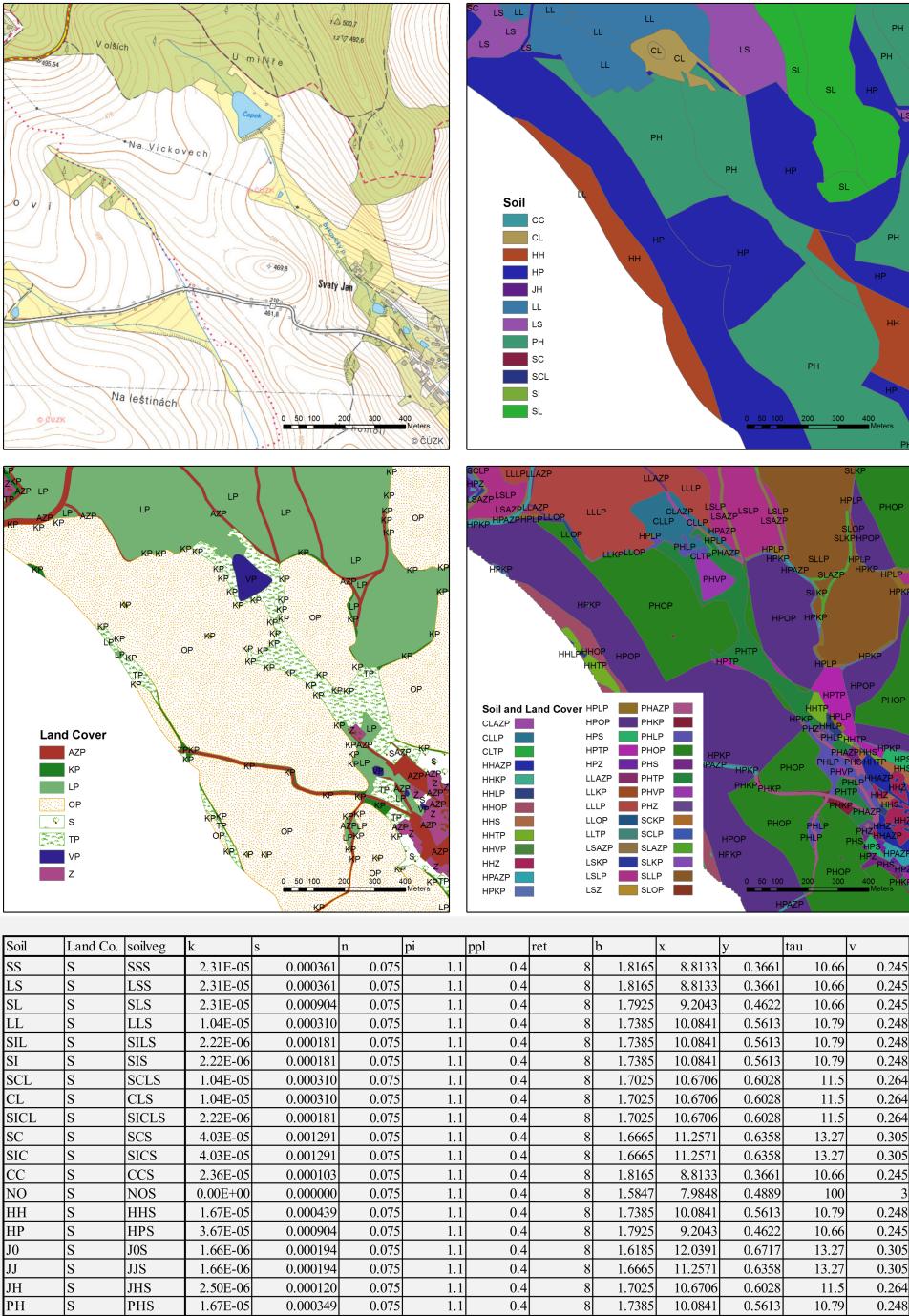
**nebo co toto** ty obrázky mám i zvlášť, @@@jj dal bych je zvlášť, dá se napsat popisek ke každému zvlášť i jeden společný (obr 5a, 5b, 5c....)



Obrázek 4: Ukázka vektorové vrstvy využití území - Land Cover

Tabulka 3: Přehled parametrů charakterizujících půdní typ a typ vegetačního pokryvu

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



**Obrázek 5:** Princip propojení vektorových vrstev s tabulkou obsahující parametry typu půdy a vegetace. Vlevo nahoře: mapa daného území; Vpravo nahoře: rozložení typu půdy; Vlevo uprostřed: rozložení typu vegetačního pokryvu; Vpravo uprostřed: protnutí obou předchozích vrstev; Dole: tabulka s parametry

Meze jednotlivých parametrů jsou podrobněji popsány v kapitole XXX. Součástí ma-

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

Obrázek 6: Ukázka srážkových dat. V intervalu 0 - 10 minut je úhrn 3 mm, v intervalu 10 - 60 minut je úhrn 40 mm a v intervalu 60 - 70 úhrn 0 mm

nuálu jsou i vzorové tabulky (do prilohy).

