

---

# SMODERP2D - UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA

---

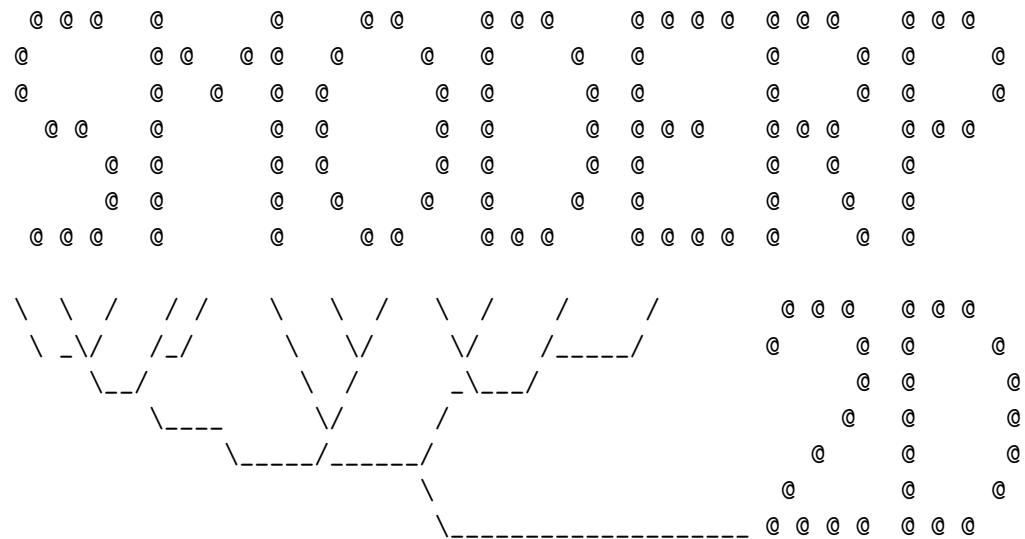
SIMULAČNÍ MODEL POVRCHOVÉHO ODTOKU A EROZNÍHO PROCESU

EDITED BY

KAVKA

...

*ČVUT*



2017

PUBLISHER

# **Obsah**

<b>Obsah</b>	ii
<b>1 Seznam zkratek</b>	iii
<b>Seznam obrázků</b>	v
<b>Seznam tabulek</b>	v
<b>I Úvod</b>	1
Hydrologické modelování . . . . .	1
Historie modelu - SMODERP1D . . . . .	4
<b>II Popis řešení</b>	6
<b>2 Bilanční rovnice</b>	6
2.1 Efektivní srážka $es$ . . . . .	7
2.2 Intenzita infiltrace $inf$ . . . . .	8
<b>3 Povrchový odtok <math>o^{in}</math>, <math>o^{out}</math></b>	9
3.1 Plošný povrchový odtok . . . . .	9
3.1.1 Odvozené veličiny . . . . .	10
3.1.2 Určení vzniku rýhy . . . . .	10
3.2 Soustředěný odtok v rýhách . . . . .	11
3.3 Celková bilance . . . . .	13
<b>4 Odtok hydrografickou sítí</b>	14
4.1 Propojení úseků hydrografické sítě . . . . .	14
<b>III Použití modelu</b>	16
<b>5 Instalace SMODERP2D a spuštění v ArcGIS</b>	16
5.1 Použití modelu v ArcGIS . . . . .	16

<b>6 Vstupy do modelu</b>	<b>18</b>
6.1 Digitální model terénu . . . . .	20
6.2 Půdní data . . . . .	20
6.3 Data využití území . . . . .	21
6.4 Tabulka parametrů půdy a využití území . . . . .	22
6.5 Srážková data . . . . .	24
6.6 Časový krok modelu a celková doba výpočtu . . . . .	24
6.7 Body pro generování hydrogramů . . . . .	24
6.8 Výstupní adresář . . . . .	25
6.9 Hydrografická síť . . . . .	25
<b>7 Popis programu</b>	<b>26</b>
7.1 Programovací jazyk Python . . . . .	26
7.2 CFL podmínka - řešení nestability výpočtu . . . . .	27
<b>8 Výstupy z modelu</b>	<b>30</b>
8.1 Rastrové výstupy . . . . .	30
8.2 Vektorové výstupy . . . . .	30
8.3 Hydrogramy . . . . .	30
<b>A Příloha: doplňující tabulky a grafy</b>	<b>33</b>
<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>37</b>

# 1 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-Lowy 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]	$I_{POT}$	potenciální intercepce [m]
$\frac{dS}{dt}$	změna zásoby [ $m^3/s$ ]	$q_{rill}$	průtok v rýhách [ $m^3/s$ ]
$ES$	efektivní srážka [ $m^3/s$ ]	$q_{sur}$	specifický plošný průtok [ $m^2/s$ ]
$es$	intenzita efektivní srážky [m/s]	$q_{stream}$	průtok v otevřeném korytě [ $m^3/s$ ]
$l_{eff}$	efektivní vrstevnice [m]	$R_{rill}$	hydraulický poloměr v rýze [m]
$h_{crit}$	kritická 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 přítok [ $m^3/s$ ]	$\tau_{sur}$	tečné napětí [Pa]
$I$	sklon [−]	$\tau_{crit}$	kritické tečné napětí [Pa]
$K$	součinitel šířky (pro plošný povrchový odtok je K = 1)	$V_{out}$	Odtekly objem [ $m^3$ ]
$K_s$	nasyacená hydraulická vodivost [m/s]	$V_{crit}$	objem vody do kritické hladiny [ $m^3$ ]
$I_{LAI}$	poměrná plocha listová [−]	$v_{rill}$	rychllosť proudění - rýhový odtok [m/s]
$l_{rill}$	délka rýhy [m]	$V_{rill}$	objem vody v rýze v daném elementu [ $m^3$ ]
$m$	poměr sklonu svahů (pro obdélník je roven nule)	$v_{sur}$	rychllosť proudění - plošný odtok [m/s]
$n$	Manningův součinitel drsnosti [ $s/m^{1/3}$ ]		

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

## Seznam obrázků

1	Klasifikace integrace hydrologických modelu podle Sui & Maggio (1999) . . . . .	2
2	Úvodní obrazovka modelu SMODERP1D . . . . .	5
3	Příčný řez rýhou, která je v modelu SMODERP2D reprezentována obdélníkem. Při plnění (zvětšování) rýhy roste výška hladiny vody v rýze s výškou rýhy v poměru $rill_{ratio}$ k šířce rýhy (obrázek 3a). Při prázdnění rýhy se tvar rýhy nemění, dochází pouze ke změně výšky vodní hladiny v rýze (nalevo) (obrázek 3b). . . . .	13
4	Hydrografická síť s označením FID (id linie) a toFID (id následující linie při odtoku). Podkladová vrstva je digitální model terénu. $toFID = -9999$ označuje odtok přes okraj výpočetní oblasti. . . . .	15
5	Nalinkovaný smoderpěd ArcGIS toolbox do prostředí ArcMAP pomocí Arc Catalogu . . . . .	17
6	ArcGIS <b>toolbox</b> a vysvětlenými parametry . . . . .	18
7	Princip propojení vektorových vrstev s tabulkou obsahující parametry typu půd a využití území. Na obrázku a) je digitální model terénu a podkladová mapa. Na obrázku b) je rozložení typu půdy a na obrázku c) rozložení typu využití území. Tyto 2 vrstvy jsou protnuty (funkcí <i>intersect</i> ). Nové polygony převezmou označení z původních vrstev na obrázku b) a c). Tato nová vektorová vrstva je ukázána na obrázku d). Pomocí převzatých označení polygonů jsou k nim přiřazeny parametry typu půd a využití území z tabulky e). . . . .	23
8	Ukázka srážkových dat. Vlevo: grafická reprezentace zadaných dat (srážka zobrazena v intenzitách; Napravo: ukázka dat v požadovaném formátu). . . . .	24
9	Časový krok je řízen rychlostí plošného odtoku. $CFL$ rychle stoupne k 1 a začne zkracovat časový krok (horní graf). O 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 maximálně 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. . . . .	29

10	Časový krok je řízen rychlostí rýhového odtoku. $CFL$ plošného odtoku ne-překročí během výpočtu hodnotu cca 0.35 (na horním grafu), proto nemá žádný 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 <i>ratio</i> na 9, což je maximální povolené dělení lokálního časového kroku při výpočtu rýhového odtoku. Pří 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 <i>ratio</i> vrátí na původní hodnoty. . . . .	29
11	Důležité soubory a adresáře modelu SMODERP2D . . . . .	33
12	Flow chart toku programu . . . . .	36

## Seznam tabulek

1	Tabulka s přehledem vstupních dat modelu . . . . .	19
2	Přehled parametrů charakterizujících půdní typ a typ vegetačního pokryvu .	22
3	Příklad tabulky s parametry jednotlivých úseků hydrografické sítě . . . . .	25
4	Kritéria změny časového kroku vycházející z plošného odtoku . . . . .	27
5	Kritéria změny faktoru <i>ratio</i> při dělení časového kroku při výpočtu rýhového odtoku . . . . .	28
6	Přehled rastrových výstupů . . . . .	31
7	Popis veličin tabulky úseků hydrografické sítě . . . . .	32
8	Popis veličin hydrogramů mimo úsek hydrografické sítě . . . . .	32
9	Popis veličin hydrogramů v úsecích hydrografické sítě . . . . .	32
10	Tvary příčných průřezů úseků hydrografické sítě a použité vztahy na výpočet hydraulického poloměru . . . . .	34
11	Parametry typů půd a kritické hodnoty třecího napětí a nevymílací rychlosti. Kompilát z několika zdrojů, především Dýrová E. (1984), Neumann & Kavka (2015). . . . .	35

# Část I

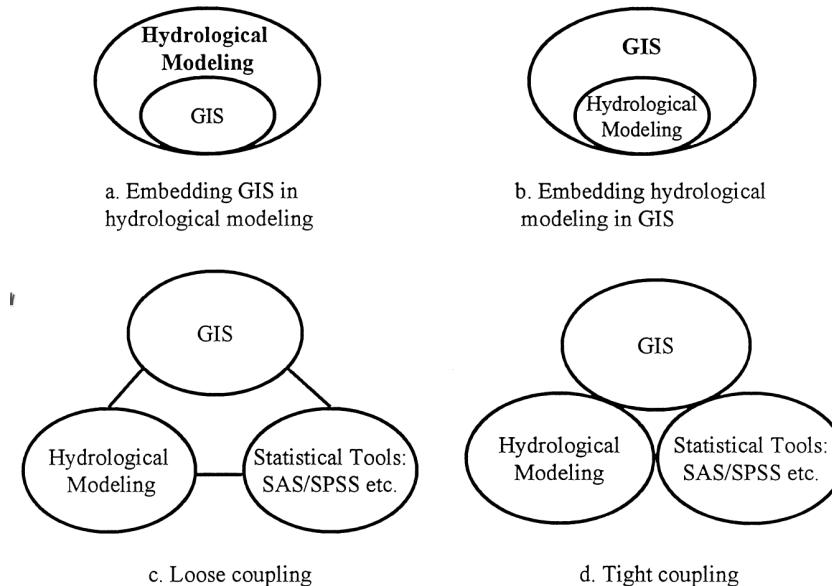
## Úvod

---

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

### Hydrologické modelování

Hydrologické modelování s využitím geografických informačních systémů (GIS) je oblast vyvíjející se od konce 70. let. Hydrologické modelu využívaly (a využívají) technologie operací s geodatami a databázemi, které GIS umožňuje. Přesto jsou některé topologické operace pro hydrologické modely specifické (např. definice rozvodnice povodí, lokalizace/odstranění bezodtokových míst) (DeVantier & Feldman 1993). V zásadě se rozvíjeli modelu povrchového odtoku založené na pravidelném rastru, nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) nebo



**Obrázek 1:** Klasifikace integrace hydrologických modelu podle Sui & Maggio (1999)

na vrstevních (contour-based) (DeVantier & Feldman 1993). Rovněž docházelo k vývoji celistvých<sup>1</sup> nebo plně distribuovaných modelů (DeVantier & Feldman 1993). S vývojem informační techniky docházelo k větší integraci GIS softwaru a hydrologických modelů. Na obrázku 1 je ukázána klasifikace propojení GIS a hydrologických modelu na konci 90. let (Sui & Maggio 1999). Hydrologický model buďto pouze využívá některé funkcionality GIS softwaru (obrázek 1a). V opačném případě již vývojář GIS softwaru integruje do systému některé prvky hydrologických modelů (obrázek 1b). GIS software a hydrologické model si pouze vyměňují některá data (pomocí binárních nebo ascii souborů (obrázek 1c), nebo GIS software umožňuje ve svém prostření vložit uživatelem vytvořené skripty, která pak tvoří hydrologický model (obrázek 1b)<sup>2</sup> (Sui & Maggio 1999). Autoři studie se k této postupu staví kriticky. Jejich základní výhradou je, že struktury GIS software vytvářejí bariery pro popis hydrologických dějů, které mají jistá specifika. Konceptualizace pomocí vrstev ať už rastrových nebo vektorových nemusí vyjadřovat heterogenitu hydrologických dějů nebo užití stochastických modelů. GIS softwary často umožňují pouze limitovanou prací časově proměnlivými ději (Sui & Maggio 1999).

