

Cílem této metodiky je seznámit čtenáře s výhodami fyzikálně založeného epizodního modelování oproti dlouhodobému přístupu na bázi USLE a podrobně mu představit a usnadnit využití jednoho konkrétního nástroje modelu EROSION-3D. Po přečtení metodiky by měl čtenář:

- Umět rozhodnout kdy a proč využít epizodní model oproti dlouhodobému
- Znat podrobně model EROSION-3D, jeho principy, výhody a limity jeho využití
- Umět sestavit model EROSION-3D včetně získání vstupních parametrů
- Umět získat či odvodit data potřebná k sestavení modelu
- Umět analyzovat a interpretovat výsledky modelu

Čtenář bude proveden celým postupem sestavení a vyhodnocení modelu jak teoreticky, tak prakticky na základě jednoduché případové studie.

ISBN 978-80-88323-63-1



9 788088 323631

Využití matematického simulačního modelu EROSION-3D pro posuzování erozní ohroženosti a navrhování ochranných opatření

Beitlerová, Devátý a kol.

METODIKA

## Využití matematického simulačního modelu EROSION-3D pro posuzování erozní ohroženosti a navrhování ochranných opatření

H. Beitlerová, J. Devátý, M. Stehlík, J. Lenz a  
kol.  
2021



Výzkumný ústav meliorací  
a ochrany půdy, v.v.i.



ČVUT  
ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

SWECO 

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

České vysoké učení technické v Praze

Sweco Hydroprojekt a.s.

**Využití matematického simulačního modelu  
EROSION-3D pro posuzování erozní  
ohroženosti a navrhování ochranných opatření**

Metodika

Hana Beitlerová, Jan Devátý, Martin Stehlík, Jonas Lenz, Jiří Kapička, Tomáš Dostál, Martin Pavel, Daniel Žížala, Robert Minařík, Anna Juřicová, Kateřina Zelenková

Praha 2021

## **Dedikace**

Metodika vznikla jako výstup projektu NAZV QK1810341 " Vytvoření národní databáze parametrů matematického simulačního modelu Erosion-3D a jeho standardizace pro rutinní využití v podmínkách ČR" řešeného v letech 2018–2021.

Metodika byla certifikována Státním pozemkovým úřadem Odborem půdní služby pod číslem č. 7/2021/SPU/O.

## **Oponenti**

Ing. Zuzana Némethová, Ph.D., Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Katedra vodného hospodárstva krajiny

Ing. František Pavlík, Ph.D., Státní pozemkový úřad, Odbor půdní služby

## **Autorský kolektiv**

Mgr. Hana Beitlerová<sup>1</sup>, Ing. Jan Devátý Ph.D.<sup>2</sup>, Mgr. Martin Stehlík<sup>3</sup>, M. Sc. Jonas Lenz, Ing. Jiří Kapička<sup>1</sup>, Doc. Dr. Ing. Tomáš Dostál<sup>2</sup>, Ing. Martin Pavel<sup>3</sup>, Mgr. Daniel Žížala Ph.D. <sup>1</sup>, Mgr. Robert Minařík<sup>1</sup>, Mgr. Anna Juřicová<sup>1</sup>, Mgr. Věra Váňová<sup>1</sup>, Mgr. Kateřina Zelenková<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Oddělení půdní služby

<sup>2</sup> České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

<sup>3</sup> Sweco Hydroprojekt a.s.

<sup>4</sup> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Německo, Sasko

<b>Editor</b>	Mgr. Hana Beitlerová
<b>Rok vydání</b>	2021
<b>Vydání</b>	1. vydání
<b>Vydal</b>	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
<b>Tisk</b>	Powerprint s.r.o., Praha 6 - Suchbát
<b>Náklad</b>	100 ks
<b>ISBN (tisk)</b>	978-80-88323-63-1
<b>ISBN (pdf)</b>	978-80-88323-64-8

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>6</b>
<b>Cíle metodiky</b>	<b>9</b>
<b>Vlastní popis metodiky</b>	<b>11</b>
<b><i>1.1 Přístupy k modelování vodní eroze</i></b>	<b><i>11</i></b>
<b><i>1.2 EROSION-3D</i></b>	<b><i>16</i></b>
Historie a vývoj modelu	16
Oblasti využití modelu	17
Teoretický základ	18
Základní přehled sestavení modelu	22
<b><i>1.3 Vstupní datové sady a jejich příprava</i></b>	<b><i>26</i></b>
Vytvoření časové řady srážek	26
Vytvoření datové sady reliéfu	29
Digitální model terénu	29
Uzávěrový profil	31
Vytvoření datové sady půdy	34
Vrstva parametrizačních ploch	37
Tabulka parametrů	39
Propojující tabulka	40
Vstupní parametry datové sady půdy	41
Zrnitost půdy	42
Objemová hmotnost půdy	45
Obsah organického uhlíku	47
Počáteční vlhkost půdy	49
Drsnost půdy	52
Vegetační kryt	54
Skinfaktor	55
Erodibilita	57
Nástroje E3D+GIS pro přípravu vstupních datasetů	58
Pracovní postup sestavení vstupních datasetů	61
Doplňkové nástroje pro přípravu vstupů	71
<b><i>1.4 Výsledky a jejich interpretace</i></b>	<b><i>72</i></b>
Interpretace výsledků	79
Nástroje E3D+GIS pro zpracování výsledků	87
<b><i>1.5 Případová studie</i></b>	<b><i>89</i></b>
Příprava datové sady reliéfu	91
Tvorba DMT a datové sady reliéfu	91

Vrstva uzávěrových profilů	93
<b>Příprava datového souboru půd</b>	<b>94</b>
Vrstva využití ploch	94
Vrstva půdních vlastností	95
Odvození vstupních parametrů	97
Vstupní soubory datové sady půd	99
Datová sada půd	101
<b>Příprava srážkových řad</b>	<b>101</b>
<b>Spuštění modelu</b>	<b>103</b>
<b>Výsledky a jejich interpretace</b>	<b>103</b>
Transport materiálu při srážce N10 – kvalitativní posouzení	104
Eroze/depozice v povodí při srážce N10 – kvalitativní posouzení	107
Tabelární výsledky – kvantifikace v uzávěrových profilech	110
Porovnání N10 a N50 pro scénář 4 – svodný průleh	113
<b>Srovnání „novosti postupů“</b>	<b>115</b>
<b>Popis uplatnění metodiky</b>	<b>116</b>
<b>Ekonomické aspekty</b>	<b>117</b>
<b>Seznam použité související literatury</b>	<b>118</b>
<b>Seznam publikací, které předcházejí metodice</b>	<b>121</b>

# ÚVOD

---

Matematický simulační model EROSION-3D je typickým příkladem inženýrsky (tedy pro praktické využití) orientovaného, plně distribuovaného epizodního fyzikálně založeného matematického simulačního modelu srážko-odtokových vztahů, erozních a transportních procesů. Model byl odvozen v podmínkách sousedního Saska a klimatické, půdní i morfologické podmínky jeho vzniku jsou tedy velmi podobné jako naše.

Významným posunem zmíněného matematického modelu oproti stávající, běžně využívané metodě Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE), která je pro naše podmínky považována za standard, je zejména to, že model E3D je fyzikálně založený (matematické vztahy popisují průběh fyzikálních procesů, ke kterým dochází a nejsou odvozeny na základě statistické analýzy velkého souboru experimentálních dat) a epizodní (model pracuje v krátkém časovém kroku a popisuje reakci území na konkrétní návrhovou srážku proměnné intenzity).

Tento přístup je zcela zásadní v případě, kdy cílem návrhu protierozních opatření je ochrana před vedlejšími efekty eroze a transportu splavenin (tedy zejména ochrana infrastruktury a vodních útvarů). Při dimenzování zejména technických protierozních opatření je tak nezbytné pracovat s dobou opakování příčinné srážky a navrhovat ochranu na určitý požadovaný stupeň bezpečnosti. V kontinuálním přístupu, aplikovaném v rámci USLE toto není možné.

Dosavadní základní slabinou pro rutinní využití modelu EROSION- 3D byla zejména nedostatečná kompatibilita datových zdrojů

mezi standardy SRN, kde byl model vyvinut a podmínkami ČR a to zejména v oblasti půdních map a databází půdních parametrů. Ukončený projekt NAZV a z něho vycházející Metodika tento problém odstraňuje vytvořením konverzních nástrojů pro přípravu vstupních dat, které umožní aplikaci modelu EROSION-3D se stejným komfortem a spolehlivostí jako je tomu v SRN.

Kromě nepochybného zásadního posunu vpřed a možnosti širšího rutinního uplatnění fyzikálně založeného epizodního přístupu v posuzování erozní ohroženosti, který EROSION-3D představuje, je ale třeba zmínit i slabiny nebo rizika jeho aplikace:

Pozitiva:

- Umožnění zahrnutí časově proměnné návrhové srážky
- Možnost práce s dobou opakování návrhové srážky a tedy i stupněm zabezpečení návrhu
- Mnohem spolehlivější a efektivnější navrhování a dimenzování prvků i systémů technických protierozních opatření
- Fyzikálně založený přístup, zajišťující konstantní spolehlivost metody v rámci mezí platnosti využitých rovnic a fyzikálních zákonů

Slabiny, které je třeba při aplikaci nástroje mít na paměti:

- Nejasné ukotvení v české legislativě pro stanovení erozní ohroženosti zemědělské půdy
- Problematická konfrontace se zavedeným konceptem hodnot přípustné ztráty půdy

Model EROSION-3D tak představuje významný kvalitativní krok vpřed v rámci navrhování protierozních opatření v našich podmínkách. Nelze sice počítat s tím, že by v blízké době tento model plně nahradil dosavadní standard USLE, nicméně tam, kde má epizodní a fyzikálně založený přístup své opodstatnění, si tento velmi kvalitní a moderní nástroj jistě najde své místo a umožní přesnější dimenzování ochranných opatření.

# CÍLE METODIKY

---

Vodní eroze je jednou z nejzávažnějších degradací zemědělské půdy, při které dochází k redistribuci či definitivní ztrátě ornice a v ní přítomných živin, ke kontaminaci okolního životního prostředí půdními částicemi a navázanými znečišťujícími látkami, ke škodám na zemědělských plodinách i na majetku. Silným nástrojem pro snižování rizika vzniku erozních událostí je matematické modelování. Ačkoliv jsou erozní události a vodní eroze vázány na konkrétní srážkovou událost (a jedná se tedy o jev epizodní), je v modelářské praxi silně zakotveno modelování dlouhodobé, na bázi USLE, která udává průměrnou dlouhodobou ztrátu půdy vodní erozí. Epizodní fyzikálně založené modely, které mnohem lépe vystihují proces eroze, jsou využívány minimálně, především pro jejich složitější sestavení a větší nárok na vstupní data, která nejsou často snadno dostupná. V rámci projektu NAZV QK1810341 vznikla sada podpůrných nástrojů umožňujících rutinní využití jednoho z nejpoužívanějších fyzikálně založených modelů EROSION-3D.

Cílem této metodiky je seznámit čtenáře s výhodami fyzikálně založeného epizodního modelování oproti dlouhodobému přístupu na bázi USLE a podrobně mu představit a usnadnit využití jednoho konkrétního nástroje – modelu EROSION-3D. Po přečtení metodiky by měl čtenář:

- Umět rozhodnout kdy a proč využít epizodní model oproti dlouhodobému

- Znat' podrobně model EROSION-3D, jeho principy a teoretický základ, výhody a limity jeho využití
- Umět sestavit model EROSION-3D včetně získání vstupních parametrů a různých možností nastavení
- Umět získat či odvodit data potřebná k sestavení modelu
- Umět analyzovat a interpretovat výsledky modelu

Čtenář bude proveden celým postupem sestavení a vyhodnocení modelu jak teoreticky, tak prakticky na základě jednoduché případové studie.

# VLASTNÍ POPIS METODIKY

---

## I.1 PŘÍSTUPY K MODELOVÁNÍ VODNÍ EROZE

---

Vodní eroze je epizodní jev, kdy v důsledku srážkové události dochází působením dopadajících dešťových kapek a povrchového odtoku k rozrušení, transportu a depozici půdních částic. Vodní eroze závisí na srážce (její intenzitě a objemu, době trvání a kinetické energii), na morfologii, půdních a vegetačních podmínkách lokality a na aplikovaných půdoochranných praktikách. Negativními dopady vodní eroze jsou škody na zemědělské půdě – ztráta ornice, transport a depozice do jiných lokalit, škody na infrastruktuře a majetku – zanášení, zaplavení, poškození a škody na vodních zdrojích – zanášení, kontaminace, eutrofizace. Ochranná opatření proti vodní erozi jsou trojího typu. Organizační opatření spočívají ve vhodné konfiguraci zemědělských pozemků (velikost, tvar dílů půdních bloků), díky níž zamezíme či omezíme vznik eroze a transport materiálu. Agrotechnická opatření spočívají ve vhodné volbě pěstovaných plodin (vyloučení erozně nebezpečných plodin, použití meziplodin, ...) a použitých technologií obhospodařování půdy (orba po vrstevnici, bezorebné setí, mulčování, ...). Technická opatření spočívají v budování ochranných objektů, jako např. příkopy, meze, poldry, průlehy.