## 1.5 Srážkový soubor

Dalším vstupem je textový soubor obsahující srážková data. Srážky se zadávají jako textový soubor se dvěma sloupcí. V levém je časový interval v minutách v pravém **kumulativní úhrn** za daný časový interval v **milimetrech**. Například hodnoty na obrázku 6 ukazují, že za prvních 10 minut běhu modelu například hodnoty na každou buňku rastru 3 mm, v období 10 - 60 minut 40 mm a od 60. minut je srážka 0 mm.

## 1.6 Časový krok modelu a celková doba simulace

Časový krok modelu označený  $\Delta t$  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 zachovávána numerická stabilita explicitního řešení. Velikost časového kroku závisí na rychlosti povrchového odtoku a na velikosti prostorového kroku (velikosti buňky DMT). Maximální časový krok záleží na požadovaném detailu výstupních dat zejména při dotoku srážkové epizody, kdy jsou již rychlosti proudění nižší a kde by v tom příkladě Courantova kritérium povolovalo příliš velký časový krok. Zvolené řešení změn časového kroku je detailněji popsáno v kapitole 2.2.

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

## 1.7 Shapefile bodů pro generování hydrogramů

Jedná se o bodovou vrstvu. V těchto bodech se budou uživateli ukládat časové řady počítaných veličin. Tento volitelný vstupní parametr je podrobněji popsán ve výstupech 3.0.0.2.

## 1.8 Výstupní adresář

Výstupní adresář je složka, do které se uloží veškeré výsledné rastry a výstupní textové soubory. Na začátku běhu programu se obsah tohoto adresář celý vymaže, proto se doporučuje vždy provést kontrolu. V žádném případě nenastavujete jako výstupní adresář pracovní plochu, či jiný adresář, kde byste mohli mít uložena důležitá data!

## 1.9 Rýhový odtok

Tento volitelný parametr po zaškrnutí umožní výpočet soustředěného odtoku. Soustředěný odtok je popsán v sekci 3.

## 1.10 Vícesměrný odtok

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

## 1.11 Hydrografická síť

Hydrografickou sítí jsou myšleny nejen vodní toky, ale i prvky dočasné hydrografické sítě jako jsou příkopy, průlehy, cesty s příkopy a pod. Výpočet v modelu probíhá po jednotlivých úsecích pomocí Manningovi rovnice pro výpočet průtoku. Prostorové umístění jednotlivých prvků je formou shapefile (**Vrstva toků - Stream feature**). Jednotlivé vektory reprezentují úsek se stejnými charakteristikami. Tvar úseku, drsnost, základní průtok jsou pak zadávány pomocí externí tabulky kde jsou uvedeny charakteristiky pro jednotlivé typy úseků (**Tabulka vodních toků - Stream table**). Pro propojení prostorové informace s charakteristikami úseků je třeba mít v atributové tabulce shodný kód jako ve vrstvě vodních toků (**Kód vodních toků - Steam table code**).

## 2 Tok programu

Samotný program je rozdělen do několika podadresářů a souborů. Adresářová struktura s popisem nejdůležitějších adresářů a souborů je ukázána na obrázku 7. Klíčový soubory je `data_preparation.py`, kde je proveden *preprocessing* vstupních dat. Dalšími důležitými souborem jsou soubory `runoff.py` a `time_step.py` zde je samotné řešení modelu. Soubory v adresáři `main_classes/` obsahují definici datových struktur jednotlivých řešených dějů a skládají dohromady metody k řešení jednotlivých dějů modelu. Tuto metody jsou pak definované v adresáři `processes/`.

Program SMODERP je napsaný v jazyce Python. Python je často používaný GIS softwary jako skriptovací jazyk a jsou pro ně k dispozici knihovny pro efektivní práci s geodat<sup>1</sup>. Programy či skripty napsané pomocí Python jsou spustitelné v prostředí da-

---

<sup>1</sup>knihovna arcpy pro ArcGIS či knihovny grass.script pro GRASS GIS

ných GIS softwarů. Současná verze modelu SMODERP používá Python 2.7.X, který je kompatibilní s ArcGIS 10.X.

Na obrázku 10 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 (rovnice 8). Pokud je řešená buňka tok, načítá se celkový přítok  $\sum_j^m o^{in}_{j,t-1}$  (případně  $\sum_k^n o^{in}_{rillk,t-1}$ ) v rovnici 3 (8) do daného úseku toku, kde se odtok řeší pomocí Chezyho rovnice.