Při popisu povrchového odtoku se nejčastěji využívá jedno ze zjednodušení Saint-Venantových (SV) rovnic ať už kinematickou nebo difuzní. Příklad řešení povrchového odtoku pomocí kinematickou například: Taylor et al. (1974) nebo Goodrich et al. (1991). V případě druhé studie bylo 2D řešení kinematické vlny řešeno pro jednotlivé trojúhelníky TIN sítě. Celkový odtok byl pak výpočtem 1D routingem odtoku z jednotlivých trojúhelníků TIN sítě. Kinematická vlna pro řešení povrchového odtoku je implementována například v modelu HEC-1 (MacArthur & DeVries 1993). Jako příklad řešení povrchového

<sup>1</sup>povodí je rozděleno na sub-povodí která jsou řešena celistvě například metodou SCS křivek

<sup>2</sup>Toto je případ modelu SMODERP2D pokud je spouštěn v prostředí ArcGIS

odtoku pomocí difuzní vlny může být například Julien et al. (1995), kde byla rovněž implementována prostorově distribuovaná srážka vhodná pro řešení bleskových povodí v aridních oblastech. V Jain et al. (2004) bylo směrování odtoku definované pomocí jednosměrného algoritmu D8, samotný byla ale řešen pomocí difuzní vlny. Jako příklady softwaru, kde byla využita difuzní vlna k řešení povrchového odtoku je například: SHE Abbott et al. (1986a,b), CAS2D Julien et al. (1995), WEPP (Flanagan et al. 2010) nebo SWAT (USDA 2019).

V literatuře lze rovněž najít kritéria na základě kterých lze určit vhodnost obou řešení. Využitelnost kinematické nebo difuzní vlny záleží na podmínkách daného řešeného území, počáteční podmínce nebo charakteristice srážky. Příkladem toho může být bezrozměrné číslo  $\gamma$ , které určí přesnost kinematické a difuzní vlny v porovnání s dynamickou vlnou (přednější approximace SV rovnic) v závislosti na počáteční podmínce, sklonu a drsnosti povrchu Singh (1994). Dalším příkladem může být kinematické číslo  $K$ , použité například v pro určení vhodnosti kinematické approximace v úloze s proměnlivou srážkou (Moramarco & Singh 2002). V některých případech jsou obě, kinematická i difuzní vlna, vhodnou approximací pro řešení povrchového odtoku i na území povodí (Kazezyilmaz-Alhan & Medina 2007).

Obecné problémy v hydrologických modelech mohou nastat s nastavením časové a prostorové diskretizace. U řešení povrchového odtoku byly zjištěny problémy s časovou diskretizací, kde docházelo k nestabilitám i při dodržení Courant–Friedrichs–Lewiho kritéria. To je způsobeno zejména malou hloubkou hladiny na povrchu vůči velikosti buňky rastru, drsnostnímu koeficientu nebo změně sklonu mezi sousedícími buňkamiA Zhang & Cundy (1989), Esteves et al. (2000). V Molnar & Julien (2000) byl studován vliv velikosti buňky rastru na výsledek modlu povrchového odtoku. Různá velikost buněk v rastru příliš neovlivňovala výsledné řešení pokud byla kalibrace provedena na rastru se stejně velkou buňkou. U řešení s větší buňkou bylo na povodí větší oblast, kde vznikl povrchový odtok a po kalibraci byla větší drsnost koryt hydrografické sítě.

## Historie modelu

Model je vyvíjen od konce osmdesátých let na KHMKI FSv ČVUT a od té doby byl několikrát modifikován. Jednotlivé verze jsou označeny, tak jak jsou označovány pro uživatele.

**Verze 04.89 - MS DOS – Programovací jazyk Fortran** První verze modelu byla vyvinuta na ČVUT v roce 1989 pod vedením M. Holého. Byla napsána v programovacím jazyku FORTRAN. Zahrnovala v sobě procesy ovlivňující povrchový odtok a erozi. Submodel pro výpočet přípustné délky byl od submodelu pro výpočet odtokových charakteristik zcela oddělen a jednalo se spíše o dva nezávislé modely. Časový krok modelu byl zvolen v délce 0.2 minuty.

Před zadáním vstupních parametrů uživatel volil mezi submodelem 1 nebo submodelem 2. Zadávání probíhalo ve čtyřech krocích. V prvním kroku uživatel definoval morfologii svahu, kdy svah je definován dvojicí hodnot, první je vodorovná vzdálenost vrstevnic ode-

čtená z mapy a druhou hodnotou je odlehlosť (výšková vzdáenosť) vrstevnic. Nevýhodou této verze modelu bylo, že odlehlosť vrstevnic byla dáná fixně a nebylo možné vkládat jakékoli jiné úseky než ty, které leží přesně mezi dvěma vrstevnicemi. To odpovídalo tehdejšímu způsobu získávání dat ručním odečítáním z tištěné mapy 1 : 10 000 nebo 1 : 5 000.

Ve druhém kroku uživatel na takto definovaných vzdálenostech vrstevnic volil půdní druh. Protože tehdejší možnosti výpočetní techniky byly limitované hardwarovými prostředky, byl počet takto zadaných úseků omezen na deset. V případě delších svahů, kde bylo více než deset vrstevnic, byl uživatel nucen některé části svahu spojovat do delších úseků. Tímto vyhlazením profilu docházelo k úpravě morfologie.

Ve třetím kroku byl uživatelem volen typ vegetace pro jednotlivé úseky. Úsek lze definovat jako homogenní celek, který má konstantní sklon, půdní druh a typ vegetace.

V posledním kroku uživatel zadával srážkové údaje, a to buď jako reálné srážky přímo změřené v terénu nebo návrhové srážky časově proměnné intenzity.

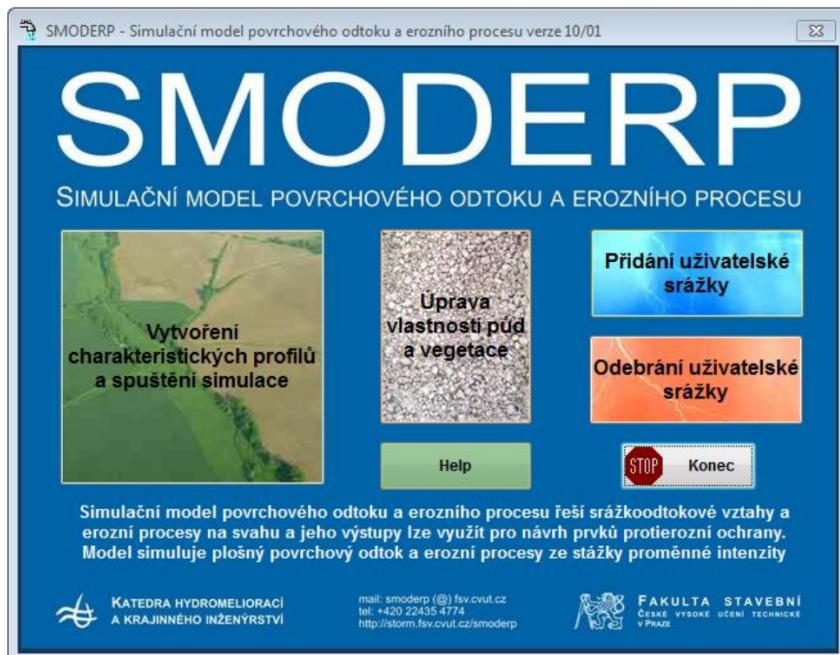
Doba vzniku modelu je již počítáčovou historií, a tak i ovládání programu bylo poměrně náročné. Například vstupní parametry se musely při každém spuštění programu znova zadávat, také neexistovala možnost vypočtené výsledky jakýmkoliv způsobem exportovat nebo ukládat. Používání modelu bylo tedy velmi komplikované. Proto byla vytvořena jeho aktualizovaná verze.

**Verze IV. I/11 – 96 - MS DOS – Programovací jazyk Fortran** V devadesátých letech byla vytvořena druhá verze modelu. V ní se podařilo odstranit několik základních nedostatků z předchozí verze. Již bylo možné zpětně editovat dříve vypočtené pozemky. Také bylo možné ukládat a tisknout získané výpočty. Úpravy se však týkaly jen prostředí a vedly k usnadnění práce uživatele. Při této aktualizaci nedošlo k žádné úpravě vnitřních výpočetních vztahů.

## SMODERP1D

SMODERP1D je starší verze modelu SMODERP2D. Model byl určen ke stanovení charakteristik plošného odtoku v 1D profilech řešeného svahu a stanovené nejdelší bezpečné odtokové dráhy (Obrázek 2).

**Programovací jazyk Visual Basic (konečná verze 5.01)** S příchodem nového prostředí Windows již nebylo možné předchozí DOS verzi spustit, proto byla od roku 1999 vyvíjena další generace modelu. Hlavní změnou byl posun od prostředí MS-DOS k uživatelsky přístupnějšímu prostředí Windows. Uživatelsky byl tento směr krokem vpřed. Způsob zadávání vycházel z jedné vstupní obrazovky, kde uživatel zvolil zadávání svahů, srážek, případně vegetace. Dalším kladem byla možnost zadat a vypočítat několik svahů najednou. Všechny tyto úpravy vedly ke zjednodušení a zrychlení práce. Postupně vzniklo celkem šest verzí modelu, které se částečně lišily vzhledem a dostupností obou submodelů.



Obrázek 2: Úvodní obrazovka modelu SMODERP1D

Úpravy se týkaly především uživatelského rozhraní, výpočtové části se změny týkaly jen minimálně. Některé z nedostatků byly postupně odstraňovány, šlo většinou o úpravu drobných chyb a případně o zjednodušení práce pro uživatele. Výsledkem spojení verze pro MS-DOS, programově vycházející z jazyka FORTRAN, a Visual Basicu byla občasná nestabilita programu, která se projevuje zhroucením výpočtu (například při větším počtu úseků, při krátkých úsecích apod.).

V roce 1999 vznikla první verze s označením 1.01, v níž byla funkční pouze simulace erozní ohroženosti a stanovení přípustných délek. Tato verze byla aktualizována v roce 2001 pod označením verze 2.20 a byla dlouhou dobu ke stažení z webových stránek FSv ČVUT v Praze (FSv – KHMKI, 2010). Především šlo o vylepšení uživatelského rozhraní. V roce 2001 byla také vytvořena zkušební verze 3.55, ve které byl zahrnut kromě simulace erozní ohroženosti i výpočet odtokových charakteristik. Tato verze byla v roce 2003 aktualizována zcela funkční verzí 4.01. Poslední verzí, která přímo vychází a navazuje na předchozí verze, má označení 5.1 a vznikla v roce 2010. V této verzi je aktualizován vztah pro výpočet průtoku a do této verze je možné doplnit rekalibrované odtokové parametry.

**Programovací jazyk Visual Fox Pro (Verze 10.01)** Od roku 2006 byla vytvářena nová verze modelu SMODERP, která zahrnuje nové poznatky v nově napsaném zdrojovém kódu. V této verzi jsou zahrnutы nově stanovené rekalibrované odtokové parametry, stanovené na základě řady dalších měření na sklopém hydraulickém žlabu ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Tato verze navazuje na předchozí verze použitím základních vztahů.