Efektivním nástrojem pro posouzení náchylnosti lokality ke vzniku vodní eroze a návrhu protierozních opatření je matematické modelování. To lze rozdělit na základě několika kritérií – časové (epizodní vs. dlouhodobé) a prostorové (2D – linie, 3D – svah, pozemek, malé, velké

povodí) měřítko, popis procesu (fyzikálně založený či empirický), popis území (celistvě či distribuovaně).

V praxi se využívají především dva typy modelů:

- empiricky založené dlouhodobé modely (modely na bázi USLE)
- fyzikálně založené epizodní modely

Nejrozšířenějším modelem, celosvětově i v Česku je tzv. USLE (universal soil loss equation) (Wischmeier a Smith 1978). Jedná se o číste empirický model odvozený na základě měření eroze na tzv. jednotkovém pozemku. Jeho přednostmi je:

- Jednoduchost – násobení šesti parametrů
- Dlouhodobá tradice a široké rozšíření – jedná se nejpoužívanější model na světě, se kterým mají odborníci dlouhodobé zkušenosti.
- Existují doporučené oficiální metodiky
- Existují pro ni katalogy doporučených hodnot, celorepublikové vrstvy všech vstupních parametrů.
- Je na ní postavená legislativa ČR (DZES, protierozní vyhláška)

Tento model má ovšem řadu zásadních nevýhod:

- Jedná o dlouhodobý model – popisuje dlouhodobou průměrnou ztrátu půdy. Nepopisuje epizodu, nelze na základě ní posoudit konkrétní srážkovou a erozní událost či navrhovat ochranu na určitou dobu opakování (návrhové srážky).
- Chybějící konektivita erozního procesu – popisuje pouze erozi, ale již se nedozvíme nic o transportu a sedimentaci. Nevíme, kolik materiálu se usadí níže na zemědělském pozemku, kolik se odplaví do intravilánu, do toků, kde se materiál opět usadí. K tomu je nutné využít navazujících modelů, např. WATEM/SEDEM.
- Nepopisuje soustředěný odtok. Správně by se USLE měla používat pouze pro plošnou erozi, nikoliv však v údolnicích, kde je eroze nejsilnější. Chybně se však zde tato metoda používá.

Na opačném spektru erozních modelů se nachází epizodní fyzikálně založené modely. Ty eliminují nevýhody metody USLE:

- Popisují epizodu, tedy je možné s nimi posoudit konkrétní erozní událost, navrhovat opatření na návrhové srážky.
- Konektivita erozního procesu – popisují proces eroze na základě známých fyzikálních zákonů, je možné s nimi počítat kromě eroze i transport a depozici. Navíc jsou schopny počítat i v dráhách soustředěného odtoku. Informují nás tedy o plné konektivitě erozního procesu – odkud, kudy a kam je materiál transportován.

Naopak co bylo u modelu USLE výhodou, je u epizodních modelů nevýhodou:

- Menší rozšířenost, roztržitost – epizodní modely se používají obecně méně a existuje jich celá řada. Není tedy jeden tradičně ukotvený model, který by byl celosvětově využíván.
- Složitější použití – větší náročnost na obsluhu modelu, větší nároky na znalosti uživatelů modelu.
- Dostupnost vstupních dat – vstupní parametry jsou často nedostupné, či je nutné je náročně odvodit, odhadnout aj.

Tato metodika si klade za cíl překlenout zmíněné nevýhody fyzikálně založených epizodních modelů a připravit jeden konkrétní nástroj – EROSION-3D k rutinnímu využívání v projekční praxi.

Oba druhy modelování, empiricky založené dlouhodobé i fyzikálně založené epizodní mají v ochraně proti erozi své místo a navzájem se doplňují.

Empirické dlouhodobé modelování založené na metodě USLE dokáže odpovědět na otázky:

- Je/není lokalita obecně náchylná k erozi?
- Splňuje lokalita českou legislativu ochrany proti vodní erozi?

Naproti tomu fyzikálně založené epizodní modely dokáží odpovědět na otázky:

- Kdy nastane problém – při jaké kombinaci roční doba – plodina, při jaké srážce?
- Jaká zavést protierozní opatření, aby byla lokalita chráněná na určitou dobu opakování (návrhovou srážku)?
- Jak dimenzovat technická protierozní opatření na návrhové srážky?
- Jaké objekty jsou erozí ohroženy?

## I.2 EROSION-3D

---

### HISTORIE A VÝVOJ MODELU

---

Model EROSION-3D je kontinuálně vyvíjen od roku 1991 na Technické univerzitě báňské ve Freibergu (Sasko, Německo) na oddělení ochrany půdy a vody (Schmidt 1991; Von Werner 1995; Michael et al. 1996; Schmidt 1996) za účelem vytvořit jednoduchý nástroj pro výpočet eroze půdy. Jedná se o fyzikálně založený epizodní model, který simuluje vznik povrchového odtoku, odnos, transport a depozici půdních částic během jedné erozní události. Model je vhodný pro simulaci malých a středně velkých povodí s vysokým prostorovým rozlišením (od velikosti pixelu 1m, vhodné 3 – 10 m) i časovým rozlišením (výpočetní krok od 1 min, vhodné 5 – 10 min).

EROSION-3D je zakotven v Metodice ochrany půdy proti vodní erozi (Janeček et al. 2012). Jedná se o jeden z nejpoužívanějších fyzikálně založených modelů pro simulaci vodní eroze v ČR. Vzhledem k jeho již silně zakotvené pozici v české modelářské praxi je model dále rozvíjen speciálně pro potřeby českých uživatelů. Model je pro území ČR kalibrován na základě obsáhlé databáze experimentů se simulátorem deště (Beitlerová et al. 2021a; Devátý 2021). Pro usnadnění jeho použití byly vytvořeny mapy vstupních parametrů (Žížala et al. 2020; Beitlerová et al. 2021b; 2021c) a nástroj E3D+GIS pro poloautomatické sestavení tabulky vstupních parametrů (Caha a Devátý 2021). Dále bylo vytvořeno uživatelské rozhraní (součást instalace programu) a manuál modelu v českém jazyce (von Werner 2021). Pro české uživatele modelu byla vytvořena internetová stránka <https://runoffdb.fsv.cvut.cz>, kde jsou uvedené zdroje ke stažení.

## OBLASTI VYUŽITÍ MODELU

Hlavní výhodou modelu je jeho univerzální použití pro většinu běžně řešených úloh spojených s vodní erozí. Model je vhodný pro použití na malých a středně velkých povodích a je schopen modelovat ve velkém prostorovém i časovém detailu. Hlavní oblasti jeho využití jsou:

- Identifikace zdrojových lokalit eroze půdy
- Identifikace sedimentačních ploch
- Předpověď množství ztráty půdy na zemědělské půdě
- Odhad vstupu sedimentu do vodních toků
- Simulace povrchového odtoku způsobeného srážkou

Proto je vhodné používat EROSION-3D k následujícím úlohám:

- Hodnocení proběhlých erozních událostí
- Identifikace problematických lokalit z hlediska vodní eroze
- Identifikace plošných zdrojů znečištění vodních toků
- Návrhy ochrany proti vodní erozi na návrhové srážky
- Návrhy a hodnocení vlivu změny využití půdy na vodní erozi
- Návrhy a hodnocení vlivu změny agrotechnik na vodní erozi
- Návrhy a hodnocení vlivu technických protierozních opatření
- Návrhy a hodnocení ochrany vodních ploch před zanášením

EROSION-3D disponuje několika rozšiřujícími moduly. Metodika se týká pouze použití základního modelu, pro úplnost zde uvádíme výčet jednotlivých rozšiřujících modulů, které je možno dokoupit.

Každý modul má vlastní manuál v anglickém, zvýrazněné moduly pak i v českém jazyce:

- **Modul pro simulaci dlouhodobé eroze**
- Modul pro simulaci eroze ze sněhu
- Modul pro simulaci vlivu vodních nádrží
- **Modul pro simulaci infiltrace do půdy složené z více horizontů**

---

## TEORETICKÝ ZÁKLAD

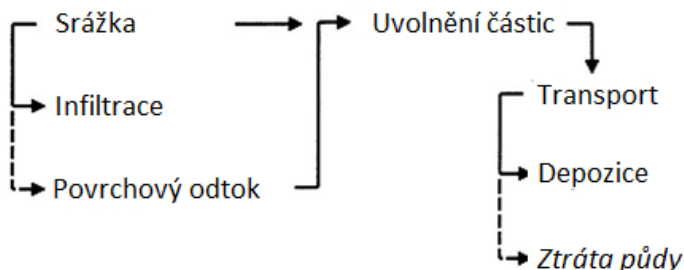
---

Teoretický základ modelu byl vyvinut Jürgenem Schmidtem (1991, 1996) a později rozšířen Michaellem von Wernerem (Von Werner 1995). Parametrizací modelu se zabývala Anne Michael (1996; 2000). Jedná se o epizodní model, který počítá odtok a erozi v povodí v pravidelném čtvercovém rastru v konstantních časových krocích. Vstupní parametry mohou být zadávány plně distribuovaně nebo na základě definice malých prostorově homogenních ploch.

Model sestává ze dvou submodelů – infiltračního a erozního. Nejprve je infiltračním submodelem vypočtena infiltrace, resp. efektivní srážka a její distribuce povodím (povrchový odtok). Následuje erozní submodel, který na základě výstupů z infiltračního submodelu počítá rozvolnění půdních částic, jejich transport a usazení (Obr. 1).

*Infiltrační submodel*  
(metoda Green-Ampt)

*Erozní submodel*  
(metoda tečného napětí)

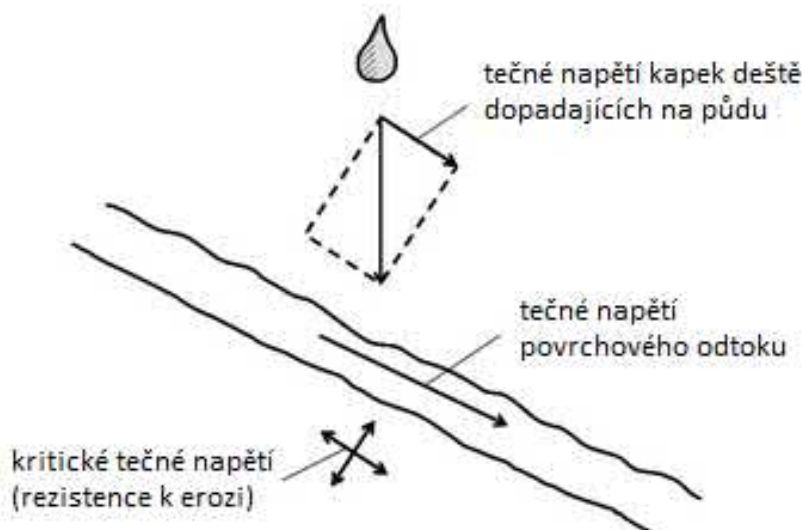


Obr. 1: Koncepční schéma modelu EROSION-3D (Michael et al. 1996)

Infiltrační submodel je založen na přístupu Green and Ampt, který zjednodušuje infiltrační proces vody do půdy zavedením předpokladu, že se jedná o homogenní půdní matici, skrze kterou voda infiltruje rovnoměrně a zaplňuje veškerou kapacitu pórů. Matematicky je infiltrační proces popsán dvěma komponentami, a to gravitační komponentou a dynamickou komponentou půdní matrice. Parametry modelu Green and Ampt jsou počítány pomocí pedotransferových funkcí (nasyčená hydraulická vodivost dle Campbell (1985a), sací tlak na čele zvlhčení dle (van Genuchten 1980). Vzhledem ke zjednodušujícímu přístupu výpočtu infiltrace do půdy je třeba zavést kalibrační parametr, který zohlední procesy nepopsané matematickými rovnicemi, jako je kompakce, krusta, trhliny a preferenční cesty v půdě aj. Model EROSION-3D zavádí vstupní parametr *Skinfaktor*, který upravuje nasycenou hydraulickou vodivost dle jednoduchého vzorce  $K_s = K_{sat} * \text{skinfaktor}$ . ( $K_s$  – upravená nasycená hydraulická vodivost,  $K_{sat}$  – nasycená hydraulická vodivost vypočtená pedotransferovou funkcí). Detailní popis

infiltračního submodelu včetně všech rovnic je publikován v německém jazyce (Schmidt 1996), stručněji v anglickém jazyce (Beitlerová et al. 2021a).