Pokud v daném časovém kroku překročí rychlosť v jakékoli 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 10. Po dosažení konečného času dojde k uložení výsledných hodnot a ukončení programu.

```

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

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

    ├── io_functions/ ..... Metody zprostředkovávající
        ├── 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 7: soubory a adresa modelu SMODERP

## 2.1 Programovací jazyk Python

Python je objektově orientovaný programovací jazyk, který se může využít v mnoha oblastech vývoje softwaru. Nabízí významnou podporu k integraci s ostatními jazyky a nástroji a přichází s mnoha standardními knihovnami. Jeho použití je velice široké od programů na zpracování multimedií až po zpracování textů. Python není závislý na platformě, na které běží ?. Zajímavým rozšířením jazyka Python je NumPy. Je to balíček užívaný pro vědecké výpočty. Umožnuje podporu velkých, multi-dimenzionálních polí a matic, spolu s velkou knihovnou matematických funkcí pro práci s těmito poli ?. Pomocí tohoto balíčku bylo v programu operováno s naprostou většinou polí a matic. V současnosti (Prosinec 2013) je nejnovější verze jazyka 3.3.3. Poslední verze vývojové větve 2.x Pythonu vyšla v roce 2010 a byla to verze 2.7. Nyní všechna vylepšení jazyka už jsou dělána pro vývojovou větev 3.x. K tvorbě programu byla zvolena verze 2.6.5, která je kompatibilní s programem ArcGIS 10.0.

## 2.2 CFL podmínka - řešení nestability výpočtu

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

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

$$CFL = \frac{1}{0.5601} \frac{v\Delta t}{\Delta x} \quad (12)$$

kde  $CFL$  je Courant-Friedrich-Lewy podmínka,  
 $v$  je rychlosť plošného či rýhového toku,  
 $\Delta t$  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 12. 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.