# Část II

## Popis řešení

---

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

Jak již bylo zmíněno v úvodu, model SMODERP2D je 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 odteklé množství v daném časovém úseku v buňce. Formálně se jedná o řešení metodou konečných diferencí s explicitně řešenou časovou diskretizací. V bilanční rovnici jsou řešeny tři základní složky:

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

Odteklé množství může být dále složeno ze tří základních typů odtoku: **plošného** povrchového odtoku, **soustředěného rýhového** povrchového odtoku a odtoku dočasné **hydrografickou sítí** (tok otevřeným korytem). V ploše povodí jsou směry odtoků odvozeny na základě odtokových algoritmů. V místě úseků hydrografické sítě je veškerý tok směrován touto sítí.

---

## 2 Bilanční rovnice

Základním řešeným vztahem je aktuální bilance celkové 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 přítok [ $m^3/s$ ],  
 $O_{tot}$  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 v buňce  $i$  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 na pravé straně rovnice (3).

## 2.1 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, která je definována pomocí

potenciální intercepce  $I_{POT}$  jako výška zachycené vody. 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

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

Potenciální intercepce  $I_{POT}$  se začne plnit na začátku srážkové epizody. Po naplnění  $I_{POT}$  dopadá celá srážka na povrch půdy. Výsledná intenzita efektivní srážky v čase  $t$  je pak určena jako

$$es_t = \begin{cases} PS_t(1 - I_{LAI})\Delta t, & \text{pokud } \sum_{t=t_{init}}^t (PS_{\bar{t}} I_{LAI}) <= I_{POT} \\ PS_t\Delta t, & \text{jinak} \end{cases}$$

kde  $PS$  je potenciální srážka [ $m$ ],  
 $I_{LAI}$  je poměrná plocha listová [–],  
 $I_{POT}$  je potenciální intercepce [ $m$ ] a  
 $\sum_{t=t_{init}}^t (PS_{\bar{t}} I_{LAI})$  vyjadřuje množství srážky, které propadlo povrchem listů plodiny od počátečního času  $t_{init}$  do času  $t$ .

## 2.2 Intenzita infiltrace $inf$

V modelu je použita infiltrace podle Philipa (Philip 1957) v následujícím tvaru:

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

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

Philipova infiltraci 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 rozptylu ostatních vstupních parametrů, 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.

### 3 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 3.2).

#### 3.1 Plošný povrchový odtok

Rovnice plošného odtoku vychází ze zjednodušení Saint-Venantových (SV) rovnic použitím teorie kinematické vlny. Použití toho přístupu předpokládá mělké povrchové proudění po dlouhém plochém<sup>3</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 uvažovat povrchový tok jako ustálené proudění (Miller 1984). Plošný povrchový odtok pak lze řešit pomocí obecného mocninného vztahu

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

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 řešen 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 11 v příloze A. Z výhodnocení 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 povrch půdy pokryt vegetací, je třeba provést korekci pomocí Manningova součinitele drsnosti pro povrchový odtok, který reprezentuje tření mezi tokem a vegetací. Parametr  $a$  je pak definován jako

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

kde  $n$  je Manningův součinitel drsnosti [ $s/m^{1/3}$ ].

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 [ $m^2$ ].

---

<sup>3</sup>Plochém ve smyslu ne příliš zakřiveném. Nejedná se tedy o hladký povrch.

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

### 3.1.1 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 Odteklý objem [ $m^3$ ].

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

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

kde  $v_{sur}$  je rychlosť proudění - plošný odtok [ $m/s$ ]. 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  $K = 1$ ).

### 3.1.2 Určení vzniku rýhy

Povrchový odtok způsobuje tření na povrchu 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 nevymílací rychlosti. Z obou odvození je určena kritická výška hladiny povrchového odtoku  $h_{crit}$  po jejímž překročení začne vznikat rýha.

Při vzniku rýh dochází k velkému odnosu půdy, proto by umístění prvků protierozní ochrany mělo být navrhnu to tak, aby k vniku rýh docházelo co nejméně. Kritické hodnoty nevymílacích rychlostí a tečných napětí jsou pro jednotlivé půdní druhy převzaty z předchozích verzí modelu (Dýrová E. 1984, Neumann & Kavka 2015). Hodnoty z obou zdrojů jsou ukázány v tabulce 11 v příloze A. V literatuře se setkáme i s odlišnými hodnotami. Například M. A. Velikanov stanovil kritickou nevymílací rychlosť pro půdy 0.24  $m/s$  (Cabík 1963), což je hodnota nižší, než kterou stanovila E. Dýrová. Při větších aplikacích modelu se doporučuje provést rekalibraci parametrů pro dané specifické území.

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

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

kde  $h_{crit}$  je kritická 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

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

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

$$h_{crit} = MIN(h_{crit,v}, h_{crit,\tau}),$$

která je pak při výpočtu použita jako kritérium vzniku rýh. Kritická výška odvozená podle vztahu (9) nebude v potaz parametry rovnice kinematické vlny a především pro malé hodnoty Manningova koeficientu  $n$  (při řídkém nebo žádném vegetačním pokryvu) může být kritická hodnota  $h_{crit}$  menší při použití rovnice (8). Výběr menší hodnoty  $h_{crit}$  by měl zamezit podhodnocení rizika vzniku rýhové eroze.

Kritická nevymílací rychlosť a kritické tečné napětí jsou vstupní parametry modelu. Návrh hodnot pro model SMODERP2D je ukázán v tabulce 11 v příloze A.

### 3.2 Soustředěný odtok v rýhách

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

- Zavedením stejných zjednodušujících předpokladů výpočtu proudění jako v případě výpočtu plošného povrchového odtoku (teorie kinematické vlny), lze řešit tok rýhou jako 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 Manningovy rovnice:

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

kde  $q_{rill}$  je průtok v rýhách [ $m^3/s$ ],  
 $v_{rill}$  je rychlosť proudění - rýhový odtok [m/s],  
 $A$  je průtočná plocha [ $m^2$ ],  
 $n$  je Manningův součinatel drsnosti [ $s/m^{1/3}$ ] a  
 $R_{rill}$  je hydraulický poloměr v rýze [m].

2. V každé buňce výpočetní oblasti může vzniknout pouze jedna přímá rýha bez ohledu na velikost buňky.
3. Soustředěný odtok vzniká v buňkách, kde dojde k překročení kritické výšky hladiny  $h_{crit}$  (viz 3.1.2). Tato hodnota je určena pro každou buňku zvlášť na základě hodnot kritického tečného napětí nebo kritické nevymílaci rychlostí podle vzorců (8) a (9).
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 kritická výška hladiny [m].

5. Tvar příčného profilu rýhy je reprezentován obdélníkem s pevným poměrem stran  $rill_{ratio}$ =výška/šířka rýhy. Velikost rýhy se zvětšuje pokud je nadkritické množství  $V_{rill}$  větší než objem samotné rýhy, tak aby byl splněn předpoklad v předchozím bodě. Při zvětšované rýhy se tedy výška rýhy rovná výšce vodní hladiny v rýze (obrázek 3a). Pokud začne být nadkritické množství  $V_{rill}$  menší než je objem rýhy a dochází k prázdnění rýhy, zůstává velikost rýhy konstantní a v rýze dochází pouze k poklesu hladiny (obrázek 3b). Tento mechanizmus ovlivňuje odtok pomocí hydraulického poloměru, který je u obdélníkového příčného profilu odvozen jako

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

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

Při plnění nebo prázdnění se v tomto vztahu liší výpočet základny tohoto obdélníku. Pokud se rýha zvětšuje nebo je konstantní, určuje se šířka základny jako (obrázek 3a)

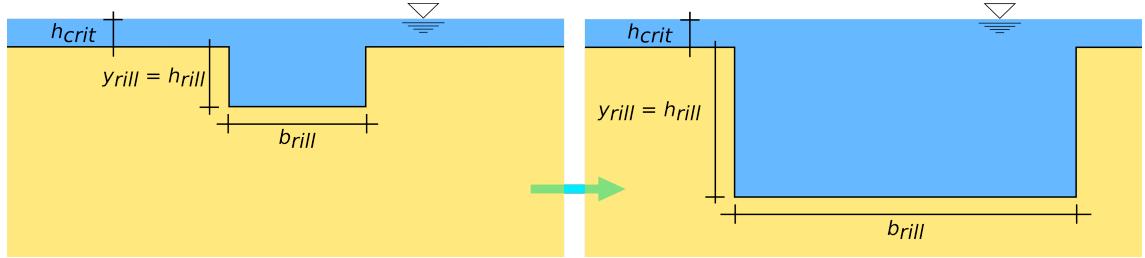
$$b_{rill} = \frac{h_{crit}}{rill_{ratio}} = \frac{y_{rill}}{rill_{ratio}},$$

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

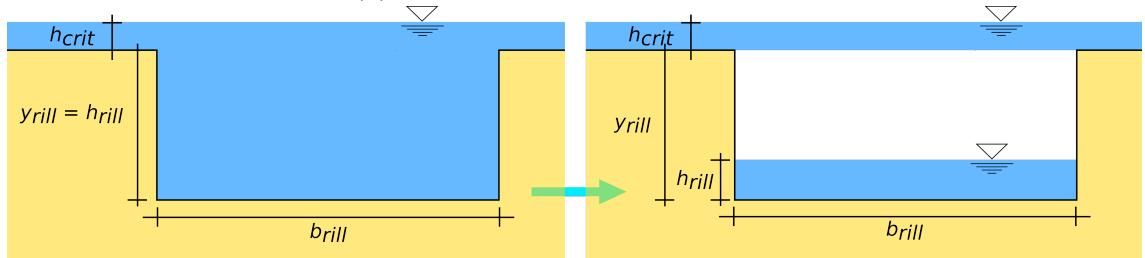
Pokud se rýha prázdní je šířka rýhy odvozena jako (obrázek 3b)

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

Jak je vidět na obrázku 3b, k plošnému povrchovému odtoku s výškou hladiny  $h_{crit}$  dochází i na části buňky, kde se vytvořila rýha. Chyba vzniklá tímto předpokladem je považována za zanedbatelnou, protože plocha, kterou pokrývají rýhy, je zpravidla malá proti celému povodí.



(a) Příčný průřez rýhou, která se plní



(b) Příčný průřez rýhou, která se prázdní

**Obrázek 3:** Příčný řez rýhou, která je v modelu SMODERP2D reprezentována obdélníkem. Při plnění (zvětšování) rýhy roste výška hladiny vody v rýze s výškou rýhy v poměru  $rill_{ratio}$  k šířce rýhy (obrázek 3a). Při prázdnění rýhy se tvar rýhy nemění, dochází pouze ke změně výšky vodní hladiny v rýze (nalevo) (obrázek 3b).

Výška odtoku (resp. vtoku) z rýhy je vypočtena podle vzorce

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

kde  $l_{rill}$  je délka rýhy [m].

### 3.3 Celková bilance

Pokud dojde k vzniku rýh, je rovnice celkové bilance (3) rozšířena o členy vyjadřující soustředěný rýhový odtok a přítok z rýh sousedních buněk takto

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

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  $i$ .

Množství  $n$  může být prázdná množina pokud není překročena kritická výška hladiny.

## 4 Odtok hydrografickou sítí

Hlavní použití modelu SMODERP2D spočívá především v navrhování půdo ochranných opatření v ploše povodí. Cílem je simulovat a navrhovat odtoky i v dočasné hydrografické síti, která je tvořena přirozeným nebo častěji umělým přerušením přirozené odtokové dráhy. Nejčastěji se jedná o příkopy či průlehy, které mají odváděcí a protierozní funkci. Všechny prvky (síť vodních toků, příkopy, průlehy, atp.) jsou zadávány v rámci jedné liniové vektorové vrstvy, kde jsou úseky hydrografické sítě reprezentovány jednotlivými liniemi.