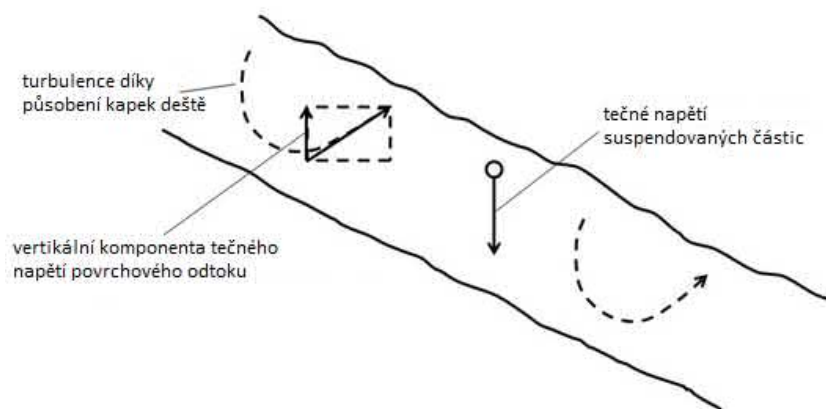
Teoretický koncept erozního modelu vychází z bilance tečných napětí působících na částice půdního povrchu. Eroze nastává, pokud je součet mobilizujících sil větší než součet sil poutajících částici k povrchu. Do erozních sil je zahrnuta hybnost vodního proudu povrchového odtoku a složka hybnosti dopadajících dešťových kapek tečná k povrchu půdy. Síly adhezní, kohezní a gravitační brání částici v pohybu a jsou souhrnně v modelu reprezentovány parametrem *Erodibilita* (Obr. 2).



Obr. 2: Princip uvolnění půdních částic – přístup tečného napětí

Aby mohly být uvolněné částice transportovány, musí proti gravitační síle unášené půdní částice působit vertikální (turbulentní) složka odtoku (Obr. 3). Vzhledem k tomu, že povrchový odtok je

většinou tvořen vrstvou tenkou zlomek milimetru až maximálně několik centimetrů, je turbulence působena především dopadajícími kapkami deště, nikoliv třecími silami uvnitř vodního sloupce. Bez deště tak dochází pouze k pomalému posunu půdních částic smýkáním po půdním povrchu, nikoliv k transportu v suspenzi, který je mnohem efektivnější.



Obr. 3: Transport půdních částic – přístup tečného napětí

Po výpočtu uvolnění a schopnosti transportu částic povrchovým tokem model určí, kudy jsou voda a sediment transportovány z horních partií povodí k uzávěrovému profilu. Model nejprve spočítá sklon a expozici každého pixelu povodí, potom identifikuje všechny sousední buňky s nižší nadmořskou výškou. Následně dojde k distribuci odtoku, a to dle zvolené metody; buď všechna voda do buňky s nejnižší nadmořskou výškou, nebo proporčně dle výškového rozdílu do všech buněk s nižší nadmořskou výškou. U plošného povrchového odtoku se doporučuje používat proporční algoritmus reprezentující mnohem

věrohodněji přírodní podmínky. Opačně je tomu u soustředěného odtoku, kde voda teče vždy do nejnižšího bodu. Buňky v nichž dochází k soustředěnému odtoku jsou určeny buď na základě prahové hodnoty zdrojové plochy odtoku v buňce, nebo jsou definovány rastrovým datose-tem zvoleným uživatelem. Celkový odtok je tvořen superpozicí od- toku plošného a soustředěného. Plošný odtok je počítán ve všech buň- kách modelované plochy a v buňkách soustředěného odtoku již dále pokračuje pouze předurčenou odtokovou drahou. Oba způsoby smě- řování pak mohou být uživatelem upraveny editací příslušných rastrů v datové sadě reliéfu (nedoporučuje se) nebo pomocí tzv. externích smě- řů odtoku, které jsou uživatelem poskytnuty při vytváření datové sady reliéfu. Detailní popis erozního včetně všech rovnic je publikován v ně- meckém jazyce v (Schmidt 1996).

---

## **ZÁKLADNÍ PŘEHLED SESTAVENÍ MODELU**

---

V této kapitole je uveden stručný přehled všech datových sad, které je třeba vytvořit pro sestavení modelu a které jsou naopak výstupem modelu.

Vstupní datové soubory modelu:

- Datová sada reliéfu
- Datová sada půd
- Časová řada srážek

Datová sada je složka rastrových a tabulkových souborů, které jsou vytvořeny modelem EROSION-3D na základě uživatelem zadaných vstupů. Pro datovou sadu reliéfu je vstupem digitální model terénu, volitelně vrstva uzávěrových profilů a vrstva toků. Pro datovou sadu půd je vstupem (a) vrstva parametrizačních ploch, tabulka vstupních

parametrů modelu a tabulka pro propojení vrstvy parametrizačních ploch a tabulky parametrů, nebo (b) sada rastrových vrstev vstupních parametrů. Pro datovou sadu srážek je třeba textový soubor s časovou řadou/ časovými řadami srážky a případně vrstva definující prostorovou příslušnost jednotlivých časových řad.

Vstupní parametry modelu:

- Zrnitost půdy
- Objemová hmotnost
- Obsah organického uhlíku
- Počáteční vlhkost
- Drsnost
- Vegetační kryt půdy
- Kalibrační parametr skinfaktor
- Kalibrační parametr erodibilita

Výsledky modelu:

- Eroze/depozice
- Povrchový odtok
- Objem sedimentu
- Koncentrace sedimentu
- Zrnostní složení transportovaného sedimentu
- Čistá eroze

Výsledky jsou generovány v rastrové podobě. V případě, že uživatel zadal vrstvy uzávěrových profilů, jsou též generovány tabelárně pro každý uzávěrový profil, a to pro každý časový krok.

Rastrové výstupy jsou generovány volitelně buď pouze v sumě za celou událost, nebo pro každý časový krok.

**POZOR:**

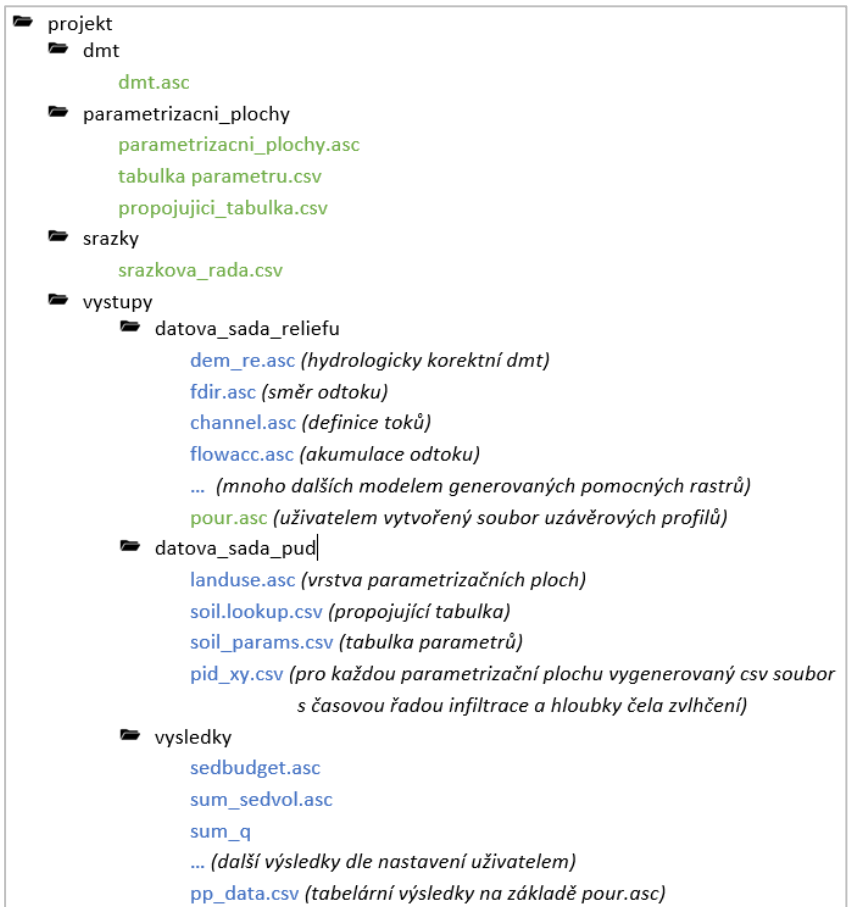
Veškeré vstupní rastry jsou zadávány ve formátu ASCII. Je nutné dodržet 2 pravidla:

- 1) Desetinným oddělovačem je tečka.
- 2) Musí být dodržena jednotná prostorová definice všech rastrů, tedy prostorové rozlišení, počet sloupců a řádků a souřadnice.

Nejsou-li tato pravidla dodržena, model vygeneruje chybové hlášení. Tyto chyby se dají jednoduše identifikovat zobrazením rastrů v textovém editoru. Hlavička všech rastrů musí vypadat vždy jednotně, např.:

```
ncols      650
nrows      513
xllcorner  -835727.53
yllcorner  -1110457.45
cellsize   3
NODATA_value -9999
```

Struktura projektu v EROSION-3D je přehledně zobrazena na Obr. 4. Zelenou barvou jsou zobrazeny uživatelem vytvořené vstupní soubory, modrou barvou výstupní.



Obr. 4: Struktura projektu v EROSION-3D s přehledem všech vstupních (zelená) a výstupních (modrá) souborů.

## I.3 VSTUPNÍ DATOVÉ SADY A JEJICH PŘÍPRAVA

### VYTVOŘENÍ ČASOVÉ ŘADY SRÁŽEK

#### *Struktura vstupního srážkového souboru*

Srážková řada může být zadána jedna nebo více na povodí. V případě více srážkových řad musí být definován rastr se zónami jednotlivých srážkových řad.

Soubor s časovou řadou srážek je zadán ve formátu \*.csv a má přesně danou strukturu. Prvních 5 řádek tvoří identifikace srážkových řad. Obsah těchto řádek není pro samotné modelování důležitý, ale musí být přítomen v dané formě. První řádek tvoří ID srážkové řady. ID začíná číslem 0 a postupně stoupá (0, 1, 2, ...). Pro každé ID zóny v rastru musí ve srážkovém souboru existovat odpovídající ID srážkové řady. Ve druhém řádku je udána nadmořská výška meteorologické stanice, ve třetím a čtvrtém řádku jsou zadány souřadnice x a y meteorologických stanic, v pátém řádku je zadán název meteorologické stanice. Šestá řádkem začínají samotná srážková data, kde se zadává časový údaj každého kroku (datum a čas) a hodnota srážky. Hodnota srážky se udává v minutové intenzitě. Sloupce souboru jsou odděleny čárkou, desetinná místa se zapisují s desetinnou tečkou.

Struktura datového souboru:

R, M, D, H, M, ID1, ID2

R, M, D, H, M, nadm. výška1, nadm. výška2

R, M, D, H, M, souřadnice x 1. souřadnice x 2

R, M, D, H, M, souřadnice y 1. souřadnice y 2

R, M, D, H, M, jméno1, jméno2

Rok, měsíc, den, hodina, minuta, data1, data2

**TIPY:**

- Není-li pro vás důležitá identifikace meteorologické stanice v souboru srážek a modelujete-li pouze jednu srážku, stačí zadat do prvních 5 řádků jednotně: R, M, D, H, M, 0 (viz Obr. 48).
- Příklad: Je-li váš časový krok 10 minut, během jednoho kroku spadne 10 mm, do řádku daného kroku se zapíše minutová intenzita 1 mm.
- Sloupce souboru jsou odděleny čárkou, desetinná místa číselných hodnot se zapisují s desetinnou tečkou.
- Použití více srážkových řad může reprezentovat více srážkoměrných stanic, pokud existují pro modelované území, ale mohou být využity i pro simulaci přechodu srážky přes modelované území.

### Zdroje srážkových řad

Pro hodnocení erozních událostí, kde je třeba znát reálnou srážku a její časový průběh lze využít následující zdroje dat:

- Meteorologické stanice ČHMÚ
- Amatérské či institucionální meteorologické stanice např. [www.amet.cz](http://www.amet.cz), [weathercloud.net](http://weathercloud.net), [www.wunderground.com](http://www.wunderground.com)
- Radarová data

Pro navrhování a dimenzování protierozních opatření, kde je třeba využít návrhové srážky lze využít následující zdroje dat:

- Šestihodinové návrhové srážky na povodí IV. řádu dostupné ve webové aplikaci <https://rain.fsv.cvut.cz> (Kavka et al. 2018a)
- Nástroj DES-RAIN k výpočtu návrhových srážek s různou dobou trvání <http://r.fzp.czu.cz/vyzkum/software.html> (Vaššová a Kovář 2011)
- Nástroj DES-RAIN-VARIABLE k výpočtu návrhových srážek s různou dobou trvání a volitelným tvarem srážky <http://r.fzp.czu.cz/vyzkum/software.html> (Kovář et al. 2015)

#### **TIPY:**

- Volba správného tvaru hyetogramu je v modelování eroze půdy klíčová. Eroze vzniká typicky během příválových dešťů s větší intenzitou. Ke zcela jinému výsledku dojdeme, budeme-li modelovat tvar srážky s jedním intenzivním vrcholem, a použijeme-li blokový déšť o stejné délce a objemu, kam objem deště rozložíme rovnoměrně.
- Podobně důležitá je volba časového kroku srážky. Budeme-li modelovat srážku s jedním intenzivním vrcholem, pětiminutový krok vystihne dostatečně podrobně průběh srážky a zohlední erozní účinek deště během nejvyšších intenzit. Při hodinovém časovém kroku dojde ke zprůměrování nejvyšších intenzit s náběhovou a poklesovou větví srážky a erozní účinek deště bude modelem podhodnocen.