Proudění v **rýhách** je zpravidla řádově rychlejší než plošný odtok. Pokud bychom v tomto případě uplatňovali stejný princip jako u plošného odtoku, časový krok by byl musel být velmi malý čímž by se prodlužoval strojový čas výpočtu. K odtoku v rýhách většinou nedochází na celém území, ale pouze v poměrně malém počtu buněk (v poměru k celé ploše výpočetní oblasti). Proto se při výpočtu rýhového odtoku přistoupilo k lokálnímu krácení

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

časového kroku pouze v buňkách, kde k rýhovému odtoku skutečně dojde. Časový krok v rýhách je dělen celočíselně faktorem označeným jako  $ratio$ .  $CFL$  číslo se proto ukládá zvlášť u plošného a zvlášť u rýhového odtoku. Ke změně časového kroku plošného odtoku dojde pokud  $ratio > 10$ . Časový krok plošného odtoku je pak násoben multiplikátorem  $\Delta t_{mult}$ , který se po každém překročení maximální  $CFL$  zmenší na 90 % své dosavadní hodnoty. Pokud je  $CFL$  příznivé multiplikátor  $\Delta t_{mult}$  se postupně zvětšuje vždy o 10 % na hodnoty 1. Pravidla pro změnu faktoru  $ratio$  a multiplikátoru  $\Delta t_{mult}$  jsou shrnuty 5.

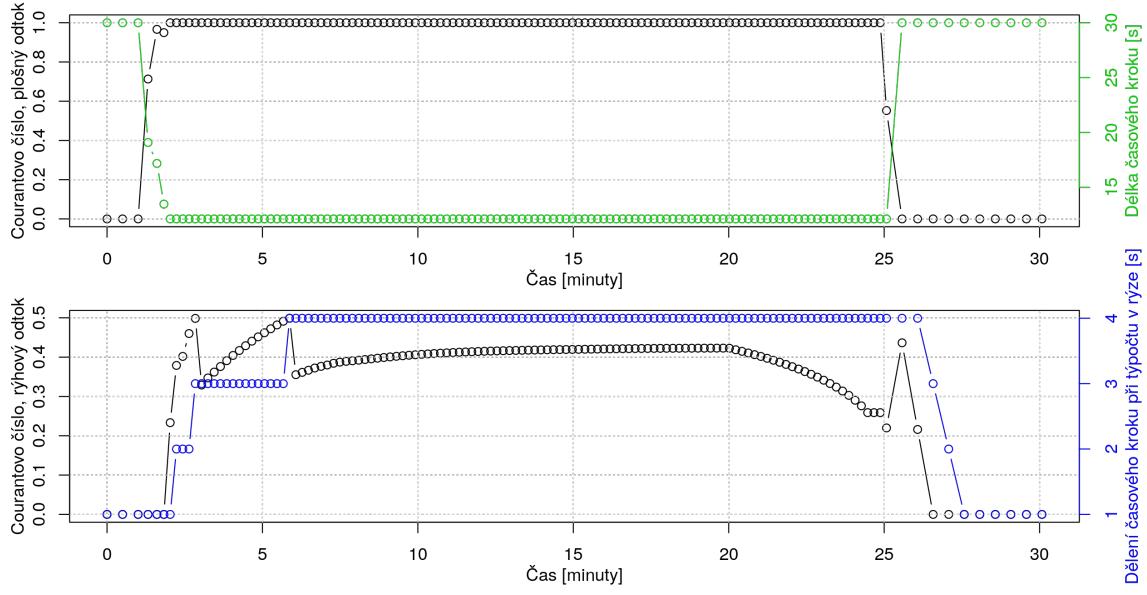
Obrázek 8 a 9 ukazují chování časového kroku v případě, že je řízen plošným obrázek 8 nebo rýhovým odtokem obrázek 9.

### 3 Výstupy z modelu

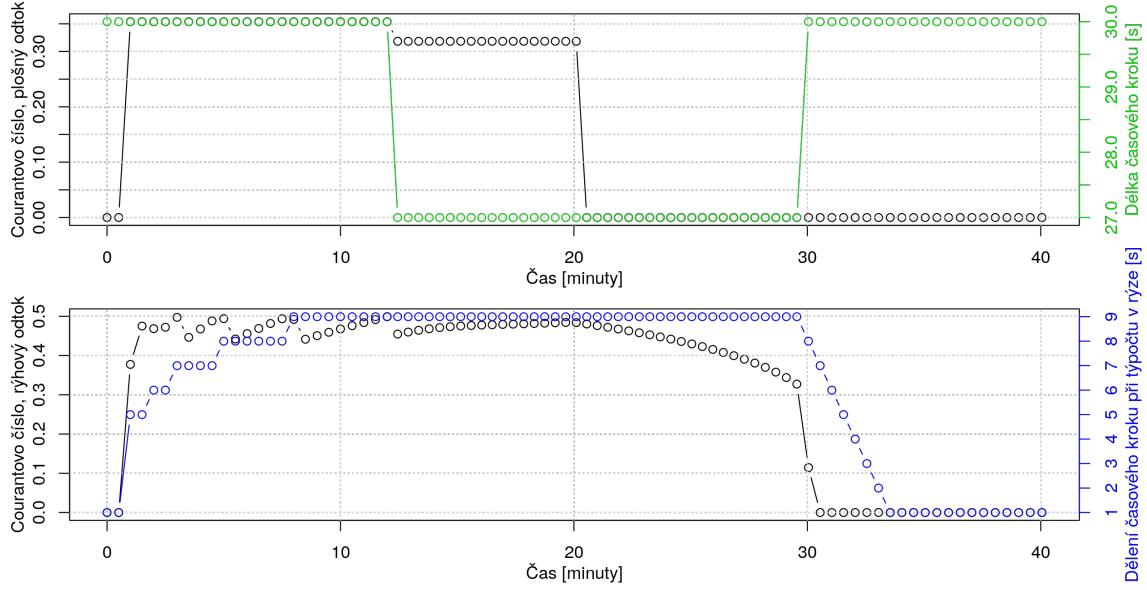
#### Zde dodelat

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

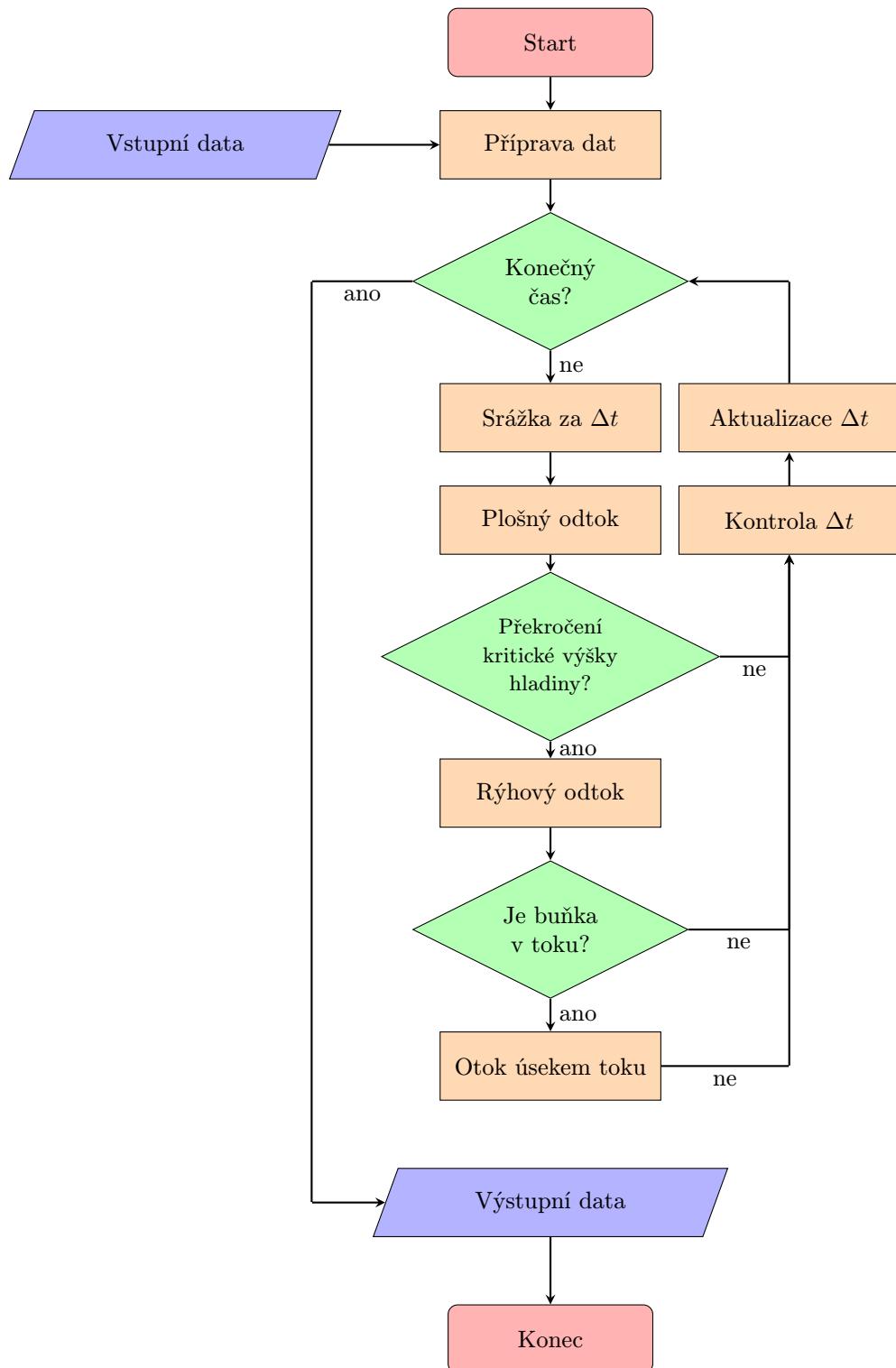
Výstupy modelu jsou uloženy do složky zadané mezi vstupními parametry (obsah složky je při spuštění programu vymazán!). Kumulativní nebo maximální hodnoty na celém řešeném území jsou na konci výpočtu uloženy v rastrovém formátu (viz. kapitola 3.0.0.1). Volitelné výstupy hydrogramů v bodech ve formě časových řad jsou uloženy do textových souborů s příponou dat (viz. kapitola 3.0.0.2). Pokud model počítá i úseku hydrografické sítě, jsou kumulativní nebo maximální hodnoty veličin jednotlivých úseků vypsáný v tabulce v textovém formátu (viz. kapitola 3.0.0.3), prostorové rozložení jednotlivých úseků je uloženo jako jeden s rastrů (viz. kapitola 3.0.0.1). Jednotlivé výstupy jsou dále popsány podrobněji.