Na rozdíl od výpočtu povrchového odtoku, který je prováděn v rastru buněk, se výpočet řeší v hydrografické síti po jednotlivých úsecích po skončení výpočtu povrchového odtoku. Jeden úsek hydrografické sítě zpravidla leží na několika buňkách rastru. Při výpočtu povrchového odtoku se do tohoto úseku započítá přítok ze všech buněk, které vtékají do buněk pod daným úsekem. Poté co výpočet povrchového odtoku skončí, provede se ve stejném časovém kroku výpočet odtoků a vtoků mezi jednotlivými úseky a spočítá se nová výška hladiny ve všech úsecích najednou. Princip propojení jednotlivých úseků je popsán v kapitole 4.1

Proudění v úsecích je řešeno Manningovou rovnicí ve tvaru:

$$q_{stream} = A \frac{1}{n} R_{stream}^{2/3} I^{1/2}, \quad (12)$$

kde  $q_{stream}$  je průtok v otevřeném korytě [ $m^3/s$ ],  
 $A$  je průtočná plocha [ $m^2$ ],  
 $n$  je Manningův součinitel drsnosti [ $s/m^{1/3}$ ] a  
 $R_{stream}$  je hydraulický poloměr v otevřeném korytě [m].

Pro vlastní výpočet je třeba zadat typ a příčný profil daného úseku. Délka úseku a jeho sklon 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 příčných profilů jsou ukázány v tabulce 10 v příloze A. 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 kapitole 6.9 v části III tohoto manuálu.

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

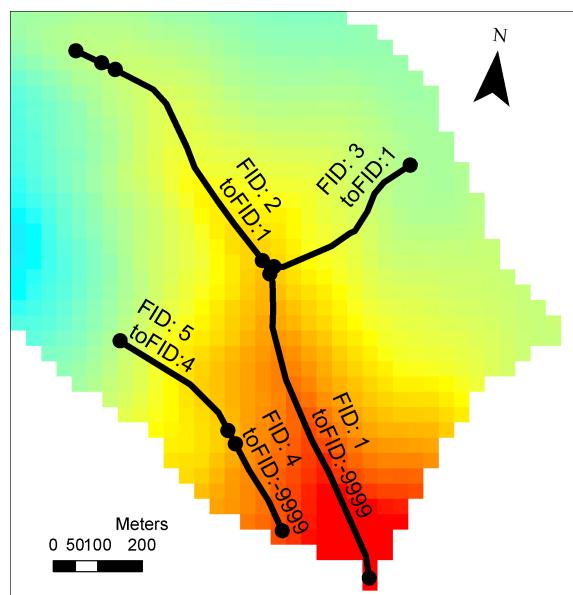
$$V_{stream,out} = \Delta t q_{stream}.$$

### 4.1 Propojení úseků hydrografické sítě

Na obrázku 4, jsou ukázány úseky na podkladové vrstvě digitálního modelu terénu. Každý úsek má označení FID. Při přípravě dat dostane každý úsek atribut `toFID`, který udává,

s jakými úseky je daný úsek propojen ve směru odtoku.  $\text{toFID} = -9999$  značí odtok přes okraj výpočetní oblasti.

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



**Obrázek 4:** Hydrografická síť s označením FID (id linie) a toFID (id následující linie při odtoku). Podkladová vrstva je digitální model terénu.  $\text{toFID} = -9999$  označuje odtok přes okraj výpočetní oblasti.

# Část III

## Použití modelu

---

Model SMODERP2D je napsán v programovacím jazyce Python. Příprava dat a samotný výpočet v časové smyčce jsou od sebe odděleny. 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 čtyř částí, které popisují instalaci modelu (kapitola 5), vstupní data (kapitola 6), tok programu (kapitola 7) a výstupy z modelu (kapitola 8).

---

## 5 Instalace SMODERP2D a spištění v ArcGIS

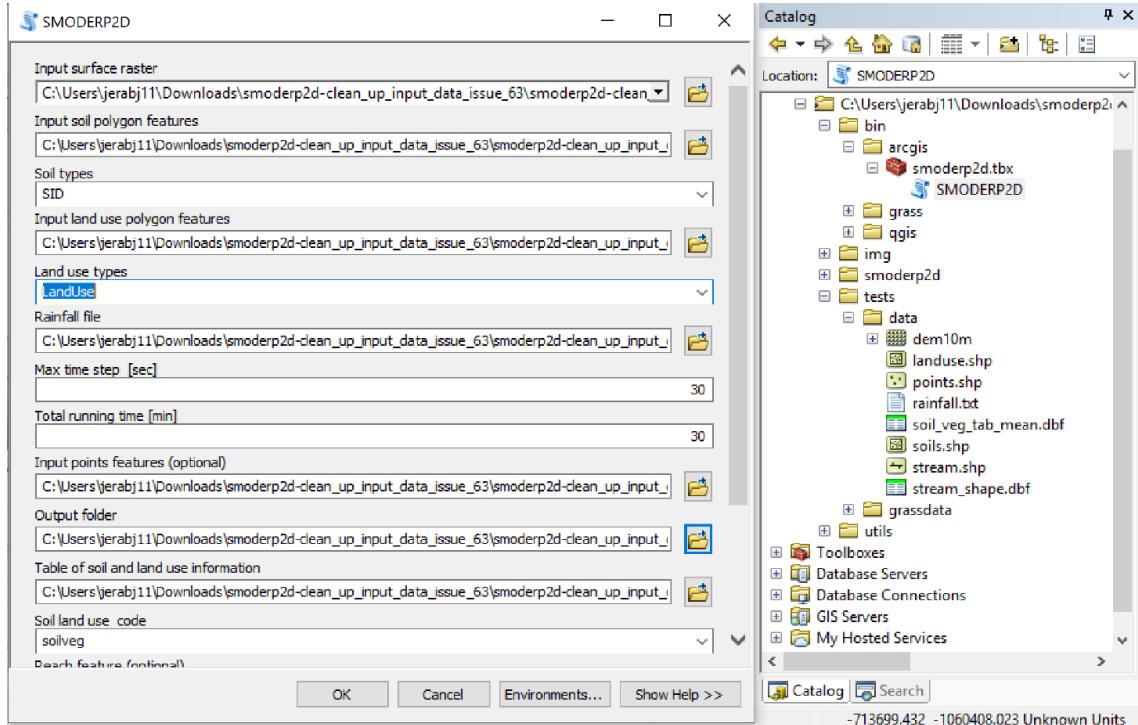
Uživatel má několik možností, jak získat model SMODERP2D. Model SMODERP2D je poskytován ve formě zdrojového kódu. Je tedy možné spouštět balíček přímo, bez instalace. V této části manuálu je popsáno jak a kde si mode SMODERP2D stáhnout jak ho použít v prostředí ArcGIS.

Model SMODERP2D je distribuován pod GPLv3<sup>4</sup> licencí. Veškeré dostupné materiály lze stáhnout na webových stránkách Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulty stavební ČVUT v Praze (`storm.fsv.cvut/..../smoderp/`). Na odkazu lze stáhnout malíček modelu SMODERP2D, tento manuál a další aktuální informace včetně odkazu na vzdálený repozitář na platformě `github.com`, kde je vždy dostupná aktuální verze modelu.

### 5.1 Použití modelu v ArcGIS

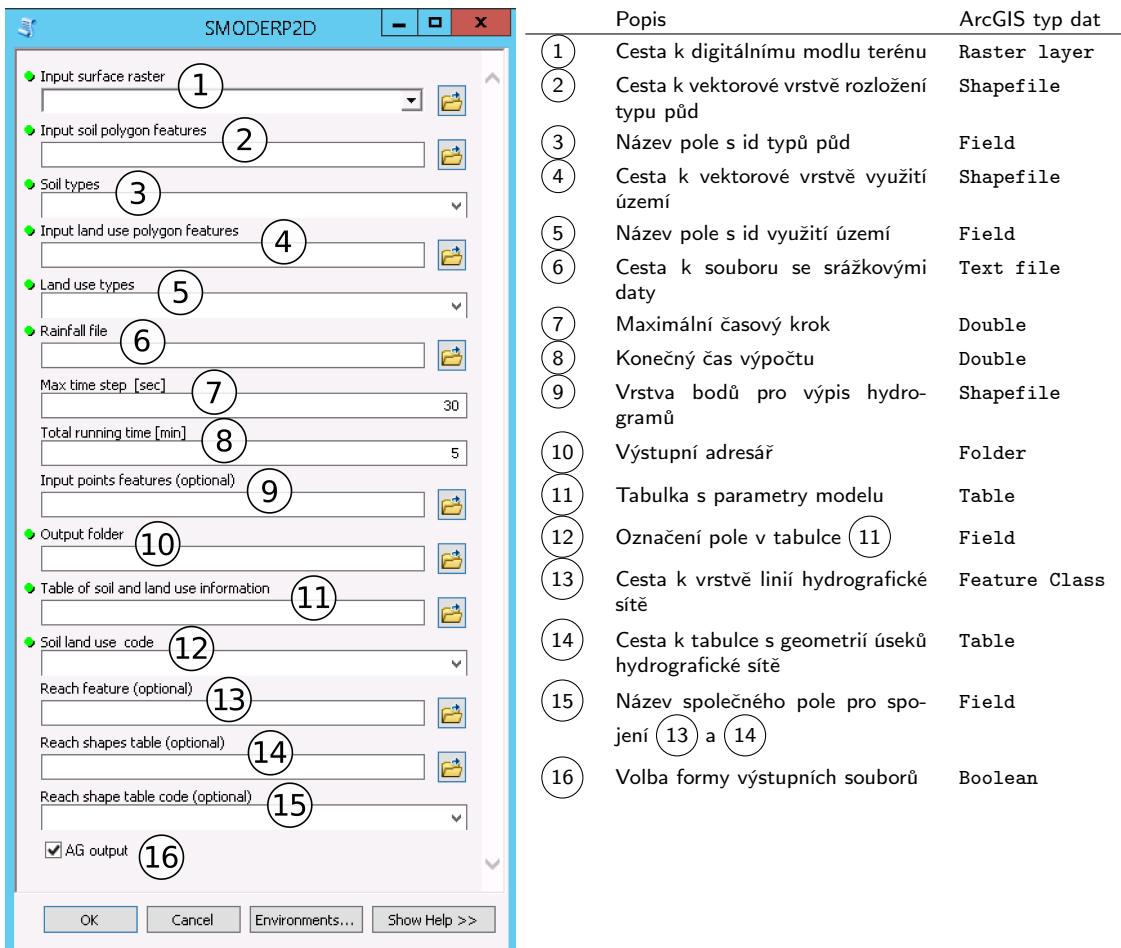
Současná verze modelu SMODERP2D využívá k přípravě vstupních dat výhradně software ArcGIS a Python balíček `arcpy`. Proto je součástí staženého modelu ArcGIS toolbox, který umožní, po nalinkování kořenového adresáře modelu do ArcCatalog, spouštět model SMO-

<sup>4</sup>Více informací na: [gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html](http://gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html)



**Obrázek 5:** Nalinkovaný smoderpěd ArcGIS toolbox do prostředí ArcMAP pomocí Arc Catalogu

DERP2D přímo z prostředí ArcMap. Toolbox je uložen v adresáři `smoderp2d/bin/arcgis`. Spuštěný a nalinkovaný toolbox v prostředí ArcMap je ukázán na obrázku 5. Takto připravený toolbox s poskytnutými testovacími daty je možné pustit bez dalších modifikací a následně si prohlédnout výsledky modelu, které jsou se uloží do adresáře `smoderp2d/tests/data/output` (jednotlivé výstupy modelu jsou popsány dále v textu). Vysvětlení jednotlivých vstupů v celém toolboxu je ukázáno na obrázku 6. Detailnější popis vstupů do modelu a princip jich přípravy je popsán v následující podkapitole.



Obrázek 6: ArcGIS toolbox a vysvětlenými parametry

## 6 Vstupy do modelu

Do modelu vstupují informace o topografii řešeného území, informace o typech půd a využití území a o jejich prostorovém rozmístění, informace o srážce, případně o geometrii dočasné hydrografické sítě. Tato data jsou zadávána ve třech formátech: rastrovém, vektorovém a textovém. 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.