---

## VYTVOŘENÍ DATOVÉ SADY RELIÉFU

---

### *Digitální model terénu*

---

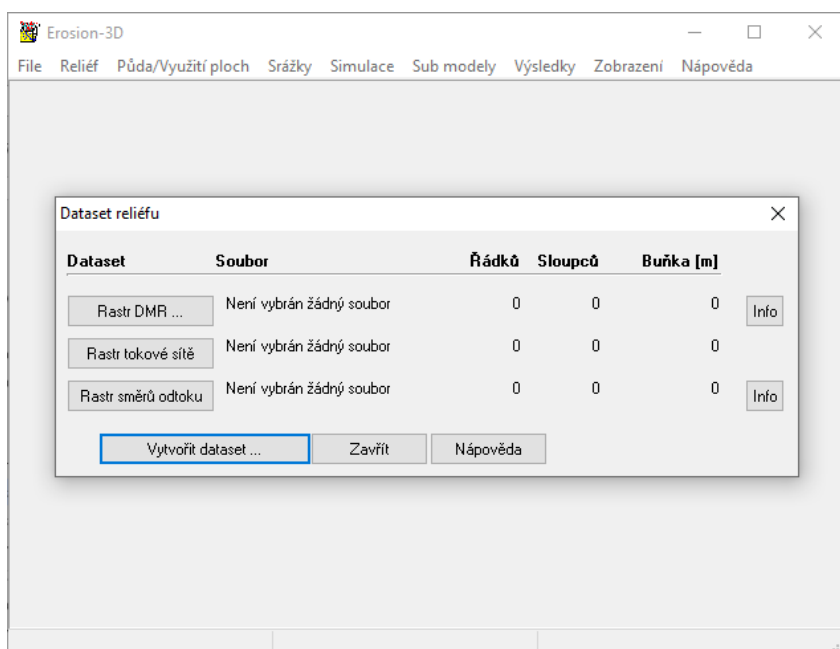
Vstupem pro tvorbu datové sady reliéfu je digitální model terénu. EROSION-3D vyžaduje hydrologicky korektní model terénu. To znamená, že s každou buňkou rastru musí sousedit minimálně jedna buňka s nižší nadmořskou výškou, aby mohla veškerá voda odtékat. EROSION-3D upraví model automaticky v rámci tvorby datové sady reliéfu. Pokud chce mít však uživatel kontrolu nad způsobem, jakým bude hydrologická korektnost ošetřena, je nutné ji zajistit v rámci preprocessingu vrstvy například použitím Arc Hydro Tools a do modelu již vkládat hydrologicky korektní DMT.

Model si nad DMT vygeneruje sadu rastrů potřebných pro výpočet odtoku vody a transportu materiálu. Jedná se o rastry jako je hydrologicky korektní DMT, sklon, akumulace odtoku, vodní tok atd. (více v manuálu modelu von Werner 2021). Způsob, jakým jsou rastry generovány je nastavitelný pod záložkou *Reliéf – Možnosti datasetu reliéfu*. Důležité je nastavení:

- 1) *Směrování odtoku*, kde je možnost nastavit směrování *divergentní* – proporcionálně do všech sousedních buněk s nižší nadmořskou výškou či *jeden soused* - veškerý odtok pouze do sousední buňky s nejnižší nadmořskou výškou. Pro simulaci přirozeného odtoku je vhodné zvolit proporcionální směrování.
- 2) Velikost příspěvkové plochy (*Critical source area*) pro tvorbu toku v záložce *Toková síť*. Velikost musí být nastavena tak, aby model vytvořil reálnou říční síť. Příliš malá plocha vygeneruje

tok již v drahách soustředěného odtoku, které jsou dále vyloučeny z výpočtů plošné eroze/depozice a dojde k velkému zkreslení výsledků.

Samotná datová sada reliéfu se tvoří v *Reliéf – Vytvořit dataset reliéfu*, kde je nahrán *Rastr DMR* – ascii soubor s digitálním modelem reliéfu (Obr. 5). Vstupy *Rastr tokové sítě* a *Rastr směrů odtoku* není nutné zadávat.



Obr. 5: Uživatelské rozhraní pro vytvoření datové sady reliéfu

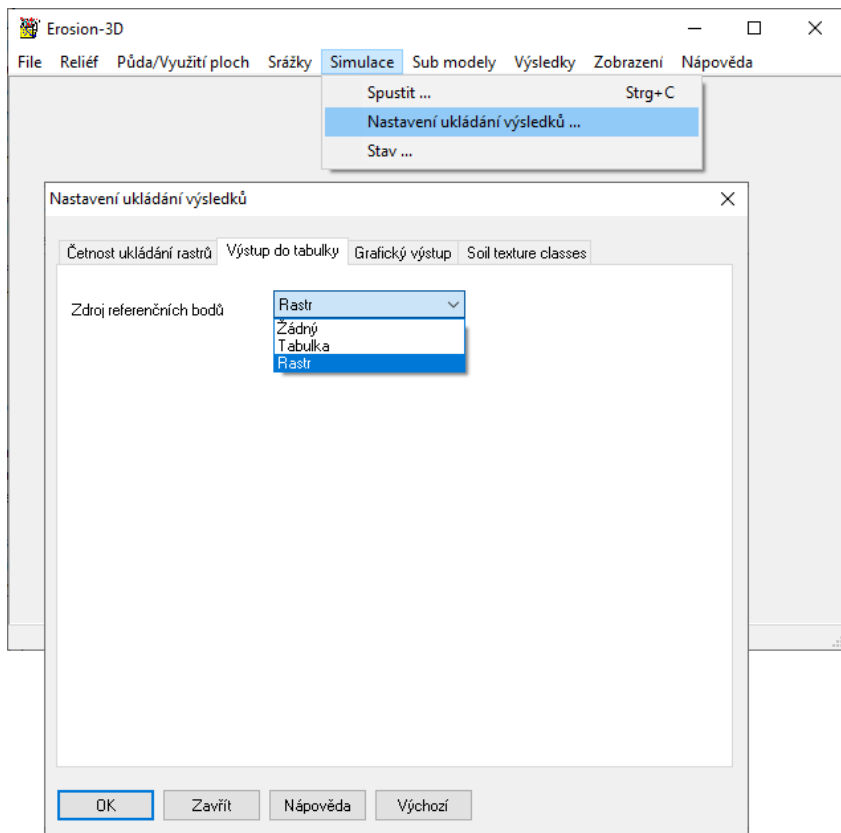
## Zdroje dat digitálního modelu terénu

- Digitální model reliéfu 4. generace v rozlišení 5x5 m (©ČUZK)
- Digitální model reliéfu 5. generace v digitálním tvaru TIN (©ČUZK)
- Uživatelem vytvořený DMT (fotogrammetrie, lidarová data, ...)

## **Uzávěrový profil**

Uzávěrový profil je volitelným prvkem datové sady reliéfu. Vrstva uzávěrových profilů se typicky tvoří, pokud nás kromě plošné informace o erozi/depozici zajímá informace pro soustředěný odtok v konkrétním bodě. Jedná se např. o křížení drah soustředěného odtoku s intravilánem, zaústění údolnic či drah soustředěného odtoku do propustků, vodních toků, vodních nádrží aj. Je-li vrstva vytvořena, jedním z výstupů modelu EROSION-3D je soubor *pp\_data.csv* - tabelární záznam výsledků pro všechny uzávěrové profily za každý časový krok události. Je tedy možné sestavit např. hydrogram či sedimentogram erozní události.

Uzávěrové profily se zadávají v podobě rastru pojmenovaného *pour.asc* (pour point = uzávěrový profil), který je uživatelem manuálně vytvořen a následně vložen do datové sady reliéfu. V jednom rastru může být volitelný počet uzávěrových profilů. Pixely s uzávěrovými profily mají hodnotu ID (1, 2, 3, ...). Všechny ostatní pixely mají hodnotu *NoData*. Pro tvorbu tabelárních výsledků je dále nutné nastavit v modelu *Simulace – Nastavení ukládání výsledků – Zdroj referenčních bodů – Rastr* (Obr. 6).



Obr. 6: Nastavení zdroje polohy záznamových bodů pro tvorbu tabulárních výsledků

Pro dosažení správných výsledků je nezbytné správné umístění uzávěrového profilu. Uzávěrový profil – pixely v rastru *pour.asc* musí být umístěny tam, kde model uvažuje se soustředěným odtokem. Je tedy třeba načíst do GIS z datové sady reliéfu vrstvu *flowacc.asc* (flow accumulation = koncentrace odtoku) a uzávěrové profily umístit přesně do daného pixelu *flowacc.asc*.

**TIPY:**

- Pokud chceme uzávěrový profil umístit do místa, kde není tok koncentrován do jednoho pixelu (např. údolnice), je možné vytvořit uzávěrový profil o šířce více pixelů se stejným ID. Ve výstupním tabelizovaném souboru *pp\_data* je pak nutné pro každý časový krok sečíst hodnoty všech pixelů s jednotným ID.

---

## VYTVOŘENÍ DATOVÉ SADY PŮD

---

Datová sada půd definuje základní parametrizační plochy modelovaného území, tedy elementární plochy s homogenními půdně-vegetačními podmínkami (kombinace využití území a půdních vlastností). Datovou sadu lze vytvořit dvěma způsoby, a to tabelárně, či rastrově. V metodice je popsán tabelární přístup. Pro více informací o rastrovém přístupu použijte manuál modelu (von Werner 2021).

Tabelární přístup vyžaduje 3 vstupní soubory (Obr. 7):

- Vrstva parametrizačních ploch (zón) s unikátním ID pro každý typ parametrizační plochy
- Tabulku parametrů obsahující řádek s parametry pro každou parametrizační plochu
- Tabulku propojení obsahující pár ID – název parametrizační plochy



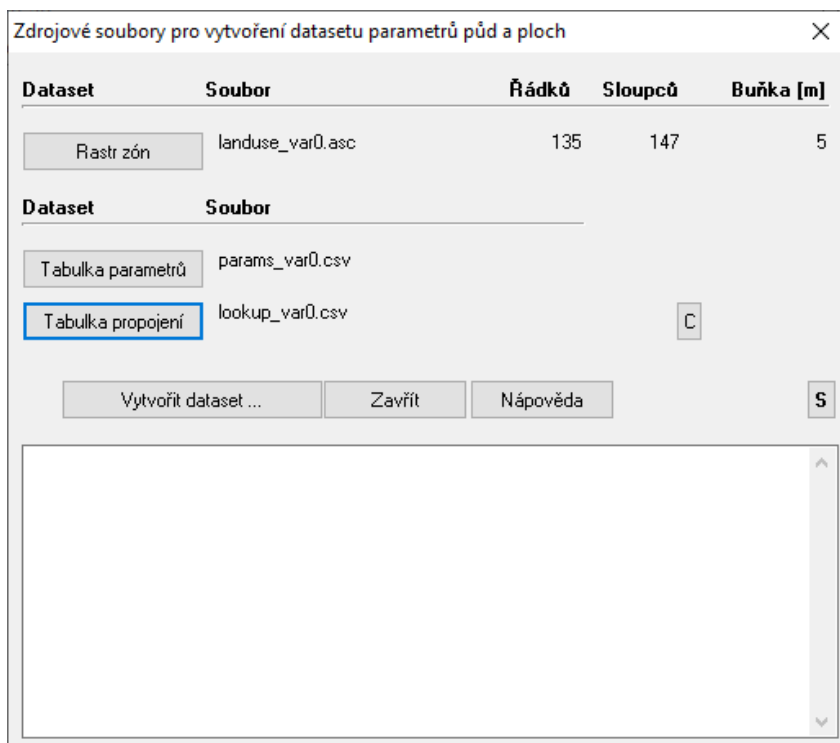
POLY_NR	POLY_ID
11	AZP_Z1
14	AZP_Z4
21	C_Z1
24	C_Z4
31	KP_Z1
34	KP_Z4
41	LP_Z1
44	LP_Z4
<b>51</b>	<b>OP_Z1</b>
54	OP_Z4
61	S_Z1
64	S_Z4
...	...

POLY_ID	LAYER_ID	LAYERTHICK	FT	MT	GT	FU	MU	GU	FS	MS	GS	BLKDENSITY	CORG	INITMOIST	ERODIBIL	ROUGHNESS	COVER
AZP_Z1	0	1000000	0	2	5	4	5	11	26	29	18	2600	2	90	0,1	0,02	100
AZP_Z4	0	1000000	0	12	25	11	16	14	12	6	4	2600	2	90	0,1	0,02	100
C_Z1	0	1000000	0	2	5	4	5	11	26	29	18	1600	1,2	80	0,025	0,3	70
C_Z4	0	1000000	0	12	25	11	16	14	12	6	4	1600	1,7	80	0,025	0,3	70
KP_Z1	0	1000000	0	2	5	4	5	11	26	29	18	1300	1,3	40	0,025	0,4	90
KP_Z4	0	1000000	0	12	25	11	16	14	12	6	4	1300	1,8	40	0,025	0,4	90
LP_Z1	0	1000000	0	2	5	4	5	11	26	29	18	1300	1,4	40	0,03	0,9	100
LP_Z4	0	1000000	0	12	25	11	16	14	12	6	4	1300	1,9	40	0,03	0,9	100
<b>OP_Z1</b>	<b>0</b>	<b>1000000</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>11</b>	<b>26</b>	<b>29</b>	<b>18</b>	<b>1350</b>	<b>1,2</b>	<b>35</b>	<b>0,015</b>	<b>0,1</b>	<b>15</b>
OP_Z4	0	1000000	0	12	25	11	16	14	12	6	4	1320	1,7	35	0,015	0,1	15
S_Z1	0	1000000	0	2	5	4	5	11	26	29	18	1300	1,4	35	0,02	0,4	80
S_Z4	0	1000000	0	12	25	11	16	14	12	6	4	1300	1,9	35	0,02	0,4	80
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Obr. 7: Vztah mezi mapou využití ploch, tabulkou propojení a souborem půdních parametrů

Vstupní soubory je možné připravit manuálně či pomocí nástroje *E3D+GIS*.