**Obrázek 8:** Časový krok řízen rychlosí plošného odtoku.  $CFL$  rychle stoupne k 1 a začne zkracovat časový krok (horní graf). Pár minut později  $CFL_{rill}$  stoupne nad 0.5,  $ratio$  stoupne na 2 (dolní graf) tím začne lokálně dělit časový krok při výpočtu rýhového odtoku.  $ratio$  na spodním grafu stoupne maximální na 4 a neovlivní tedy celkový časový krok (na horním grafu). Na obou grafech je vidět jak se po 25 minutě (kdy v modelu skončila srážková událost) délka časového kroku i  $ratio$  vrátí na původní hodnoty.



**Obrázek 9:** Časový krok řízen rychlosí rýhového odtoku.  $CFL$  plošného odtoku nepřekročí během výpočtu hodnotu cca 0.35 (na horním grafu), proto nemá žárný vliv na velikost časového kroku.  $CFL_{rill}$  rychle vystoupí 9 krát nad kritickou hodnotu 0.5 (spodní graf, prvních 10 minut výpočtu). To způsobí nárůst  $ratio$  na 9 což je maximální povolené dělení lokálního časového kroku při výpočtu rýhového odtoku. Při dalším překročení hodnoty 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 10: Flow chart toku programu

### **3.1 Rastrové výstupy**

V rastrech jsou uloženy vybrané veličiny na celém řešeném území. Jako rastrový formát lze zvolit proprietární ESRI formát nebo textový formát ASII. Přehled rastrových výstupních souborů je shrnut v tabulce 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 intercepce 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	<i>NA</i>	doplnym
mShearStressPa	<i>Pa</i>	tečné napětí
reachFID	<i>NA</i>	Buňky mimo tok mají <b>NODATA</b> hodnotu nebo id daného úseku toku.
massBalance	$m$	Bilance všech vstupů a výstupu z a do buňky