**Tabulka 1:** Tabulka s přehledem vstupních dat modelu

Název	Typ dat	Povinný / volitelný	Poznámka	Více v kapitole
digitální model terénu	raster	Povinný	Tento vrstvou se řídí i prostorová diskretilizace.	6.1
prostorové rozložení půd	vektor - polygony	Povinný	V atributové tabulce identifikátor typu půdy.	6.2
prostorové rozložení využití území	vektor- polygony	Povinný	V atributové tabulce identifikátor využití území.	6.3 a 6.4
srážková data	.txt soubor	Povinný	Kumulativně zadaná srážka.	6.5
maximální časový krok	reálné číslo	Povinný	Model mění délku časového podle odtokových podmínek; doporučuje se 30 - 60 sekund.	6.6
výstupní adresář	text	Povinný	Adresář k uložení výsledků (při spuštění výpočtu se obsah adresáře vymaže!).	6.8
bodové výstupy hydrogramů	vektor - body	Volitelný	Body pro výpis výsledků.	6.7
parametry půdy a využití území	tabulka	Povinný	Tabulka parametrů půdy a využití území.	6.4
hydrografická síť	vektor - linie	Volitelný	Názvy sloupců mají definované označení. Hodnoty se spojí s vektorovými vrstvami. Prostorové rozložení hydrografické sítě. Atributová tabulka obsahuje identifikátor tvaru jednotlivých úseků.	6.9
parametry úseků hydrografické sítě	tabulka	Volitelný	Tabulka parametrů jednotlivých úseků hydrografické sítě.	6.9
volba arcgis výstupu	logická proměnná	Povinný	Výchozí formát výstupních rastrů je proprietární formát ERSL. Uživatel může zvolit textový formát ASCII.	—

## 6.1 Digitální model terénu

Rastr digitálního modelu terénu DMT, či anglicky DTM (Digital Terrain Model) reprezentuje souvislou morfologii určité části Země. DMT rastr je složen z jednotlivých buněk obsahující informaci o elevaci terénu. Velikost buněk se liší v závislosti na velikosti zobrazovaného území. Pro účely modelu SMODERP2D by minimální velikost buněk měla být 2 metry, optimum je však 5 metrů a více. Model byl testován na rastrech o velikosti od několika málo do stovek tisíc buněk. DMT jednoho z testovacích povodí, povodí Nučice, obsahuje přes 125 tisíc buněk při velikosti buňky 5 m. Příklad DMT dalšího testovacího povodí Býkovice je ukázán na obrázku 7a.

## 6.2 Půdní data

Vstupem do modelu je vektorová vrstva s vymezením jednotlivých půd.

Z hlediska půdních dat jsou obecně v ČR v rozumném měřítku podrobnosti k dispozici několik datových zdrojů. Prvním je syntetická půdní mapa v měřítku 1:250 000 (KPP250), která vychází z komplexního průzkumu půd, tento datový podklad byl odvozen z předešlé tištěné mapy, čemuž také odpovídá měřítko podrobnosti dat. Po rozdělení půdního fondu na lesní a zemědělskou půdu jsou dalšími zdroji oddělené databáze pro tyto dvě skupiny. Na zemědělské půdě je dostupná půdní typologie (ve formě kódu BPEJ, resp. HPJ), v současné době uvolněná k využití na portálu SPÚ. Prakticky neexistuje vhodný převodní klíč mezi hodnotami BPEJ a parametry infiltráčních rovin. Půdní druhy vyjadřující zrnitost ornice a podorničí podle Novákovy klasifikace je možné získat na VÚMOP v.v.i., dle aktuálního ceníku jako vektorovou vrstvu ve formátu shp. Dále jsou na portálu kpp.vumop.cz dostupné informace o konkrétních půdních sondách průzkumu KPP (kpp.vumop.cz).

V případě lesních půd, lesnické typologie a informací o půdních charakteristikách je dostupnost dat omezená. Veřejně dostupné jsou kódy lesnické typologie, ale metodika pro převod kódované informace na hydrologické vlastnosti půd (Macků, 2012) není dohledatelná. Hloubka lesních půd, zrnitostní složení a některé další charakteristiky jsou k dispozici na Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHUL), ale jejich poskytnutí vyžaduje součinnost s uvedeným úřadem.

V případě využití modelu jsou klíčovým vstupem hydraulické charakteristiky půd, zejména nasycená hydraulická vodivost  $K_s$ . Tato veličina je závislá na řadě půdních charakteristik, nejčastěji je vztahována k jejímu zrnitostnímu složení. Regionalizované informace o zrnitosti půd lze v ČR získat z výše jmenovaných datových zdrojů.

Kromě dostupnosti prostorových dat vstupuje další komplikace v podobě nesouladu v klasifikaci půd na lesní půdě (USDA) a zemědělské (Novákova klasifikace). Syntéza těchto dat není triviální. Průměrné hodnoty  $K_s$  pro jednotlivé zrnitostní třídy, tzv. pedotransferové funkce, jsou odvozené z rozsáhlých půdních databází, které lze nalézt zejména v zahraniční literatuře (Wösten et al. 1999, Tóth et al. 2015). V českých podmírkách je k dispozici, počtem analyzovaných vzorků značně omezená, databáze HYPRES-CZ (Mihalíkova et al. 2013). Obecně se však jedná o velmi variabilní data. Vzhledem k enormnímu

rozptylu hodnot je pro snížení nejistot v hydrologickém modelování velmi žádoucí zajistit alespoň základní půdní rozbor v řešené lokalitě.

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 v samostatné tabulce (viz níže). Mezi půdní charakteristiky a parametry používané modelem patří:  $k$  - nasycená hydraulická vodivost [ $ms^{-1}$ ];  $S$  - sorptivita půdy [ $m\sqrt{s}$ ];  $n$  - Manningův součinitel drsnosti [ $s/m^{1/3}$ ],  $b$  - parametr rovnice plošného odtoku [–],  $X$  - parametr rovnice plošného odtoku [–] a  $Y$  - parametr rovnice plošného odtoku [–]. Hodnoty těchto parametrů lze převzít z tabulky 11 v příloze A. Fyzikální význam těchto parametrů a jejich implementace v modelu jsou popsány v části II toho manuálu.

### 6.3 Data využití území

Obdobně jako u půdních dat je vstupem vektorový shapefile popisující využití území.

Data o využití území jsou dostupné jak ve vektorové, tak rastrové podobě. Na stránkách MŽP je po registraci zdarma dostupná vrstva CORINE LandCover. Ve větším detailu je možné data o povrchu odvodit z databáze ZABAGED. Z vrstev je možné získat informace o plochách, líniových prvcích, cestní síti, vodních tocích. Využití území je možné na zemědělské půdě zpřesnit na základě dat LPIS. Převod líniových prvků na plošné je vhodné jen u prvků šířky srovnatelné se zvoleným rozlišením DMT, např. u dálnic a silnic první třídy. Rozumnou volbou podrobnosti účely hydrologického modelování je spojení vstupních vrstev do přiměřeného množství kategorií. Vhodné členění může být například:

- orná půda,
- travní porosty,
- ostatní zeleň,
- vodní plochy,
- sady,
- křovinaté porosty,
- lesní porosty,
- antropogenní a zpevněné plochy,
- zahrady.

V kategorii zpevněných ploch jsou zařazeny jak oblasti zástavby, tak zpevněné komunikace s přiměřeným rozšířením podle kategorie silnice.

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 6.4). Parametry související s využitím území, které vstupují do modelu jsou  $I_{POT}$  - potenciální intercepce [ $m$ ] a  $I_{LAI}$  - poměrná plocha listová [–]. Jejich konkrétní použití je popsáno v části II toho manuálu.

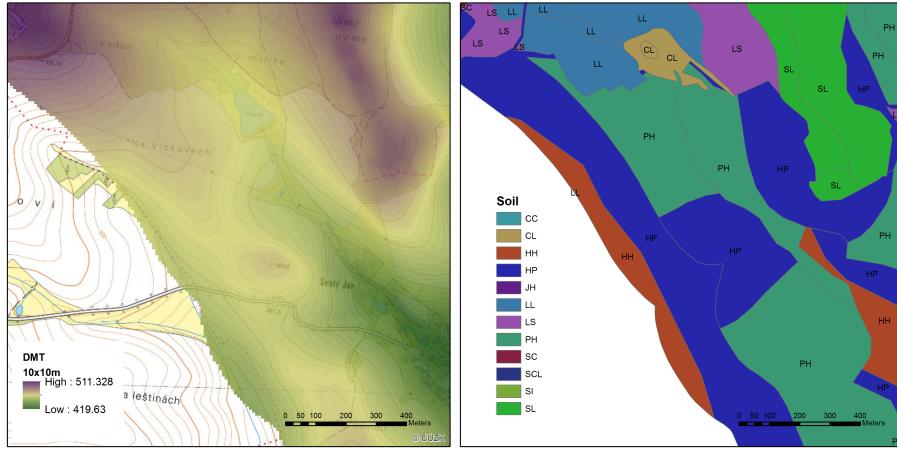
**Tabulka 2:** Přehled parametrů charakterizujících půdní typ a typ vegetačního pokryvu

Povinný název hlavičky v tabulce	Symbol	Popis
k	$k$	nasycená hydraulická vodivost [ $ms^{-1}$ ]
s	$S$	sorptivita půdy [ $m\sqrt{s}$ ]
n	$n$	Manningův součinitel drsnosti [ $s/m^{1/3}$ ]
pi	$I_{POT}$	potenciální intercepce [ $m$ ], do tabulky se zadává v <b>milimetrech</b>
ppl	$I_{LAI}$	poměrná plocha listová [–]
ret	$ret$	povrchová retence [m]
b	$b$	parametr rovnice plošného odtoku [–]
x	$X$	parametr rovnice plošného odtoku [–]
y	$Y$	parametr rovnice plošného odtoku [–]
tau	$\tau_{crit}$	kritické tečné napětí [ $Pa$ ]
v	$v_{crit}$	kritická nevymílací rychlosť [ $m/s$ ]

#### 6.4 Tabulka parametrů půdy a využití území

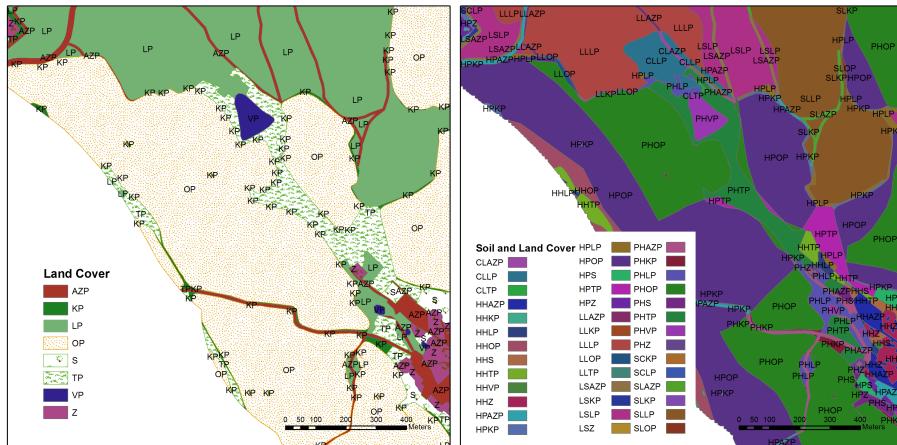
Další povinný vstup je tabulka, která obsahuje hodnoty jednotlivých parametrů popsaných v předešlých kapitolách a v části II toho manuálu. Na tuto tabulku se odkazují identifikátory půdního typu a typu využití území definované pro jednotlivé polygony v atributových tabulkách vektorových vstupů. Tato 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*). Toto *id* je pak spojeno s vektorovou vrstvou na obrázku 7d, kde jsou spojeny *id* z průniku vektorových vrstev půdy 7b a využití území 7c. Tyto prostorově distribuované parametry jsou následně pro potřeby výpočtu uloženy do rastrů. Hodnoty jednotlivých parametrů pro různé půdní textury, které lze při výpočtu použít, jsou ukázány v tabulce 11 v příloze A. Hodnoty parametrů mají určitý rozptyl, proto se důrazně doporučuje provést jejich měření pro půdy na daném specifickém území.