Datová sada půd se tvoří v modelu EROSION-3D na záložce *Půda/Využití ploch – Semi-distribovaný dataset půdních parametrů*, kde jsou zadány vstupní soubory a následně je vytvořen dataset.



Obr. 8: Dialogové okno pro tvorbu datové sady půd

---

## ***Vrstva parametrizačních ploch***

---

Podrobnost parametrizačních ploch závisí na vyžadované míře podrobnosti konkrétní modelované úlohy a je zcela na uživateli modelu. Vhodná je však tvorba vrstvy na základě kombinace vrstvy využití území a vrstvy půdních vlastností. Vhodné je tvořit vrstvu parametrizačních ploch ve vektorové podobě, která umožní přípravu vstupních parametrů v tabulce atributů a zároveň využití E3D+GIS. Do modelu EROSION-3D vstupuje jako všechny ostatní vrstvy ve formátu ascii.

V případě manuální parametrizace modelu a tvorby tabulky parametrů je nutné vrstvu parametrizačních ploch kompletně vytvořit uživatelem. V případě využití E3D+GIS stačí připravit zvlášť vrstvu využití území a zvlášť vrstvu půdních vlastností. Rastr parametrizačních ploch a vstupní tabulky ve formátech připravených pro přímé načtení do EROSION-3D jsou výstupem tohoto nástroje.

### *Zdroje dat*

---

#### **Vrstva využití území**

- ZABAGED
- LPIS
- Ortofoto
- Terénní průzkum
- Satelitní snímky Sentinel II

Polygonovou definici ploch podle typu využití je možno získat mnoha způsoby. Uživatelsky nejjednodušší a zároveň pro většinu úloh dostatečné je využití veřejně dostupných datových zdrojů vektorových dat: ZABAGED a LPIS. Vhodnou geometrickou kombinací tematických objektů ZABAGED a zemědělských pozemků LPIS je možné získat

dostatečně reprezentativní vrstvu typů využití ploch pro požadovanou velikost pixelu 3 - 10 m. Uživatel by měl již při vytváření vektorové definice využití ploch myslet na rozlišení rastru, do kterého musí být pro využití v EROSION-3D převeden. Příliš malé prvky se mohou při konverzi ztratit nebo výrazně zmenšit. Podle účelu modelu je možné některé kategorie (např. pozemní komunikace, jako překážku odtoku) uměle zvětšit, aby byla zajištěna jejich správná reprezentace v modelu. Takto vytvořenou vrstvu využití území je možno zpřesnit úpravami nad leteckými snímky či na základě terénního průzkumu. U orné půdy je důležité rozlišení pěstovaných plodin, případně aplikovaných agrotechnických opatření. Pro úlohy modelující stav při konkrétní erozní události lze informace o plodinách získat např. terénním průzkumem či odhadem z aktuálních satelitních snímků sentinel II.

Kategorizace ploch by měla odpovídat účelu vrstvy, tedy dostatečně jasně odlišovat nebo sdružovat plochy s různými resp. podobnými vlastnostmi vůči povrchovému odtoku a erozi půdy. Pokud budou hodnoty parametrů dohledávány v Katalogu parametrů (E3D+GIS), je možné využít kategorií definovaných v pluginu. Tato kategorizace nabízí hierarchickou agregaci podrobnosti určení typu plochy, pro nezemědělské plochy ve dvou úrovních, pro zemědělské plochy pak navíc ještě úroveň plodin.

### **Vrstva půdních vlastností**

Vrstvu půdních vlastností lze získat z mnoha zdrojů. Při výběru zdroje je ovšem vhodné uvažovat, zda nám pomůže při určení hodnot jednotlivých parametrů. Klíčovým parametrem modelu EROSION-3D je zrnitost půdy, jelikož na základě ní lze z katalogu parametrů odvodit některé další parametry, aniž bychom o nich měli jiné informace. Jako

nejvhodnější se proto nabízí využití mapy zrnitostních tříd KA5 (Beitlerová et al. 2021b) tvořené přímo jako vstupní parametr do modelu EROSION-3D.

Výčet možných zdrojů pro tvorbu vrstvy vlastností:

- Mapa zrnitostních tříd KA5 na zemědělské půdě ČR (Beitlerová et al. 2021b)
- Mapy zrnitosti ČR (bezešvé mapy pokrývající celé území) v klasifikačním systému TKSP (Beitlerová et al. 2021)
- Mapy dalších půdních vlastností na zemědělské půdě ČR (Žižala et al. 2020)
- Základní půdní mapy KPP
- Mapa BPEJ
- Uživatelem vytvořená mapa na základě terénního průzkumu, laboratorních rozborů půdy aj.

---

### ***Tabulka parametrů***

---

Tabulka parametrů je soubor ve formátu \*.csv s přesně danou strukturou (Obr. 7 dole), kde:

- POLY\_ID = název třídy parametrizačních ploch
- LAYER\_ID = ID půdního horizontu. U základního modelu se využívá hodnota 0. Sloupec nabývá smysl při využití modulu pro simulaci infiltrace do půdy složené z více horizontů.
- LAYERTHICK = tloušťka vrstvy. U základního modelu se využívá hodnota 1000000. Sloupec nabývá smysl při využití modulu pro simulaci infiltrace do půdy složené z více horizontů.
- Následují sloupce půdních parametrů

Názvy sloupců pro jednotlivé parametry jsou dané, ale jejich pořadí v tabulce může být libovolné.

Tabulka parametrů může být vytvořena manuálně, nebo pomocí nástroje E3D+GIS. Manuální způsob bude použit, pokud máme dobré informace o vstupních parametrech. Pokud informace nemáme, je vhodné použít E3D+GIS, který načte hodnoty parametrů z katalogu parametrů. Pro každý parametr je možné zvolit jiný přístup.

---

### ***Propojující tabulka***

---

Propojující tabulka je soubor ve formátu \*.csv s přesně danou strukturou (Obr. 7 nahoře vpravo), kde:

- POLY\_NR = unikátní číselný identifikátor třídy parametrizačních ploch použitý v rastru parametrizačních ploch
- POLY\_ID = unikátní název třídy parametrizačních ploch použitý v tabulce parametrů

Tabulka je připravena manuálně či automaticky nástrojem E3D+GIS.

## VSTUPNÍ PARAMETRY DATOVÉ SADY PŮDY

Vlastnosti půdy jsou v modelu vyjádřeny za pomoci šesti půdních parametrů a dvou kalibračních parametrů (Tab. 1). Kombinací těchto parametrů se v modelu vyjadřují, a následně určují, infiltrační vlastnosti půdy a erodovatelnost půdy. Každému parametru je věnována v následujícím textu kapitola, kde jsou uvedeny stručné informace o parametru, jeho vlivu na výsledky modelu a zdroje dat či metody odvození parametru.

*Tab. 1: vstupní parametry modelu a jejich jednotky*

<b>Parametr</b>	<b>Jednotka</b>
Zrnitost půdy v 9 frakcích	Hmotnostní %
Objemová hmotnost	kg/m <sup>3</sup>
Obsah organického uhlíku	%
Počáteční vlhkost	Objemová %
Hydraulická drsnost povrchu	s/m <sup>1/3</sup>
Vegetační kryt	%
Skinfaktor (kalibrační)	-
Erodibilita (kalibrační)	N/m <sup>2</sup>

---

## **Zrnitost půdy**

---

V modelu EROSION-3D je zrnitost půdy zadávána v devíti zrnitostních frakcích – jíl, prach a písek, vždy rozlišeno na jemnou, střední a hrubou podfrakci (Tab. 2).

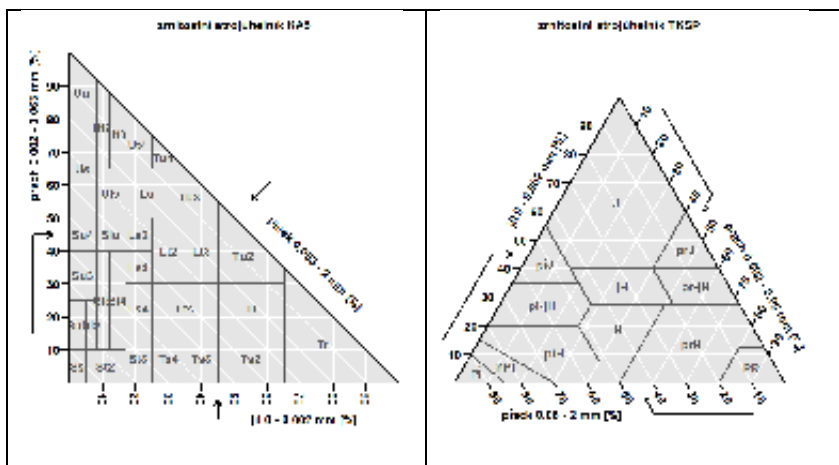
V základním nastavení je zadávána v německé klasifikaci KA5 (Sponagel a Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005), která má odlišné limity zrnitostních frakcí od české klasifikace TKSP (Obr. 9). Limity je možné ručně změnit a přizpůsobit tak klasifikaci TKSP v záložce *Simulace - Nastavení ukládání výsledků – Zrnitostní frakce*. **Pro jiné než základní nastavení zrnitostní frakce (KA5) není model ovšem kalibrován a validován.**

### **TIPY:**

- Málokdy jsou data dostupná v devíti požadovaných frakcích. Běžně postačí, když se vyplní zastoupení pouze 3 základních frakcí, a to do podfrakce střední. Ostatním dvěma podfrakcím se v takovém případě zadá hodnota 0.
- Součet zrnitostních frakcí se musí rovnat 100 %. Není-li tomu tak, simulace se ukončí chybovým hlášením.
- Pokud jsou vstupní soubory připravovány pomocí nástroje E3D+GIS je součet obsahu zrnitostních frakcí validován před exportem vstupních souborů pro EROSION-3D.

Tab. 2: Zrnitostní frakce a jejich limity zadávané jako vstupní parametr do modelu EROSION-3D.

Hlavní zrnitostní frakce	Limity zrnitostních podfrakcí [mm]		
	Jemný	Střední	Hrubý
Jíl	< 0,0002	0,0002 – 0,00063	0,00063 – 0,002
Prach	0,002 – 0,0063	0,0063 – 0,02	0,02 – 0,63
Písek	0,63 – 0,2	0,2 – 0,63	0,63 - 2



Obr. 9: Zrnitostní trojúhelník Německé klasifikace KA5 a české klasifikace TKSP

### Vliv zrnitosti na výsledky modelu

---

Zrnitostní složení půdy se promítá několika způsoby jak do odtokové tak do erozní části výsledků. Primárně silně ovlivňuje infiltrační intenzitu, protože nasycená hydraulická vodivost je vypočtena pomocí pedotransferových funkcí. Hrubozrnnější půdy mají vyšší hydraulickou vodivost a relativně poskytují menší přebytek srážkové intenzity pro povrchový odtok.

Následně se zrnitost promítá do zrnitostního složení erozního sedimentu. Při poklesu hybnosti vodního proudu se transportované půdní částice usazují postupně od nejhrubších po nejjemnější.

### Zdroje dat zrnitosti půdy

---

- Rastrové vrstvy procentního zastoupení prachu, jílu a písku + zrnitostní kategorie v klasifikaci KA5 v rozlišení 20 m, v rozsahu zemědělské půdy ČR vytvořené přímo pro model EROSION-3D (Beitlerová et al. 2021b)
- Rastrové vrstvy prachu, jílu a písku + zrnitostní kategorie v klasifikaci TKSP v rozlišení 20 m, v rozsahu celé ČR, dostupné na <https://rain.fsv.cvut.cz/pudy/> přes rozhraní WPS. (Beitlerová et al. 2021c)
- Mapový portál Komplexního průzkumu půd (KPP) dostupný na <https://kpp.vumop.cz/> - mapa 1:10 000 zrnitostní třídy v klasifikaci dle Nováka, základní půdní sondy s určením zrnitostní třídy (dle Nováka), výběrové půdní sondy s laboratorním rozbohem v klasifikaci KPP
- Vlastní terénní šetření – laboratorní rozbor

---

## ***Objemová hmotnost půdy***

---

Objemová hmotnost půdy je hustota celkové půdní matrice včetně objemu pórů. Měří se na neporušeném půdním vzorku o definovaném objemu, a to po jeho vysušení v troubě při 105 °C.