## 3.2 Hydrogramy

Pokud jsou do vstupů zadány body pro výpis hydrogramů, vypíší se do testových souborů s příponou `.dat`. Vysané veličiny jsou závislé na typu odtokového procesu resp. typu výpočtu. Popis veličin při povrchovém resp. povrchovému i soustředěnému odtoku (typ výpočtu `only sheet runoff` resp. `rill and sheet runoff`, viz kapitola 1.9) je shrnut v tabulce 7. Pokud je v buňce úsek hydrografické sítě, vypisují se pouze hodnoty celého úseku. Názvy a význam veličin popisující úsek toku je popsán v tabulce 8. Model v současné verzi uvažuje, že pokud je v buňce úsek toku, zabírá úsek celou buňku, přestože jeho šířka menší než je šířka samotné buňky.

**Tabulka 7:** Popis veličin v `.dat` souborech

Název sloupce	Jednotka	Popis
time[s]	s	Čas výpočetního kroku
deltaTime[s]	s	Aktuální délka časového kroku
rainfall[m]	m	Srážková výška v aktuálním časovém kroku
totalWaterLevel[m]	m	Celková výška hladiny
surfaceFlow[m <sup>3</sup> /s]	$m^3 \text{s}^{-1}$	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 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
reachWaterLevel[m]	m	Výška hladiny plošného odtoku
reachFlow[m <sup>3</sup> /s]	$m^3 \text{s}^{-1}$	Průtok plošného odtoku
reachVolRunoff[m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup>	Odteklý objem plošného odtoku

## 3.3 Tabulka hodnot úseků

V této tabulce uložené v textovém formátu jsou zapsány maximálních a kumulativních hodnot jednotlivých úseků. Hodnoty tabulce lze následně přiřadit podle identifikační hodnoty v prvním sloupci k jejich geografické reprezentaci v libovolném GIS softwaru. Názvy sloupců tabulky a jejich popis je stručně proveden v tabulce 9

**Tabulka 9:** Popis veličin tabulky úseků hydrografické sítě

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

### 3.4 State - typ průtoku na buňce

Jak bylo popsání no v kapitole 2 v modelu je možné řešit několik typů povrchového odtoku: plošný odtok, soustředěný odtoku a odtok hydrografickou sítí. Topografie hydrografické sítě je definována uživatelem. Vznik soustředěného odtoku je podmíněn překročením kritické výšky (popsáno v kapitole 3). V programu jsou typy odtoku rozlišeny celočíselným identifikátorem označeným State, kde pokud State