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



(a)

(b)



(c)

(d)

Soil	Land Co.	soilveg	k	s	n	p1	ppl	ret	b	x	y	tau	v
SS	S	SSS	2.31E-05	0.000361	0.075	1.1	0.4	8	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245
LS	S	LSS	2.31E-05	0.000361	0.075	1.1	0.4	8	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245
SL	S	SLS	2.31E-05	0.000904	0.075	1.1	0.4	8	1.7925	9.2043	0.4622	10.66	0.245
LL	S	LLS	1.04E-05	0.000310	0.075	1.1	0.4	8	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
SIL	S	SILS	2.22E-06	0.000181	0.075	1.1	0.4	8	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
SI	S	SIS	2.22E-06	0.000181	0.075	1.1	0.4	8	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
SCL	S	SCLS	1.04E-05	0.000310	0.075	1.1	0.4	8	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264
CL	S	CLS	1.04E-05	0.000310	0.075	1.1	0.4	8	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264
SICL	S	SICLS	2.22E-06	0.000181	0.075	1.1	0.4	8	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264
SC	S	SCS	4.03E-05	0.0001291	0.075	1.1	0.4	8	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305
SIC	S	SICS	4.03E-05	0.0001291	0.075	1.1	0.4	8	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305
CC	S	CCS	2.36E-05	0.000103	0.075	1.1	0.4	8	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245
NO	S	NOS	0.00E+00	0.000000	0.075	1.1	0.4	8	1.5847	7.9848	0.4889	100	3
HH	S	HHS	1.67E-05	0.000439	0.075	1.1	0.4	8	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248
HP	S	HPS	3.67E-05	0.000904	0.075	1.1	0.4	8	1.7925	9.2043	0.4622	10.66	0.245
J0	S	J0S	1.66E-06	0.000194	0.075	1.1	0.4	8	1.6185	12.0391	0.6717	13.27	0.305
JJ	S	JJS	1.66E-06	0.000194	0.075	1.1	0.4	8	1.6665	11.2571	0.6358	13.27	0.305
JH	S	JHS	2.50E-06	0.000120	0.075	1.1	0.4	8	1.7025	10.6706	0.6028	11.5	0.264
PH	S	PHS	1.67E-05	0.000349	0.075	1.1	0.4	8	1.7385	10.0841	0.5613	10.79	0.248

(e)

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

## 6.5 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 je na obrázku 8. První záznam vyjadřuje srážku od času 0 do například 10 minut (obrázek 8). První záznam v textovém souboru musí mít nenulový čas i úhrn. Soubor může obsahovat prázdné řádky, které jsou ignorovány, nebo komentáře začínající #.

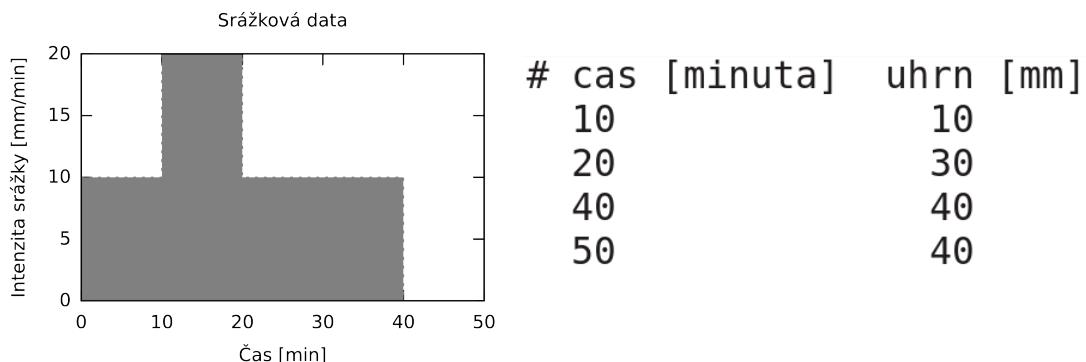
## 6.6 Časový krok modelu a celková doba výpočtu

Časový krok modelu  $\Delta t$  je hodnota v sekundách. Jako vstupní parametr se zadává maximální časový krok. Tento časový krok je rovněž počáteční časový krok. Časový krok  $\Delta t$  je v průběhu výpočtu upravován podle Courant-Friedrich-Lowy (*CFL*) podmínky tak, aby byla zachována numerická stabilita. Délka časového kroku závisí na rychlosti povrchového odtoku a na velikosti prostorového kroku (velikosti buňky DMT). Maximální časový krok záleží na požadovaném detailu výstupních dat, zejména při dotoku srážkové epizody, kdy jsou již rychlosti proudění nižší a kdy by *CFL* kritérium povolovalo příliš velký časový krok. Zvolené řešení změn časového kroku je detailněji popsáno v kapitole 7.2.

Konečný čas simulace je hodnota v minutách. Délka běhu modelu by měla být taková, aby odtekla veškerá voda z řešeného území, především při zjištování celkového objemu odtoku.

## 6.7 Body pro generování hydrogramů

Jedná se o volitelnou bodovou vektorovou vrstvu. V této bodech se budou ukládat časové řady počítaných veličin (hydrogramy). Obsah časových řad je podrobněji popsán v



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

kapitole 8.3.

## 6.8 Výstupní adresář

Do výstupního adresáře se uloží veškeré výstupy modelu. Na začátku běhu programu se obsah tohoto adresáře celý vymaže, proto se doporučuje vždy provést kontrolu. V žádném případě nenastavujete jako výstupní adresář pracovní plochu, či jiný adresář, kde byste mohli mít uložená důležitá data!

## 6.9 Hydrografická síť

Hydrografickou sítí jsou myšleny nejen vodní toky, ale i prvky dočasné hydrografické sítě jako jsou příkopy, průlehy, cesty s příkopy a pod. Výpočet v modelu probíhá po jednotlivých úsecích pomocí Manningovy rovnice pro výpočet průtoku (popsané v části II). Prostorové umístění jednotlivých úseků je definované pomocí shapefile liniové vrstvy. Charakteristiky jednotlivých úseků jsou definovány v samostatné tabulce. Pro propojení prostorové informace s charakteristikami úseků je třeba mít v této tabulce shodný název pole jako ve vrstvě vodních toků, kde jsou uloženy označení jednotlivých typů příčných profilů.

V tabulce 3 je ukázka zadávaných hodnot. Model umožňuje vybrat ze čtyř tvarů příčného průřezu úseků, kde každý tvar má povinné celočíselné označení. Tyto tvary jsou: obdélník (výchozí; tvar: 0), lichoběžník (tvar: 1), trojúhelník (tvar: 2) a parabola (tvar: 3). Kromě tvarových charakteristik (šířka dna, sklon břehu) lze rovněž definovat základní průtok ve formě 365-ti denního průtoku. Pokud úsek charakterizuje objekt, který je pouze dočasně zavodněný, je  $Q_{365} = 0$ . Pole, které slouží k připojení parametrů z tabulky k jednotlivým úsekům hydrografické sítě je v tabulce 3 označeno jako *smoderp*. Rovnice použity při určení hydraulického poloměru jednotlivých tvarů příčných profilů jsou ukázány v tabulce 10 v příloze A.

**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 [ $s/m^{1/3}$ ] a
  - $Q_{365}$  je základní průtok [ $m^3/s$ ].

## 7 Popis programu

Adresářová struktura programu modelu SMODERP2D s popisem nejdůležitějších adresářů je ukázána na obrázku 11 v příloze A. Klíčovým adresářem je adresář `bin/`, kde jsou uložené gui plug-iny pro použití modelu v ArcGis a dalších GIS softwarech. V adresáři `smoderp2d/` je uložený samotný zdrojová kód modelu. Dalším důležitým adresářem je adresář `smoderp2d/providers`, kde jsou uloženy třídy pro *preprocessing* vstupních dat (v této verzi modelu implementovaný pomocí ArcGIS). Jak je vidět na obrázku ??, v adresáři `smoderp2d/providers` jsou uloženy třídy pro 2 další GIS softwary. V současné verzi modelu zůstává použití jiných GIS softwaru pouze experimentální. V adresáři `tests/data` jsou uložena testovací data. Jedná se o data experimentálního povodí Nučice, kde katedra KHMKI ČVUT v Praze provádí výzkum srážko-odtokových a erozních procesů na měřítku malého zemědělského povodí. Do adresáře `tests/data` jsou rovněž uloženy výsledky testovací úlohy.

Program SMODERP2D je napsaný v jazyce Python. Python je často používaný GIS softwary jako skriptovací jazyk a jsou pro něj k dispozici knihovny pro efektivní práci s geodatami<sup>5</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 v příloze A je zjednodušený diagram toku programu. Program řeší v každém časovém kroku rovnici (3). Pokud je překročena kritická výška a půda se začne vymílat, začne se do celkového odtoku započítávat i soustředěný odtok. Bilanční rovnice je rozšířena (11). Pokud je řešen i odtok hydrografickou sítí, načítá se celkový přítok  $\sum_j^m o^{in}_{j,t-1}$  (případně  $\sum_k^n o^{in}_{rulk,t-1}$ ) v rovnici (3) nebo (11) do všech buněk ležících v daném úseku. Odtok je následně řešen Manningovou rovnicí.

Pokud v daném časovém kroku překročí rychlosť v jakékoli buňce *CFL* kritérium, dojde ke zmenšení časového kroku a výpočet se v daném kroku opakuje. Pokud je *CFL* kritérium nízké, je možné časový krok zvýšit. To odpovídá kontrole a aktualizaci časového kroku v diagramu na obrázku 12. Po dosažení konečného času dojde k uložení výsledných hodnot a ukončení programu. Pravidla *CFL* kritéria jsou popsána v kapitole 7.2 a implementována v souboru `src/courant.py`.

### 7.1 Programovací jazyk Python

Python je vysokoúrovňový objektově orientovaný programovací jazyk, který se může využít v mnoha oblastech vývoje softwaru. Nabízí významnou podporu k integraci s ostatními jazyky a nástroji a přichází s mnoha standardními knihovnami. Jeho použití je velice široké od programů na zpracování multimedií až po zpracování textů. Python je multiplatformní programovací jazyk (Python Software Foundation 2017). Zajímavým balíčkem jazyka Python je `numpy` (van der Walt et al. 2011). Je to balíček užívaný pro vědecké výpočty. Umožňuje manipulaci s velkými multi-dimenzionálními poli a disponuje velkou knihovnou

---

<sup>5</sup>knihovna `arcpy` pro ArcGIS či knihovny `grass.script` pro GRASS GIS

**Tabulka 4:** Kritéria změny časového kroku vycházející z plošného odtoku

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

matematických funkcí pro práci s témito poli. Pomocí tohoto balíčku bylo v programu operováno s naprostou většinou polí a matic.

Aktuální verze modelu SMODERP2D používá Python 2.7. V současnosti (Prosinec 2017) je nejnovější verze jazyka Python 3.6. Poslední verze vývojové větve Pythonu 2.7 vyšla v roce 2010. Podpora Python 2.7 je plánována do jara 2020 (přesné datum zatím není stanoveno). S koncem podpory Python 2.7 končí i implementace této verze v gis softwarech. ArcGIS PRO již podporuje výhradně Python 3. Proto bude docházek k migraci modelu SMODERP2D na verzi Python 3.

## 7.2 CFL podmínka - řešení nestability výpočtu

V předchozích verzích modelu SMODERP2D nebyla ošetřena podmínka stability výpočtu, která vychází z řešení časové derivace. Při větších rychlostech toku či nevhodně zvolené délce časového kroku docházelo k nestabilitám v řešení. Program se v takovém případě ukončil a uložil výsledky posledního úspěšně spočítaného časového kroku.

V současné verzi programu SMODERP2D je tento problém vyřešen Courant-Friedrich-Lewy ( $CFL$ ) podmínkou. Splnění této podmínky zajišťuje konvergenci explicitního řešení pokud platí, že  $CFL < 1.0$ . Z obecné rovnice  $CFL$  podmínky byla odvozena a upravena podmínka pro účely modelu SMODERP2D na následující tvar:

$$CFL = \frac{1}{0.5601} \frac{v\Delta t}{\Delta x} \quad (13)$$

kde  $CFL$  je Courant-Friedrich-Lewy podmínka,  
 $v$  je rychlosť plošného či rýhového toku [ $m/s$ ],  
 $\Delta t$  je časový krok [ $s$ ] a  
 $\Delta x$  je prostorový krok [ $m$ ].