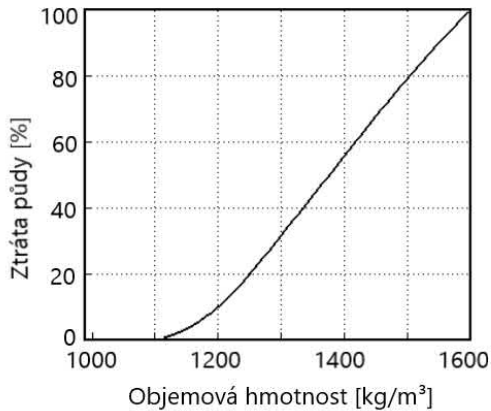
Objemová hmotnost půdy je velmi časově proměnlivá vlastnost. Její variabilita v průběhu roku vzrůstá s ohledem na hloubkou orby a intenzitou obdělávání. Po náhlém prudkém snížení objemové hmotnosti vlivem orby si ornice opět poměrně rychle sedá a zvyšuje objemovou hmotnost vlivem rozbité půdní struktury, vlastní váhy, působení deště a utužujícího vlivu následných operací (Michael et al. 1996).

### *Vliv objemové hmotnosti na výsledky modelu*

---

Objemová hmotnost půdy v modelu ovlivňuje výpočet povrchového odtoku. Je vstupním parametrem do pedotransferové funkce pro výpočet nasycené hydraulické vodivosti a potenciálu na čele zvlhčení (Beitlerová et al. 2021a), tedy dvou hlavních parametrů infiltračního submodulu.

Aby došlo ke vzniku eroze, musí být překročena určitá minimální hodnota objemové hmotnosti. Po překročení tohoto limitu vzrůstá ztráta půdy se vzrůstem objemové hmotnosti přibližně lineárně. Nadhodnocení či podhodnocení objemové hmotnosti o  $\pm 100 \text{ kg/m}^3$  produkuje téměř konstantní chybu  $\pm 20 \%$  ztráty půdy (Michael et al. 1996).



Obr. 10: Vliv objemové hmotnosti na ztrátu půdy. Příklad z Schmidt (1996), upraveno.

#### Zdroje dat objemové hmotnosti

- Laboratorní rozbor neporušených půdních vzorků
- Katalog vstupních parametrů EROSION-3D (např. pomocí nástroje E3D+GIS)
- Rastrová vrstva v rozlišení 20 m, v rozsahu zemědělské půdy ČR (Žížala et al. 2020), dostupná na <https://kpp.vumop.cz/>

---

## ***Obsah organického uhlíku***

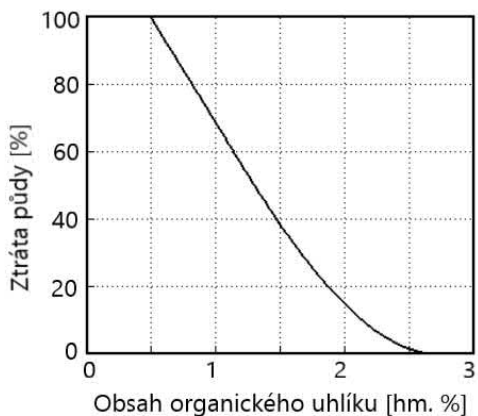
---

Obsah organického uhlíku je laboratorně zjistitelný parametr nepřímo vyjadřující množství organické hmoty v půdě. Organická hmota stabilizuje půdní agregáty, což vede k většímu objemu stabilního systému pórů a větší přítomnosti makropórů kořenového systému, chodbiček půdních živočichů aj., zpomaluje se proces sesedání a utužení půdy. Tím je pozitivně ovlivněna míra infiltrace. Stabilita agregátů zvyšuje i odolnost půdy vůči eroznímu účinku vody, ať už dopadajících kapek deště či povrchového odtoku. Při větším obsahu organické hmoty dochází hůře k rozpadu agregátů a rozpadlé částice bývají větší, a tedy hůře transportovatelné než u na organickou hmotu chudé půdy (Michael et al. 1996).

### *Vliv obsahu organické hmoty na výsledky modelu*

---

Obsah organického uhlíku má v modelu vliv na míru infiltrace vody do půdy. Je vstupním parametrem do pedotransferové funkce pro výpočet potenciálu na čele zvlhčení (Beitlerová et al. 2021a). Se vzrůstajícím obsahem organického uhlíku (zvyšuje se míra infiltrace) se snižuje výška povrchového odtoku a tím i výsledná modelovaná ztráta půdy. Nadhodnocení či podhodnocení obsahu organického uhlíku o  $\pm 25\%$  produkuje téměř konstantní chybu  $\pm 19\%$  ztráty půdy (Michael et al. 1996).



Obr. 11: Vliv obsahu organického uhlíku na ztrátu půdy. Příklad z Schmidt (1996), upraveno.

#### Zdroje dat obsahu organického uhlíku

- Rastrová vrstva v rozlišení 20 m, v rozsahu zemědělské půdy ČR (Žížala et al. 2020), dostupná na <https://kpp.vumop.cz/>
- Katalog vstupních parametrů EROSION-3D (např. pomocí nástroje E3D+GIS)
- Laboratorní rozbor porušených půdních vzorků

---

### **Počáteční vlhkost půdy**

---

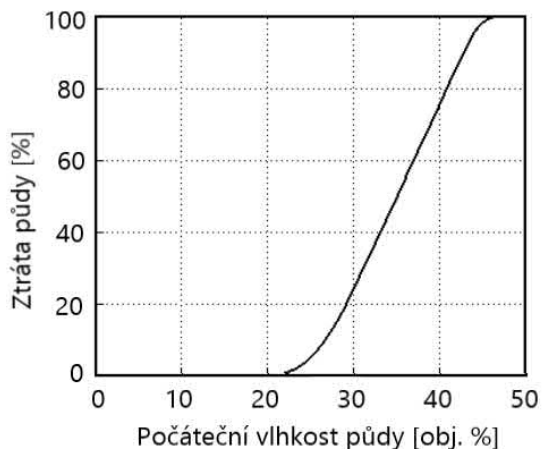
Počáteční vlhkost půdy vyjadřuje objem vody v půdě na začátku srážkové události. Měla by být měřena v hloubce 20 – 25 cm pod půdním povrchem.

Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů mající vliv na vznik a tvorbu povrchového odtoku, jelikož ovlivňuje objem pórů dostupných pro infiltraci vody. Jedná se o parametr velice proměnlivý v čase i prostoru díky meteorologickým podmínkám (srážky, teplota, evaporace,...), půdním podmínkám (zrnatost, obsah organické hmoty, objemová hmotnost) a vegetačním podmínkám (typ a vegetační fáze rostliny, pokryv půdy, způsob zpracování půdy).

#### *Vliv počáteční vlhkosti půdy na výsledky modelu*

---

Počáteční vlhkost půdy je nejcitlivější parametr infiltračního submodelu. Figuruje v rovnicích pro výpočet infiltrace i v pedotransferové funkci pro výpočet potenciálu na čele zvlhčení (Beitlerová et al. 2021a). Výsledná modelovaná ztráta půdy roste s počáteční vlhkostí téměř lineárně a podobně jako je tomu u objemové hmotnosti povrchový odtok a tím eroze půdy nastane až při překročení určité limitní hodnoty. **Uživatel by si měl být vědom extrémní citlivosti výsledků modelu na tento parametr.** Při změně  $\pm 5$  % dojde k chybě ztráty půdy kolem 23 % (Michael et al. 1996).



Obr. 12: Vliv počáteční vlhkosti půdy na ztrátu půdy. Příklad z Schmidt (1996), upraveno.

**TIPY:**

- Vytvořením parametrizační plochy s nulovou počáteční vlhkostí je možné vytvořit povrch, který zcela vsakuje veškerou vodu. Takové plochy se tedy chovají jako dokonalý drén. Budou použity např. pro objekty odvodnění (zaústění zatrubnění).
- Nástroj E3D+GIS obsahuje funkcionalitu pro snadné vytvoření těchto prvků ve vstupních datasetech.

### Zdroje dat počáteční vlhkosti půdy

Získat přesné údaje o počáteční vlhkosti půdy je velice obtížné. Vzhledem k vysoké časové a prostorové variabilitě a potřebě mít údaj z doby těsně před srážkou neexistuje žádný stabilní zdroj dat, jako jsou mapové podklady či databáze půdních vzorků.

Nejpřesnější údaje lze získat z některých meteorologických stanic, kde je vlhkost půdy kontinuálně měřena. Problémem je vzdálenost stanice od modelovaného území a lokálnost přívalových srážek a půdně-vegetačních podmínek.

V literatuře existují typické rozsahy půdní vlhkosti pro jednotlivé půdní typy či druhy (např. Schmidt 1996). V Německém katalogu parametrů modelu EROSION-3D (Michael et al. 1996) jsou uvedeny hodnoty počáteční vlhkosti při středně a vysoce nasycených podmínkách, které byly odvozeny pro jednotlivé kategorie půdní zrnitosti KA5. V praxi se při modelování eroze často vychází z nejhoršího scénáře (tzv. „worst case“), tak aby byla simulována situace s maximální možnou erozí. V takovém případě se v modelu uvažuje vysoká počáteční vlhkost zachycující téměř nasycené podmínky.

- Některé meteorologické stanice ČHMÚ
- Některé amatérské či institucionální meteorologické stanice
- Vybrané zemědělské meteorologické stanice a měření
- Hodnoty z literatury pro různé půdní podmínky (Michael et al. 1996, Barker et al. 2005 fig. 1-6)

---

## ***Drsnost půdy***

---

Drsnost půdního povrchu je hydraulický parametr ovlivňující rychlost povrchového odtoku a tím i transportní kapacitu povrchového odtoku. Drsnost je dána zejména mikroreliéfem tvořeným např. půdními agregáty a zbytky rostlin na povrchu půdy. V modelu EROSION-3D se používá hydraulická drsnost  $n$  [ $\text{s/m}^{1/3}$ ] dle Manninga.

Čím větší je drsnost povrchu, tím je vyšší třecí síla, dochází ke snížení rychlosti povrchového odtoku a tím dochází ke snížení unášecí schopnosti povrchového odtoku a ve výsledku nižšímu odnosu půdních částic.

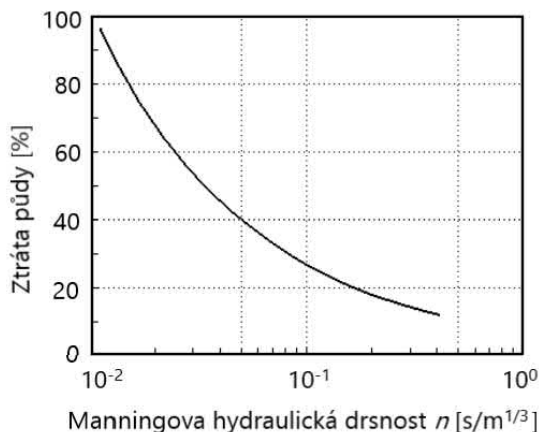
Hydraulická drsnost podléhá velké časové variabilitě. Největší bývá po zpracování půdy a postupně se snižuje vlivem sesedání a destrukce agregátů dešťovými kapkami. Opět vzrůstá s rozvojem vegetace díky stonkům a listům na půdním povrchu. Rozhodující pro tento parametr je tedy typ plodiny, hustota setí a vegetační fáze (Michael et al. 1996).

### *Vliv drsnosti půdy na výsledky modelu*

---

Drsnost půdy je parametrem vstupujícím do výpočtů erozního submodelu. Eroze půdy se snižuje exponenciálně se zvyšující se drsností. Stejná změna drsnosti má větší vliv u malých hodnot než u velkých. Nadhodnocení či podhodnocení parametru o  $\pm 0.005 \text{ s/m}^{1/3}$  vede k chybě v predikci ztráty půdy (Michael et al. 1996):

Pro $n < 0.001 \text{ s/m}^{1/3}$	chyba až $\pm 75 \%$
Pro $0.001 < n < 0.005 \text{ s/m}^{1/3}$	chyba až $\pm 50 \%$
Pro $0.005 < n < 0.010 \text{ s/m}^{1/3}$	chyba až $\pm 25 \%$
Pro $0.010 < n < 0.100 \text{ s/m}^{1/3}$	chyba až $\pm 10 \%$



Obr. 13: Vliv počáteční vlhkosti půdy na ztrátu půdy. Příklad z Schmidt (1996), upraveno.

#### Zdroje dat drsnosti půdy

Manningova drsnost je běžným parametrem v hydrologickém a hydraulickém modelování. Pro erozní modelování je nejpraktičtější využít různých v literatuře uvedených hodnot pro různé typy vegetačního krytu a způsoby zpracování půdy.