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

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

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

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

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

### **toto je origoš z DP**

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

### **z diplomky**

Výstupy se ukládají do adresáře nazvaného output. Cestu k němu si volí uživatel v rámci vstupních dat (viz kap. 2.3.1). Model prochází stále vývojem a dotýká se to i výstupních souborů. Princip ale zůstává stejný a jedná se spíše o úpravy zdrojového kódu zajišťující lepší přehlednost a práci s kódem pro budoucí úpravy. Např. práce s vícerozměrnými maticemi a převedení všech výpočtů do základních (SI) jednotek. Výsledkem modelu jsou soubory (.shp, .rst, .txt, .dbf), které reprezentují parametry (Zajíček J., 2014): hladina Výstupem jsou hodnoty maximální výšky hladiny pro každou buňku. Jedná se tedy o rastrovou vrstvu vytvořenou porovnáváním hodnot výšek hladiny v každém časovém kroku. Uložena je nejvyšší hodnota. Výška hladiny v jednotlivých krocích je získána pomocí bilance přítoků a odtoků do buňky. průtok Výstupem jsou hodnoty maximálního průtoku pro každou buňku. Obdobně jako u hladiny jsou porovnávány hodnoty v jednotlivých krocích a uložena maximální hodnota. Hodnoty průtoku v jednotlivých časových krocích jsou vypočteny pomocí metody kinematické vlny (teorie viz kap. 1.5.2). infiltrace Výstupem infiltrace jsou hodnoty v každé buňce, které jsou během doby běhu modelu postupně načítány až do vyčerpání infiltracní kapacity. zbytkový objem Zbytkovým objemem se rozumí objem, který v dané buňce v časovém kroku zůstal. V případě odtoku veškeré vody z rastru je rastr nulový. Matematicky je objem vyjádřen jako rozdíl celkového objemu v buňce (zbytkový objem z předchozího