Po dokončení výpočtu časového kroku je uložena nejvyšší hodnota  $CFL$  zjištěná z **plošného odtoku** pomocí vztahu (13). Poté se tato hodnota porovná s kritickou hodnotou  $CFL$  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 kroku a aktualizovaným  $\Delta t$ . Do dalšího času se výpočet posune, až když je zaručena stabilita výpočtu.

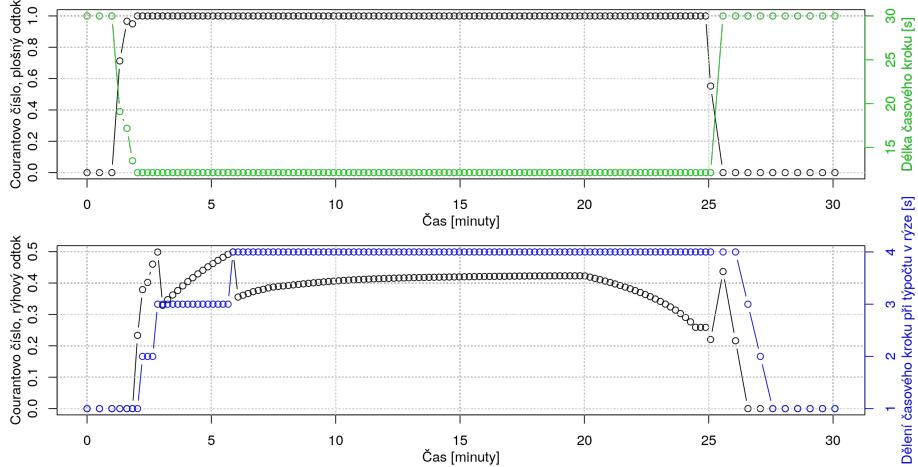
**Soustředěný odtok** v rýhách je zpravidla řádově rychlejší než plošný odtok. Pokud bychom v tomto případě uplatňovali stejný princip jako u plošného odtoku, časový krok by byl extrémně malý, čímž by se prodlužoval strojový čas výpočtu. K odtoku v rýhách většinou nedochází na celém území, ale pouze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

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

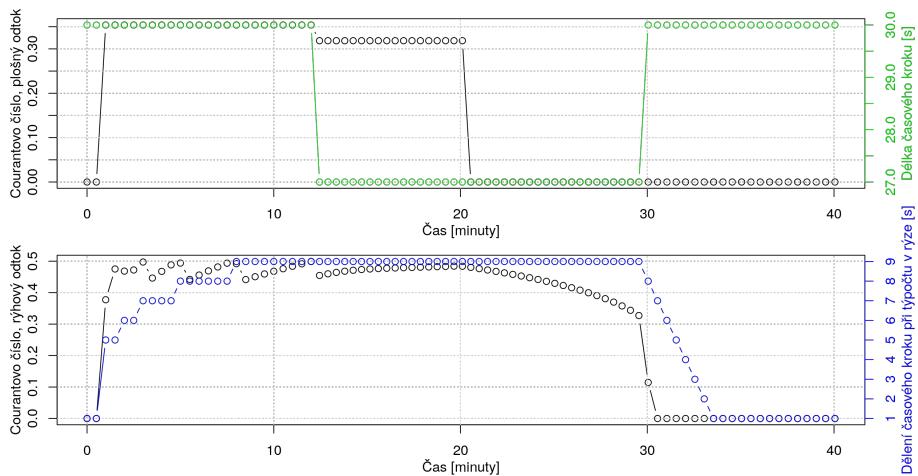
nové	$CFL_{rill} < 0.3$	$0.5 < CFL_{rill}$	$0.3 \geq CFL_{rill} \geq 0.5$ $\vee CFL_{rill} = 0.0$
$ratio$	$= MAX(ratio - 1; 1)$	$= MIN(ratio + 1; 9)$ pro $ratio = 10$	původní $ratio$
$\Delta t_{mult}$	$= MIN((1/0.9)\Delta t_{mult}; 1)$	$= 0.9\Delta t_{mult}$	původní $\Delta t_{mult}$
$\Delta t$		$= \Delta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

lokálnímu krácení časového kroku pouze v buňkách, kde k soustředěnému odtoku dojde. Časový krok výpočtu odtoku v rýhách je dělen celočíselně faktorem označeným jako  $ratio$ .  $CFL$  číslo se proto ukládá zvlášť u plošného a zvlášť u soustředěného odtoku. Ke změně celkového časového kroku plošného odtoku dojde až pokud  $ratio \geq 10$ . Časový krok plošného odtoku je pak násoben multiplikátorem  $\Delta t_{mult}$ , který se po každém překročení kritické  $CFL$  podmínky zmenší na 90 % své dosavadní hodnoty. Pokud je  $CFL$  kritérium příznivé (začíná se zmenšovat), multiplikátor  $\Delta t_{mult}$  se postupně zvětšuje vždy o 10 % dokud nedosáhne hodnoty 1. Pravidla pro změnu faktoru  $ratio$  a multiplikátoru  $\Delta t_{mult}$  jsou shrnuta tabulce 5.

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



**Obrázek 9:** Časový krok je řízen rychlosí plošného odtoku.  $CFL$  rychle stoupne k 1 a začne zkracovat časový krok (horní graf). O 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 maximálně na 4 a neovlivní tedy celkový časový krok (na horném grafu). Na obou grafech je vidět, jak se po 25. minutě (kdy v modelu skončila srážková událost) délka časového kroku i  $ratio$  vrátí na původní hodnoty.



**Obrázek 10:** Časový krok je řízen rychlosí rýhového odtoku.  $CFL$  plošného odtoku neprekročí během výpočtu hodnotu cca 0.35 (na horním grafu), proto nemá žádný vliv na velikost časového kroku.  $CFL_{rill}$  rychle vystoupí 9 krát nad kritickou hodnotu 0.5 (spodní graf, prvních 10 minut výpočtu). To způsobí nárůst  $ratio$  na 9, což je maximální povolené dělení lokálního časového kroku při výpočtu rýhového odtoku. Při dalším překročení hodnot 0.3 (cca 12. minuta na dolním grafu) dojde ke zmenšení celkového časového kroku na 90 % původní hodnoty (horní graf). Na obou grafech je vidět jak se po 20. minutě (kdy v modelu skončila srážková událost) délka časového kroku i  $ratio$  vrátí na původní hodnoty.

## 8 Výstupy z modelu

Výstupy modelu jsou uloženy do složky zadané mezi vstupními parametry (obsah složky je při spuštění programu vymazán!). Kumulativní nebo maximální hodnoty veličin v jednotlivých buňkách jsou na konci výpočtu uloženy v rastrovém formátu (viz kapitola 8.1). Průnik polygonů prostorové distribuce typu půd a využití území jsou uloženy ve vektorovém formátu (viz kapitola 8.2). 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 8.2). Prostorové rozložení jednotlivých úseků je uloženo také jako jeden s rastrů (viz kapitola 8.1). Volitelné výstupy hydrogramů v bodech jsou ve formě časových řad uloženy do textových souborů s příponou **.dat** (viz kapitola 8.3). Další nadstandardní výstupy lze získat způsobem popsaným v příloze **??**. Jednotlivé výstupy jsou dále popsány podrobněji.

### 8.1 Rastrové výstupy

V rastrech jsou uloženy maximální a kumulativní hodnoty vybraných veličin v jednotlivých buňkách řešeného území. Jako rastrový formát lze zvolit proprietární ESRI formát nebo textový formát ASII. Přehled rastrových výstupních souborů je shrnut v tabulce 6. Pokud jsou v modelu řešeny i úseky hydrografické sítě, jsou buňky rastru ležící na úseku uloženy s hodnotou **NoData** (výjimku tvoří 2 rastry popisující vlastnosti úseků, viz tabulka 6).

### 8.2 Vektorové výstupy

Výstupní vektorová data jsou tři. Jedná se topologicky upravenou vrstvu úseků hydrografické sítě (**hydReach**), kde jsou do její atributové tabulky doplněny kumulativní a maximální hodnoty vybraných veličin. Tyto veličiny jsou popsány v tabulce 7. Druhým vektorovým výstupem je vrstva, která zobrazuje průnik prostorového rozložení typu půdy a využití území (**interSoillU**). Ukázka takové vrstvy je na obrázku 7. Tato vektorová vrstva slouží především ke kontrole správnosti přípravy vstupních dat či hledání chyb v nich. Při **preprocessingu** jsou z (nepovinné) bodové vrstvy pro zápis hydrogramů smazány body, které jsou mimo výpočetní oblast. Proto je ve výsledcích uložena vrstva s body, které jsou skutečně pro výpis hydrogramů použity. Tato bodová vrstva má název **pointsCheck**.

### 8.3 Hydrogramy

Pokud jsou do vstupů zadány body pro výpis hydrogramů, vypíše se do textových souborů s příponou **.dat**. Vypsané veličiny jsou závislé na typu odtokového procesu. Popis vypsaných veličin povrchového odtoku je v tabulce 8. Pokud je bod v buňce úseku hydrografické sítě, vypisuje se hodnoty tohoto celého úseku, přestože tento bod není na konci úseku. Názvy a význam veličin popisujících 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

**Tabulka 6:** Přehled rastrových výstupů

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

jeho šířka menší než šířka samotné buňky. Název téhoto souboru je odvozen z FID upravené bodové vrstvy `pointsCheck` ve tvaru `point{pointsCheck:FID}.dat`.

**Tabulka 7:** Popis veličin tabulky úseků hydrografické sítě

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

**Tabulka 8:** Popis veličin hydrogramů mimo úsek hydrografické sítě

Název sloupce	Jednotka	Popis
time[s]	$s$	Čas od začátku simulace
deltaTime[s]	$s$	Aktuální délka časového kroku
rainfall[m]	$m$	Srážková výška v aktuálním časovém kroku
totalWaterLevel[m]*	$m$	Celková výška hladiny
surfaceFlow[m <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 skutečná výška hladiny v rýze, ale nadkritická výška hladiny vztažená na celou plochu výpočetní buňky

**Tabulka 9:** Popis veličin hydrogramů v úsecích hydrografické sítě

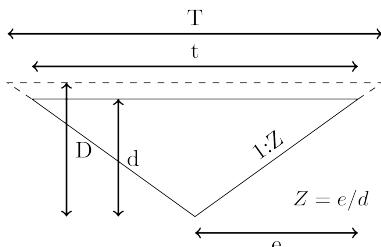
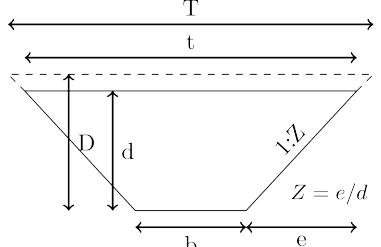
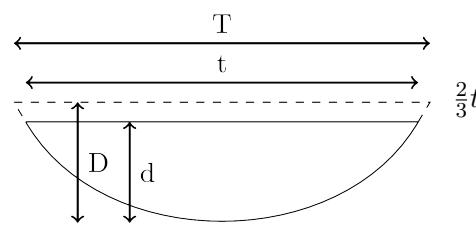
Název sloupce	Jednotka	Popis
time[s]	$s$	Čas od začátku simulace
deltaTime[s]	$s$	Aktuální délka časového kroku
rainfall[m]	$m$	Srážková výška v aktuálním časovém kroku
reachWaterLevel[m]	$m$	Výška hladiny plošného odtoku
reachFlow[m <sup>3</sup> /s]	$m^3 s^{-1}$	Průtok plošného odtoku
reachVolRunoff[m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

```
smoderp2d - kořenový adresář modelu smoderp2d
|-- bin - gui pro spouštění modelu v gis
|   |-- arcgis - toolbox pro arcgis
|   |-- grass - balíček pro grass gis
|       |-- r.smoderp2d
|   |-- qgis - qgis plug
|       |-- smoderp
|-- smoderp2d - samotný model smoderp2d
|   |-- core - základní datové struktury modelu
|   |-- flow_algorithm - definice odrokových algoritmů
|   |-- io_functions - in / out funkce
|   |-- processes - procesy počítané modelem smoderp2d: plošný/soustředěný odtok,
|                                         infiltrace, srážka
|   |-- providers - obsahuje na platformě závyslé třídy pro přípravu dat
|       |-- arcgis - příprava dat v arcgis
|       |-- base - základní třída přípravy dat
|       |-- cmd - třídy pro slouštění modelu v příkazové řádce
|       |-- grass - příprava dat v grass gis
|   |-- stream_functions - funkce související s výpočtem v hydrografické síti
|   |-- tools - obecné nástroje
|-- tests - testovací data
|   |-- data - testovací data pro arcgis
|   |-- grassdata - testovací data pro grass gis
|-- utils - další nástroje
```