- Katalog vstupních parametrů EROSION-3D (např. pomocí nástroje E3D+GIS)
- Dohledání hodnot v literatuře (např. Janeček et al. 2012)

---

## ***Vegetační kryt***

---

Vegetační kryt udává poměr půdního povrchu [%] chráněného před padajícími kapkami deště rostlinami či rostlinnými zbytky. Ochranný efekt vegetačního krytu spočívá ve zpomalení a pohlcení energie dopadajících kapek deště, které vede ke snížení kapkové eroze, destrukce agregátů a tvorbě půdní krusty. Dále dochází k intercepci a tím je dosaženo snížení objemu povrchového odtoku a následného odnosu půdy.

Ochranný efekt vegetace závisí na typu plodiny, vegetační fázi rostliny a nakládání s posklizňovými zbytky.

### *Zdroje dat vegetačního krytu půdy*

---

- Katalog vstupních parametrů EROSION-3D (např. pomocí nástroje E3D+GIS)
- Obrazová analýza kolmých fotografií porostu

---

## ***Skinfaktor***

---

Skinfaktor je kalibračním parametrem infiltračního submodulu, který upravuje hodnotu nasycené hydraulické vodivosti vypočítané na základě pedotransferových funkcí (Campbell 1985; přehledně pro EROSION-3D v Beitlerová et al. 2021) dle rovnice:

$$k_s = k_{sat} \cdot skin$$

kde  $k_s$  je upravená hodnota nasycené hydraulické vodivosti,

$k_{sat}$  je hodnota nasycené hydraulické vodivosti vypočtená dle pedotransferové funkce,

$skin$  je skinfaktor.

Základní hodnota parametru je rovna 1. Pro zvýšení povrchového odtoku je třeba zadat skinfaktor  $< 1$ , pro jeho snížení naopak skinfaktor  $> 1$ . Skinfaktor nabývá hodnot od 0,0001 po 100. Výsledná modelová ztráta půdy má přibližně logaritmickou závislost na hodnotě skinfaktoru.

Model má obecně tendenci povrchový odtok spíše podhodnocovat, a to tím více, čím je půda sušší. Hodnoty  $> 1$  se používají spíše pro velice nasycené půdy (Beitlerová et al. 2021a).

### *Zdroje dat pro skinfaktor*

---

- Pedotransferové funkce
- Katalog vstupních parametrů EROSION-3D (např. pomocí nástroje E3D+GIS)

Skinfaktor byl pro některé půdně-vegetační podmínky odvozen terénními měřeními. Tyto hodnoty jsou obsaženy v českém katalogu parametrů a lze je získat pomocí nástroje E3D+GIS. Parametr je ovšem velmi proměnlivý, a i jeho malá změna má významný vliv na výsledky modelu. E3D+GIS proto doporučujeme používat pouze, pokud obsahuje hodnoty pro velmi podobné půdně vegetační podmínky.

V ostatních případech je třeba využít hodnot skinfaktoru odvozených pomocí pedotransferových funkcí. Tyto funkce byly odvozeny z databáze terénních měření na základě ostatních vstupních parametrů modelu (Beitlerová et al. 2021a) a lze je využít univerzálně pro jakékoliv půdně-vegetační podmínky.

Doporučujeme používat funkci:

$$\text{Skin} = e^{-16.5647 + 0.1719 \cdot PV + 0.0074 \cdot OH}$$

kde:

*PV* – počáteční vlhkost (obj. %), *OH* – objemová hmotnost ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Publikace (Beitlerová et al. 2021a) uvádí další dvě funkce, které jsou podstatně složitější a o něco přesnější. Ty jsou ovšem vhodné pro projekční účely pouze v případě, že uživatel modelu disponuje dostatečně přesnými vstupními parametry.

---

## ***Erodibilita***

---

Erodibilita vyjadřuje odolnost půdy vůči vodní erozi. Je rovna součtu sil poutajících půdní částici k půdnímu povrchu (koheze, adheze, gravitace, tření). Aby došlo k uvolnění půdní částice, součet sil, kterými na půdní povrch působí povrchový odtok a dopadající kapky deště musí být větší než erodibilita. Tento parametr není přímo měřitelný, a proto v modelu figuruje jako kalibrační parametr erozního submodulu.

Hodnota erodibility závisí na zrnitosti půdy a na různých chemických a fyzikálních vlastnostech půdy, jako je stabilita agregátů, obsah organického uhlíku, prokořenění, vegetační kryt, způsob zpracování půdy aj. Parametr je velice proměnlivý v čase a prostoru i v rámci jedné zrnitostní třídy. Tento parametr není možné přímo měřit.

### *Zdroje dat pro erodibilitu*

---

- Katalog vstupních parametrů EROSION-3D (např. pomocí nástroje E3D+GIS)
- Hodnoty v Německém katalogu parametrů (Michael 2000)

Obdobně jako u skinfaktoru byla erodibilita pro některé půdně-vegetační podmínky experimentálně odvozena během terénních měření. Hodnoty z experimentů provedených na území ČR a Saska (Německo) jsou obsaženy v Českém katalogu parametrů a pro podobné půdně-vegetační podmínky je lze získat pomocí nástroje E3D+GIS. Návodné hodnoty pro některé půdně-vegetační podmínky jsou přehledně tabelizovány v Německém katalogu parametrů (Michael 2000).

## NÁSTROJE E3D+GIS PRO PŘÍPRAVU VSTUPNÍCH DATASETŮ

Pro usnadnění a zpříjemnění práce s Katalogem vstupních parametrů EROSION-3D byl vytvořen software „**E3D+GIS nástroj pro přípravu vstupních parametrů**“, který nabízí propojení mezi prostředím GIS, Katalogem parametrů a samotným programem EROSION-3D. Nástroj slouží pro přípravu semi-distribuovaného sestavení modelu EROSION-3D. E3D+GIS transformuje pracovní polygonové GIS vrstvy/datasety do podoby vstupních datasetů modelu EROSION-3D, tak jak jsou vyžadovány jeho uživatelským rozhraním.

Průvodce sestavením vstupních datasetů je odvozen z pracovního postupu manuálního sestavení vstupních datasetů, ale přímo implementuje ty části pracovního postupu, které lze automatizovat. Vyhledávání hodnot vstupních parametrů, tedy časově nejnáročnější část sestavení, které bylo nutno provádět mimo prostředí GIS, je nyní plně implementováno do nástroje E3D+GIS a je tak dostupné přímo z prostředí GIS.

Nástroj je vytvořen jako doplněk (plug-in) prostředí QGIS a pracuje s vrstvami aktuálního projektu. Uživatel tak může po přípravě vrstvy využití ploch a půdních jednotek pokračovat přímo v prostředí QGIS se sestavením vstupních datasetů pro model EROSION-3D.

E3D+GIS umožňuje přímo v prostředí QGIS:

- připravit rastrovou vrstvu parametrizačních ploch spolu s tabulkou vstupních parametrů a tabulkou propojení ve formátu požadovaném programem EROSION-3D
- využít pro získání hodnot vstupních parametrů Katalog vstupních parametrů EROSION-3D
- vytvořit rastrovou vrstvu záznamových bodů (pour points)
- zahrnout do definice parametrizačních ploch prvky pro úplný vsak vody
- zohlednit v definici parametrizačních ploch úpravy digitálního modelu terénu – vytvoření speciální kategorie pro buňky se změněnou nadmořskou výškou nebo sklonem
- vložit vybrané výstupní vrstvy do mapového projektu s připravenou symbologií
- zpracovat tabelované výstupy ze záznamových bodů pro snazší vytváření hydrogramů a sedimentogramů
- získat základní odtokové charakteristiky v záznamových bodech (maximální průtok, celkový odtok, celkové množství sedimentu atp.)

E3D+GIS využívá jako zdroj hodnot parametrů nově vytvořený český Katalog vstupních parametrů EROSION-3D (dále také Katalog, Katalog parametrů), jehož SQLite verze je součástí distribuce balíčku nástrojů E3D+GIS. Distribuce obsahuje průvodce sestavením vstupních datasetů a další pomocné nástroje pro vizualizaci a zpracování výstupů.

Aktuální instalační balíček E3D+GIS stejně jako návod na instalaci a použití nástrojů je ke stažení na webových stránkách: <https://runoffdb.fsv.cvut.cz>

Na stejné adrese je k dispozici podrobný popis a dokumentace Katalogu vstupních parametrů EROSION-3D. Také jsou zde ke stažení české manuály programu EROSION-3D a dostupných submodulů.

Katalog parametrů obsahuje hodnoty vstupních a kalibračních parametrů získané z původního německého katalogu vstupních parametrů a hodnoty odvozené z kalibračních výpočtů založených na zadržovacích experimentech VÚMOP a ČVUT. Katalog je MySQL databáze strukturovaná tak, aby umožňovala vyhledávání hodnot jednotlivých parametrů na základě relevantních podmínek. Základní podmínky parametrizačních ploch – typ půdy a typ využití – jsou hierarchicky klasifikovány ve třech úrovních podrobnosti. Tento přístup umožňuje operativní redukování podrobnosti zadání podmínek pro případy, kdy v katalogu nejsou dostupné hodnoty pro nejpodrobnější úroveň diferenciací podmínek.

Po instalaci pluginu do prostředí QGIS se na panelu nástrojů zobrazí paletka tlačítek poskytující přístup k jednotlivým nástrojům balíčku:



průvodce sestavením vstupních datasetů modelu EROSION-3D



resetování průvodce (vymazání všech nastavených hodnot)



vložit výstupní bilanci sedimentu do mapového projektu



vypočítat Garbrechtovu hydraulickou drsnost na základě zrnitostního složení



konvertovat tabelované výstupy záznamových bodů



informace o pluginu (aktuální verze nástroje a Katalogu)

---

### ***Pracovní postup sestavení vstupních datasetů***

---



Nástroj pro přípravu vstupních parametrů je postaven jako průvodce, který v patnácti krocích provede uživatele výběrem vstupních vrstev, kategorizací využití ploch a půdních typů, provede hledání v Katalogu pro dostupné vstupní parametry a připraví vstupní datasety ve formátech požadovaných softwarem EROSION-3D.

#### *Výběr zdrojových dat a atributových polí*

---

V prvním kroku jsou určeny zdroje geometrických dat pro vytvoření vrstvy parametrizačních ploch. Jsou zvoleny odpovídající vrstvy projektu s geometrií půdních jednotek a využití ploch. Obě vrstvy musí být polygonové. Pokud má uživatel geometrii půdních jednotek a typů využití ploch připraveny v jedné vrstvě, je tato vrstva vybrána v obou výběrových menu. Dalším vstupem je pak rastrový digitální model terénu, který dále slouží jako referenční pro geometrickou definici dalších využitých rastrových datasetů. Pokud je simulace prováděna na modelu terénu s virtuálně zahloubenými koryty vodních toků, je zde zadáván nejlépe původní neupravený digitální model terénu. Důvod bude uveden dále v kapitole o dodatečných vstupech. Je třeba zvolit datum, kdy se odehrává simulovaná epizoda – z tohoto data jsou odvozovány hodnoty parametrů (u kterých je to relevantní). Pro

sestavení vstupů je relevantní pouze den a měsíc epizody, rok nemá vliv na hodnoty nalezených parametrů.

Vrstva s definicí půdních vlastností:

soil

Vrstva s definicí využití ploch:

landuse\_var0

Vrstva DMT:

dmr5g\_3m\_var0

Zvolte datum:

červen, 2021

po	út	st	čt	pá	so	ne
31	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11

Obr. 14: Výběr zdrojových vrstev a data simulované události

Ve druhém kroku jsou určena potřebná atributová pole v datasetu půdních jednotek: ID půdní jednotky, které bude dále v průběhu využíváno pro označení tříd parametrizačních ploch (součást POLY\_ID) a pokud jsou již půdní jednotky zatříděny dle normy KA5 (nebo starší KA4), je možno vybrat sloupec obsahující kód třídy.

KA5 třída:

abc KA4\_code

Půdní ID:

abc SID

Obr. 15: Menu pro výběr sloupce identifikátoru půdních jednotek a třídy KA5

Ve třetím kroku jsou pak zadány atributové sloupce z datasetu půdních jednotek, které obsahují jednotlivé frakce zrnitostního složení. Pokud není k dispozici podrobné zrnitostní složení v devíti třídách, je možné zadat pouze celkové zastoupení jílu/ prachu/ písku, a to do odpovídajících polí pro střední zrnitostní sub-frakce. Tento způsob zadání je zobrazen na Obr. 16.

Jemný jíl (FT):

Střední jíl (MT): clay

Hrubý jíl (GT):

Jemný prach (FU):

Střední prach (MU): silt

Hrubý prach (GU):

Jemný písek (FS):

Střední písek (MS): sand

Hrubý písek (GS):

Obr. 16: Menu pro výběr atributových polí s hodnotami zastoupení zrnitostních tříd

Využití ploch je určeno dvěma atributovými poli – samotný typ využití ploch je načten z jednoho atributového pole a další atributové pole může být volitelně využito pro definici plodin na orné půdě. Samotný nástroj neobsahuje omezení týkající se obsahu těchto polí a je na uživateli, jak bude popisné charakteristiky svých dat strukturovat.