kroku a přítoky) a povrchového a soustředěného odtoku. odtok Výstup týkající se odtoku slouží pro konečnou bilanci (kontrolu) a testování. Jedná se o celkové množství, které z buňky odteklo za celou dobu běhu modelu. rychlosť Rastr rychlosťí je výstupem sloužící k určení erozní ohroženosti. Porovnávány jsou hodnoty skutečných rychlosťí s limitními nevymílacími rychlosťmi (viz tab. č. 3 ). napětí.

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

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

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

# Část III

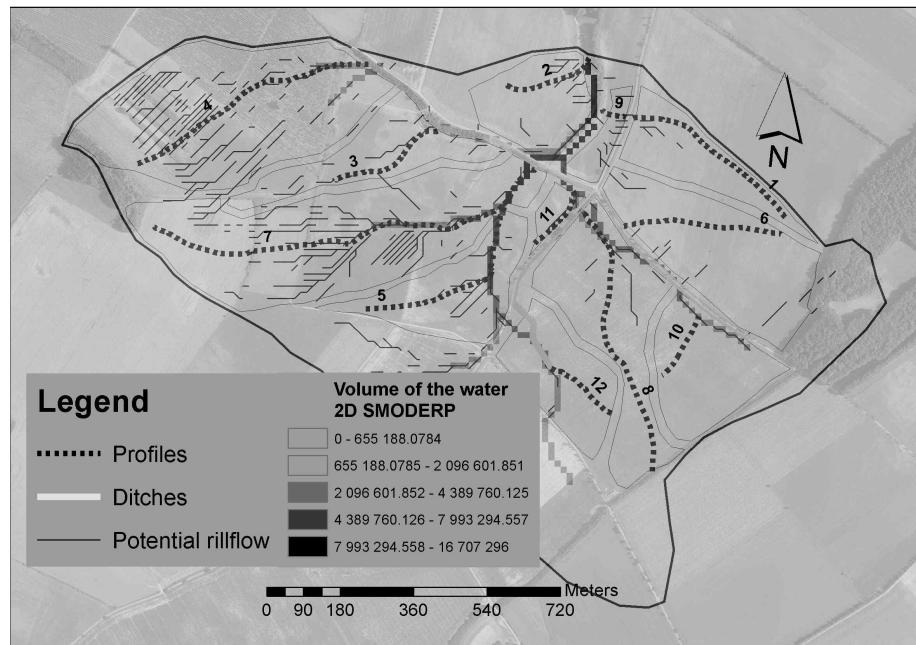
## Ukázka výsledků

---

Úvodní část je věnována historickému pozadí a vývoji modelu SMODERP. Odvození parametrů o kterých se hovoří v kapitole ?? jsou podrobně popsány v kapitole ???. Použité fyzikální vztahy jsou popsány v kapitole ???. Současná verze modelu z hlediska zpracování vstupních dat, výpočtu a uváděných výstupů je pak v kapitole ??.

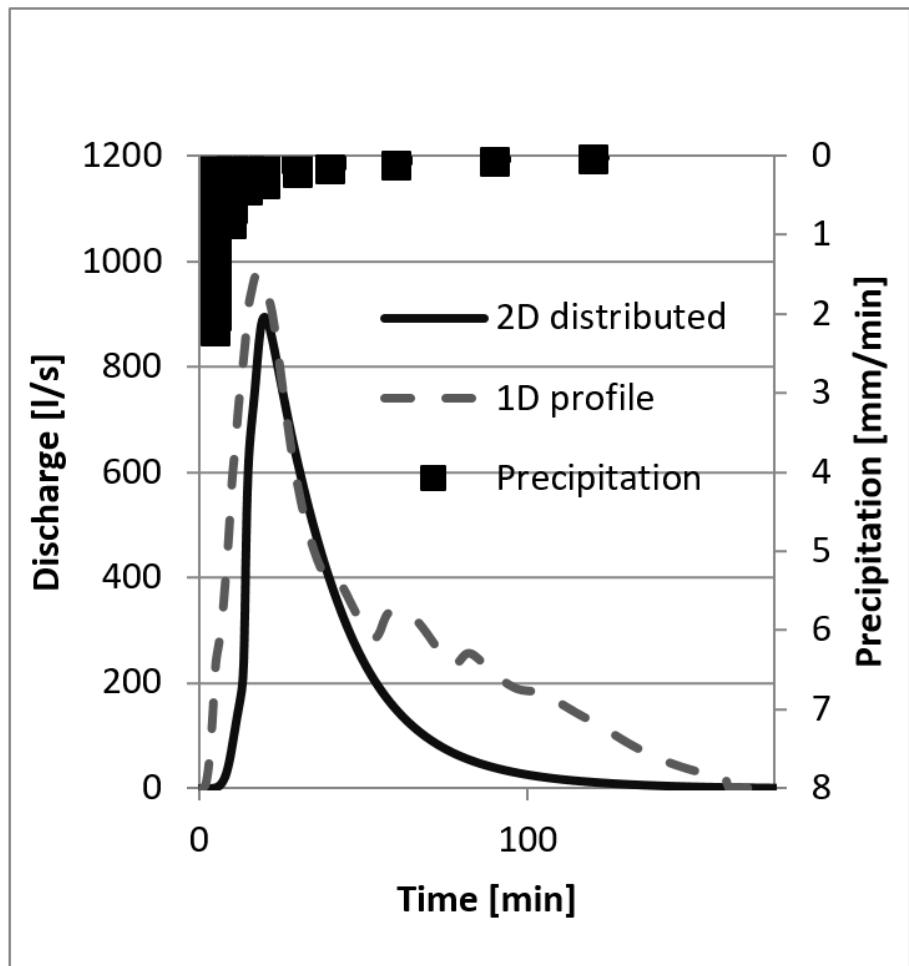
### 1 Porovnání metod 1D a 2D

1D and 2D approaches which are subject to comparison were designated by a hydrograph and runoff volume in the breach profile. The respective comparison was carried out on two locations in the Czech Republic (Hořanský stream and Býkovický catchment). A system of erosion control measures was implemented in this area. The size of the given area being subject to this research is  $1.5 \text{ km}^2$ . For 1D model are the individual agricultural plots were distinguished by 12 different profiles.



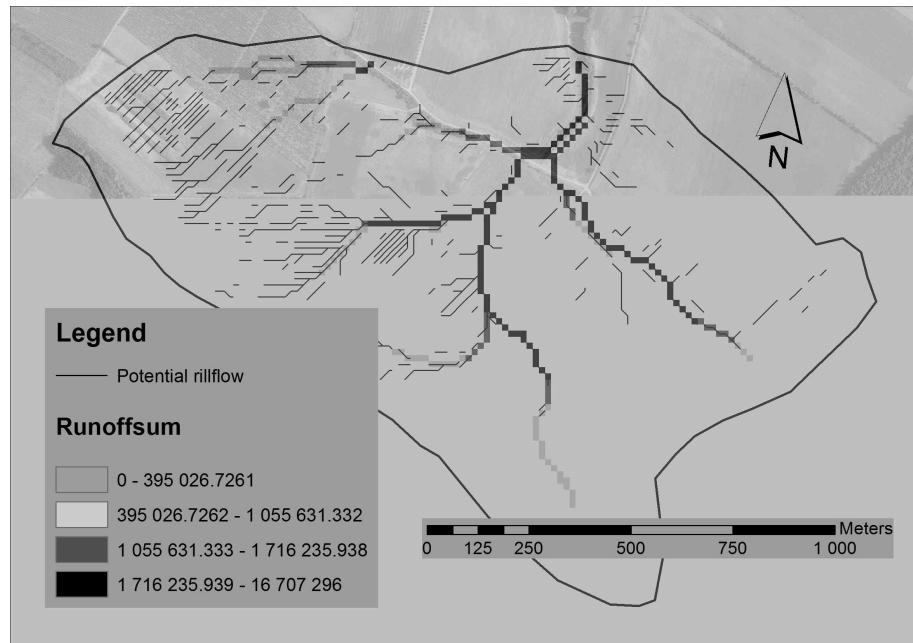
Obrázek 11: Profiles and runoff concentration - Horany

ghg

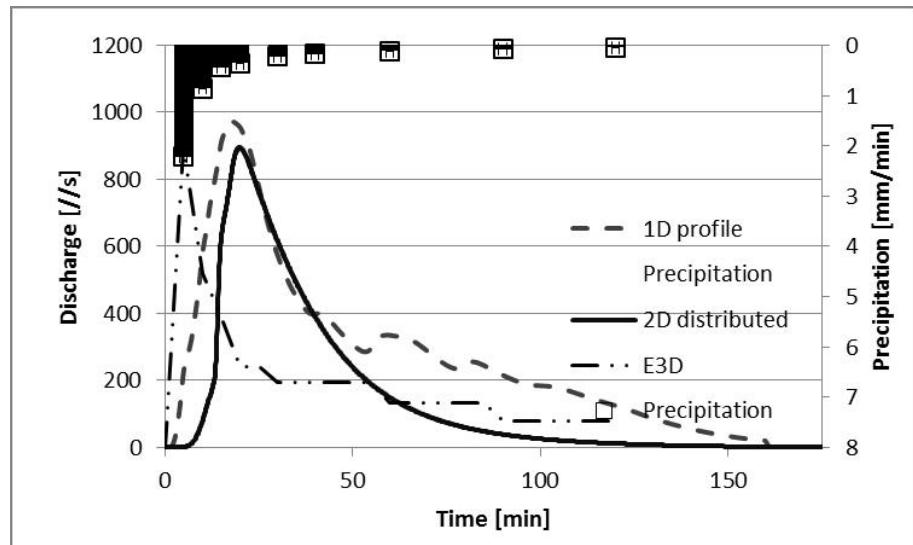


**Graf 12:** Hydrographs 1D and 2D Smoerdp - Horany study area

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 13: Profiles and runoff concentration - Bykovicky catchment



Graf 14: 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.

# **Seznam použitých zdrojů**

---