**Obrázek 11:** Důležité soubory a adresáře modelu SMODERP2D

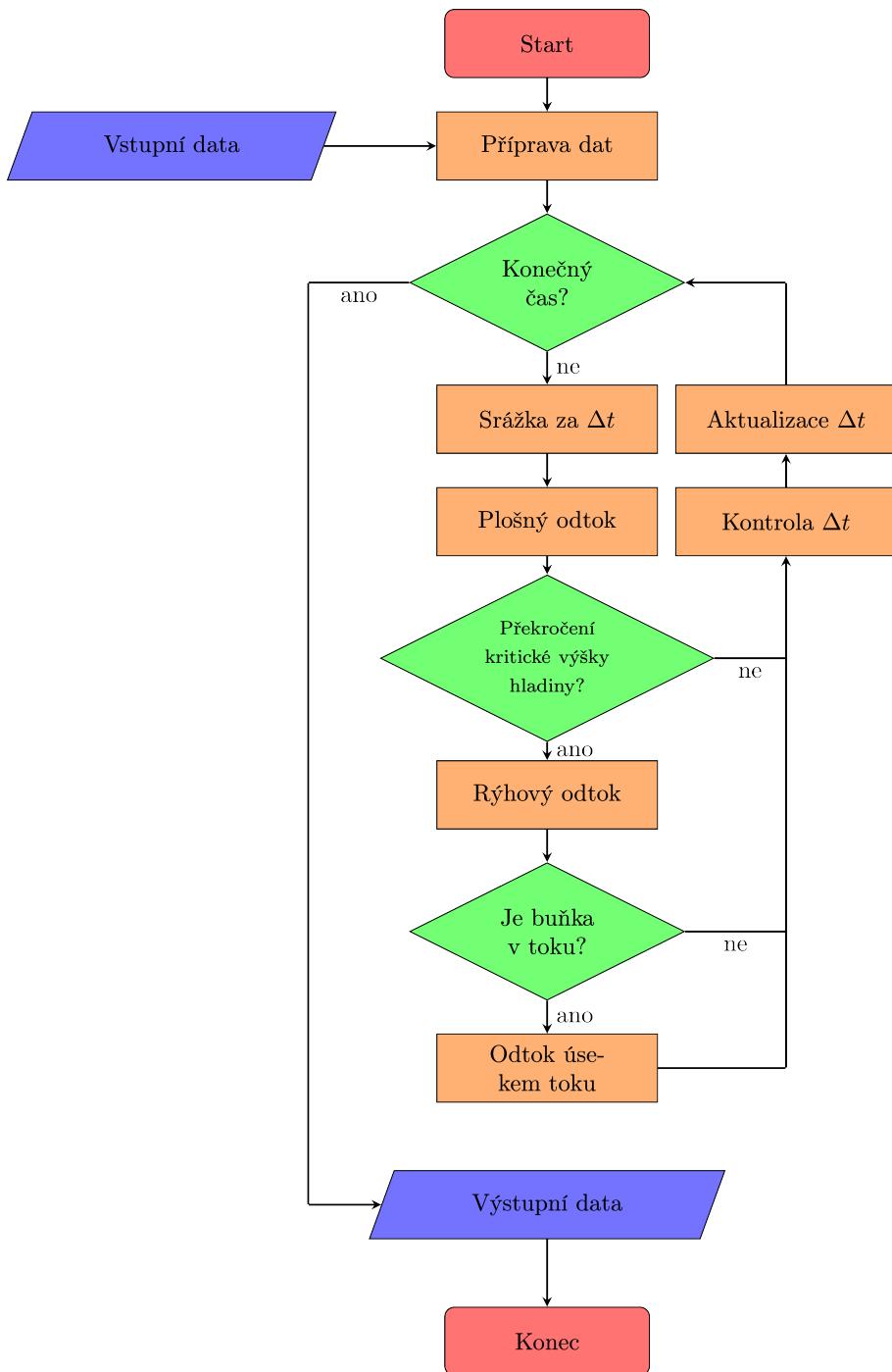
## A Příloha: doplňující tabulky a grafy

**Tabulka 10:** Tvary příčných průřezů úseků hydrografické sítě a použité vztahy na výpočet hydraulického poloměru

Tvar	Průtočná plocha ( $A$ )	Omočený obvod ( $O$ )	Šířka horní hrany
<b>Lichoběžník</b>			
	$bd + Zd^2$	$b + 2b\sqrt{1 + Z^2}$	$t = b + 2dZ$ $T = b + 2DZ$
<b>Trojúhelník</b>			
	$Zd^2$	$b + 2b\sqrt{1 + Z^2}$	$t = 2dZ$ $T = 2\frac{D}{d}t$
<b>Parabola</b>			
	$t + \frac{8d^2}{3t}$	$t = \frac{3A}{2d}$ $T = t \left(\frac{D}{d}\right)^{1/2}$	

**Tabulka 11:** Parametry typů půd a kritické hodnoty třecího napětí a nevymílací rychlosti. Kompilát z několika zdrojů, především Dýrová E. (1984), Neumann & Kavka (2015).

Název	ID	k [m/s]	s [m.s.0.5]	b	x	y	v m/s	tan Pa
coarse	CC	6.940E-06	9.746E-05	1.817E+00	8.813E+00	3.661E-01	1.066E+01	2.450E-01
	MF	1.390E-06	1.291E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
medium	MF	2.640E-07	1.162E-04	1.793E+00	9.204E+00	4.622E-01	1.066E+01	2.450E-01
	FF	2.780E-06	4.746E-05	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
fine	VF	1.670E-06	1.291E-04	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
	SS	1.000E-06	1.291E-04	1.817E+00	8.813E+00	3.661E-01	1.066E+01	2.450E-01
loamy sand	LS	1.000E-06	1.291E-04	1.817E+00	8.813E+00	3.661E-01	1.066E+01	2.450E-01
	SL	5.140E-06	9.746E-05	1.793E+00	9.204E+00	4.622E-01	1.066E+01	2.450E-01
sandy loam	LL	1.670E-06	1.291E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
	SII	1.390E-07	1.033E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
silt	SI	1.670E-07	1.033E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
	SCL	5.140E-06	9.746E-05	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
sandy clay loam	CL	1.940E-06	4.746E-05	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
	SICL	1.670E-07	1.033E-04	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
silty clay loam	SC	5.140E-06	9.746E-05	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
	SCL	1.940E-06	4.746E-05	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
clay	CC	1.940E-06	4.746E-05	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
	NO	0.000E+00	0.000E+00	1.585E+00	7.985E+00	4.889E-01	1.000E+02	3.000E+00
hlinitá	HH	1.670E-06	1.291E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
	HP	3.670E-06	7.746E-05	1.793E+00	9.204E+00	4.622E-01	1.066E+01	2.450E-01
jíl	J0	1.660E-07	1.033E-04	1.619E+00	1.204E+01	6.717E-01	1.327E+01	3.050E-01
	JJ	1.660E-07	1.033E-04	1.667E+00	1.126E+01	6.358E-01	1.327E+01	3.050E-01
jílovitá	JH	2.500E-07	1.162E-04	1.703E+00	1.067E+01	6.028E-01	1.150E+01	2.640E-01
	PH	1.670E-06	1.291E-04	1.739E+00	1.008E+01	5.613E-01	1.079E+01	2.480E-01
písčitohlinitá	PP	1.670E-05	1.936E-04	1.817E+00	8.813E+00	3.661E-01	1.066E+01	2.450E-01



Obrázek 12: Flow chart toku programu

# Seznam použitých zdrojů

---

## Reference

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. & Rasmussen, J. (1986a), 'An introduction to the european hydrological system—système hydrologique europeen, "she", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system', *Journal of hydrology* **87**(1-2), 45–59.
- Abbott, M., Bathurst, J., Cunge, J., O'connell, P. & Rasmussen, J. (1986b), 'An introduction to the european hydrological system—système hydrologique europeen, "she", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system', *Journal of hydrology* **87**(1-2), 61–77.
- Cabík, J., J. K. (1963), *Protierozní ochrana půdy*.
- DeVantier, B. A. & Feldman, A. D. (1993), 'Review of gis applications in hydrologic modeling', *Journal of Water Resources Planning and Management* **119**(2), 246–261.
- Dýrová E. (1984), *Ochrana a organizace povodí. Návody ke komplexnímu projektu a diplomnímu semináři*, SNTL - VUT Brno, Brno, CZ.
- Esteves, M., Faucher, X., Galle, S. & Vauclin, M. (2000), 'Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain: numerical results versus observed values', *Journal of hydrology* **228**(3-4), 265–282.
- Flanagan, D., Elliott, W., Frankenberger, J. & Huang, C. (2010), Wepp model applications for evaluations of best management practices, in 'Paper presented at the 16th Congress of the International Soil Conservation Organization; November 8-12, 2010; Santiago, Chile. 5 p.'
- Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A. & Keefer, T. O. (1991), 'Kinematic routing using finite elements on a triangular irregular network', *Water Resources Research* **27**(6), 995–1003.
- Jain, M. K., Kothyari, U. C. & Raju, K. G. R. (2004), 'A gis based distributed rainfall-runoff model', *Journal of Hydrology* **299**(1-2), 107–135.
- Julien, P. Y., Saghafian, B. & Ogden, F. L. (1995), 'Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff 1', *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **31**(3), 523–536.

- Kazezyilmaz-Alhan, C. M. & Medina, M. A. (2007), 'Kinematic and diffusion waves: Analytical and numerical solutions to overland and channel flow', *Journal of Hydraulic Engineering* **133**(2), 217–228.
- MacArthur, R. & DeVries, J. J. (1993), Introduction and application of kinematic wave routing techniques using hec-1., Technical report, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER DAVIS CA.
- Mihalikova, M., Matula, S. & DOLEŽAL, F. (2013), 'Hyprescz–database of soil hydrophysical properties in the czech republic.', *Soil & Water Research* **8**(1).
- Miller, J. E. (1984), Basic concepts of kinematic-wave models, Technical report.
- Molnar, D. & Julien, P. (2000), 'Grid-size effects on surface runoff modeling', *Journal of Hydrologic Engineering* **5**(1), 8–16.
- Moramarco, T. & Singh, V. (2002), 'Accuracy of kinematic wave and diffusion wave for spatial-varying rainfall excess over a plane', *Hydrological processes* **16**(17), 3419–3435.
- 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.
- Singh, V. (1994), 'Accuracy of kinematic wave and diffusion wave approximations for space independent flows', *Hydrological Processes* **8**(1), 45–62.
- Sui, D. & Maggio, R. (1999), 'Integrating gis with hydrological modeling: practices, problems, and prospects', *Computers, environment and urban systems* **23**(1), 33–51.
- Taylor, C., Al-Mashidani, G. & Davis, J. (1974), 'A finite element approach to watershed runoff', *Journal of Hydrology* **21**(3), 231–246.
- Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G. & Tóth, G. (2015), 'New generation of hydraulic pedotransfer functions for europe', *European Journal of Soil Science* **66**(1), 226–238.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.12192>
- USDA (2019), *USDA Agricultural Research Service*. Dostupné na <https://swat.tamu.edu/>.

- 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>
- Wösten, J., Lilly, A., Nemes, A. & Bas, C. L. (1999), ‘Development and use of a database of hydraulic properties of european soils’, *Geoderma* **90**(3), 169 – 185.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706198001323>
- Zhang, W. & Cundy, T. W. (1989), ‘Modeling of two-dimensional overland flow’, *Water Resources Research* **25**(9), 2019–2035.