Využití ploch:

abc LandUse

Plodiny:

abc plodina

Obr. 17: Menu pro výběr sloupce identifikátoru typu využití ploch a plodiny

Z obsahu těchto atributových polí je sestaven seznam unikátních hodnot typů využití ploch a případně jejich kombinací s plodinou, který je zobrazen v tabulce. Pro každý řádek tabulky zde uživatel musí přiřadit nejlépe odpovídající kategorii z hierarchické klasifikace typů využití ploch a plodin z Katalogu parametrů. Po zobrazení nabídky kliknutím na odpovídající řádek a sloupec tabulky mohou být zvoleny hodnoty kategorií z Katalogu a to v libovolné podrobnosti.

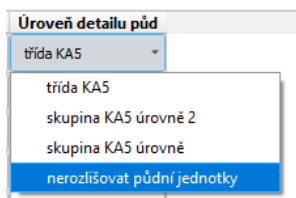
Zdrojová kategorie	Kategorie Katalogu parametrů	Agrotechnologie	Stav vegetace	Ochranná opatření	Stav povrchu	Úroveň detailu půd
1 AZP						třída KAS
2 KP						třída KAS
3 LP						třída KAS
4 OP_kukurice						třída KAS
5 OP_psenice_ozima	orná půda					třída KAS
6 OP_reпка	orná půda - dílčí kategorie			letní úzkofádkové plodiny		třída KAS
7 TP	travní porost			letní úzkofádkové plodiny - dílčí kategorie		třída KAS
8 Z	travní porost - dílčí kategorie			neoseťo		třída KAS
	lesní porost			neoseťo - dílčí kategorie		třída KAS
	lesní porost - dílčí kategorie			ozimé úzkofádkové plodiny		
	antropogenní a zpevněné plochy			ozimé úzkofádkové plodiny - dílčí kategorie		
	antropogenní a zpevněné plochy - dílčí kategorie			víceleté pícniny		
	intenzivní víceleté zemědělské kultury			víceleté pícniny - dílčí kategorie		
	intenzivní víceleté zemědělské kultury - dílčí kategorie			širokofádkové plodiny		
	extenzivní smíšené porosty			širokofádkové plodiny - dílčí kategorie		
	extenzivní smíšené porosty - dílčí kategorie					
	vodní plochy					

Obr. 18: Přiřazení kategorií využití ploch

Vyhledání v katalogu je vždy omezeno nejpodrobnější zvolenou kategorií (typ využití v kombinaci s plodinou). Zároveň mohou být pro každý řádek zvoleny další omezující podmínky, které definují způsob hospodaření na daném typu využití a další podmínky pro danou třídu

parametrizačních ploch v době modelované události. Možné hodnoty pro jednotlivé podmínky vycházejí z aktuálně dostupných dat uložených v Katalogu parametrů, avšak ne pro všechny typy využití jsou relevantní všechny omezující podmínky.

V posledním sloupci je možné redukovat podrobnost určení půdních typů. Ve výchozím nastavení je vyhledání v Katalogu prováděno podle nejpodrobnější kategorie členění KA5 - půdní třídy. Výběrem dalších možností ve sloupci "Úroveň detailu půd" je možné výběry hodnot z Katalogu rozšířit na nadřazené skupiny 2. a 1. úrovně (nejméně podrobná). Zatřídění půdních tříd do skupin je uvedeno například v dokumentaci ke Katalogu vstupních parametrů EROSION-3D. Možnost "nerozlišovat půdní jednotky" pak pro danou kategorii využití ploch způsobí, že zůstane zcela homogenní ve svých parametrech. Zrnitostní složení je této kategorii přiřazeno od jedné z půd, na které se vyskytuje.



Obr. 19: Výběr úrovně podrobnosti zatřídění půdní jednotky pro jednu ze tříd parametrizačních ploch

- Zvolené možnosti v tomto kroku jsou zásadní pro další postup při sestavování výstupních datasetů, proto pokud se uživatel vrátí zpět z některého z následujících kroků, jsou anulovány případné manuální úpravy v tabulkách parametrů a všechny hodnoty jsou opětovně naplněny výsledky hledání v Katalogu.

Pokud uživatel má ve vstupních vrstvách hodnoty některého ze vstupních parametrů (kromě kalibračních) již připravené, může v 6. kroku určit zdrojové vrstvy a jejich atributová pole, kde jsou hodnoty uloženy. Hodnoty zvolených parametrů budou přímo zkopírovány do výsledné tabulky vstupních parametrů. Vyhledávání v Katalogu pro zvolené parametry nebude provedeno a odpovídající krok průvodce bude přeskočen.

Vrstva obsahující objemovou hmotnost:	<input type="text"/>	Sloupec obsahující objemovou hmotnost:	<input type="text"/>
Vrstva obsahující obsah organického uhlíku:	<input type="text"/>	Sloupec obsahující obsah organického uhlíku:	<input type="text"/>
Vrstva obsahující počáteční vlhkost:	Landuse layer: landuse_var0	Sloupec obsahující počáteční vlhkost:	123 intmost
Vrstva obsahující hydraulickou drsnost:	<input type="text"/>	Sloupec obsahující hydraulickou drsnost:	<input type="text"/>
Vrstva obsahující zakrytí povrchu:	<input type="text"/>	Sloupec obsahující zakrytí povrchu:	<input type="text"/>

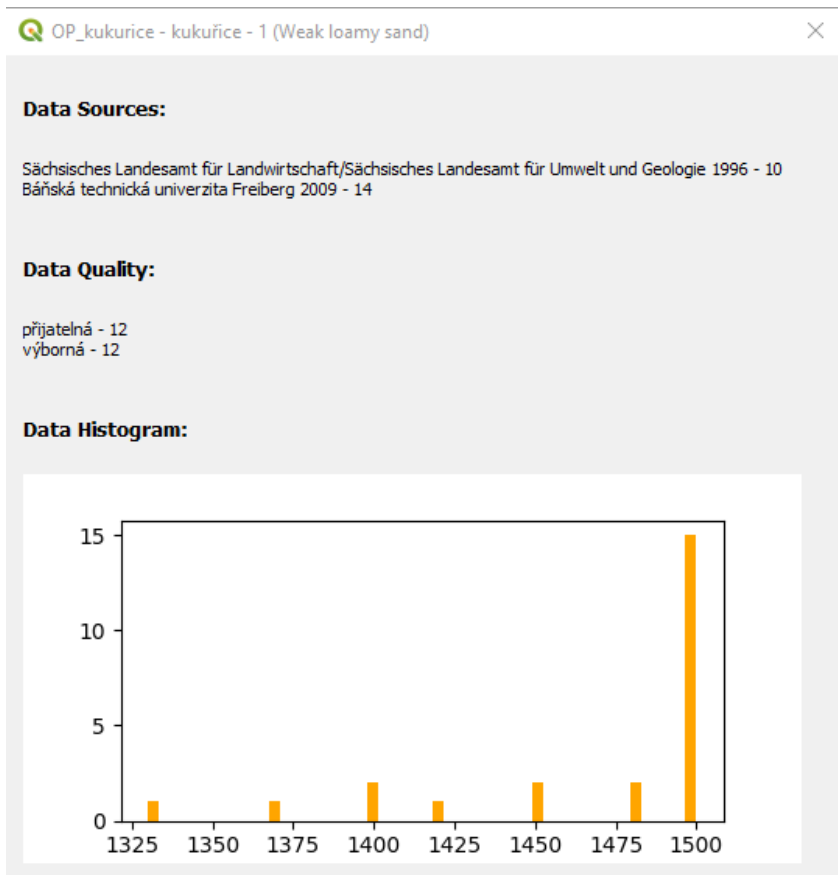
*Obr. 20: Menu pro výběr zdrojové vrstvy a sloupce pro již připravené hodnoty vstupních parametrů*

### Výsledky hledání hodnot vstupních parametrů v Katalogu

V krocích 7 až 12 je postupně provedeno hledání v Katalogu pro jednotlivé dostupné parametry. Nalezené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce pro všechny třídy parametrizačních ploch. V pravé části tabulky jsou zobrazeny základní popisné charakteristiky nalezené množiny hodnot pro každý z řádků (tj. třídu parametrizačních ploch). Hodnoty lze měnit pomocí posuvníku od minimální po maximální z nalezených hodnot, nebo přímo zadat libovolnou hodnotu do odpovídajícího pole. Kliknutím na tlačítko  ve sloupci „Info“ lze získat podrobnější statistický popis nalezené množiny hodnot (histogram) a informace o zdrojích hodnot a jejich kvalitě.



	Erozní odolnost půdy	Statistika	Info
	0.0069	Nalezeno 28 záznamů s rozsahem (0.0016, 0.014) a průměrem 0.01.	...
	0.3693	Nalezeno 528 záznamů s rozsahem (0.008, 1.0) a průměrem 0.37.	...
	0.03	Nalezeno 48 záznamů s rozsahem (0.03, 0.03) a průměrem 0.03.	...
	0.3617	Nalezeno 528 záznamů s rozsahem (0.005, 1.0) a průměrem 0.36.	...
	0.3677	Nalezeno 528 záznamů s rozsahem (0.003, 1.0) a průměrem 0.37.	...

Obr. 21: Základní informace o výsledcích hledání v Katalogu



Obr. 22: Zobrazení podrobných informací o výsledcích hledání v Katalogu

Pokud nebyla nalezena žádná hodnota pro podmínky nastavené pro některou z tříd parametrizačních ploch, je odpovídající řádek podbarven oranžově.

	Zdrojová kategorie	Plodina	Půdní ID (KA5 třída)		Skin Factor
1	OP_kukurice	kukurice	2 (Weak sandy loam)		0
2	KP	plochy s nedokonalým pokrytím povrchu	3 (Medium silty clay)		14,0
3	Z	upravené plochy s dobrým pokryvem	3 (Medium silty clay)		0
4	KP	plochy s nedokonalým pokrytím povrchu	1 (Weak loamy sand)		11.25

Obr. 23: Indikace třídy parametrizačních ploch, pro něž nebyla v Katalogu nalezena hodnota parametru.

### Volitelné vstupní vrstvy

V kroku 13 je možné vybrat z projektu další vrstvy, které budou využity pro vytvoření speciálních tříd parametrizačních ploch, nebo doplňkových vstupů pro EROSION-3D.

Digitální model terénu se zahloubenými koryty vodních toků:

Odvodňovací prvky:

Vrstva záznamových bodů:

Atributové pole s identifikátorem bodů:

Obr. 24: Menu pro výběr doplňkových vstupních vrstev

Zahloubení koryt vodních toků do digitálního modelu terénu je jednou z běžných operací přípravy výškových dat s cílem zlepšit trasování odtoku vody po povrchu. Podél buněk se sníženou hodnotou nadmořské výšky však vznikají pásy buněk, které mají (mohou mít) výrazně zvýšený sklon. Zvýšení sklonu vede ke zvýšení rychlosti

povrchového odtoku a tím k nárůstu eroze. Zadáním upraveného DMT v tomto kroku průvodce bude do seznamu tříd parametrizačních ploch přidána speciální třída, která je platná pro všechny buňky s rozdílnou výškou (koryto vodního toku) nebo sklonem (břežky koryta) mezi upraveným a původním DMT. Pro tyto buňky je tak možné zadat hodnoty parametrů s ohledem na riziko nerealistického zvýšení simulované erozi vlivem koncentrace odtoku nebo zvýšeného sklonu.

Odvodňovací prvky jsou tvořeny třídou parametrizačních ploch s nulovou vlhkostí. Je možno vybrat vrstvu s liniíovou nebo bodovou geometrií, která definuje geografickou polohu těchto prvků. Tyto prvky jsou převedeny na rastr a je vytvořena speciální třída parametrizačních ploch, nezávislá na půdních vlastnostech. Jako odvodňovací prvky fungují tyto buňky pouze, pokud je ponechána hodnota počáteční vlhkosti nula.

Posledním volitelnou vrstvou v tomto kroku je bodová vrstva záznamových bodů. Z této vrstvy bude na závěr vytvořena rastrová vrstva přímo využitelná jako rastrová definice záznamových bodů "pour.asc". Musí být zvoleno atributové pole s celočíselným identifikátorem, který dále slouží pro rozlišení bodů ve výsledkové tabulce.

#### Kompletace, kontrola a export vstupních datasetů pro EROSION-3D

V kroku 14 je přehledně zobrazena celá tabulka vstupních parametrů. Uživatel může zkontrolovat, upravit nebo doplnit libovolnou hodnotu, a to včetně zrnitostního složení. Při změně obsahu zrnitostních tříd je automaticky validován součet obsahů zrnitostních tříd, který musí být roven 100.

V následujícím posledním kroku průvodce jsou zvoleny názvy souborů a umístění pro jednotlivé vstupní datasety EROSION-3D. Všechny datasety jsou uloženy ve formátu vyžadovaném programem EROSION-3D a to včetně DMT. Pokud byl zadán pouze neupravený DMT v kroku 1, je exportován tento. Pokud byl zadán i upravený DMT se zahloubenými koryty, je exportován ten.


Pokud byly ponechány některé hodnoty vstupních parametrů nevyplněné, je uživatel na tuto skutečnost upozorněn a pro exportování musí zakliknout, že si je této skutečnosti vědom a souhlasí s neúplným exportem.

V tabulce parametrů chybí hodnoty.  
Datasety mohou být uloženy, ale je možné, že budou potřebovat doplnění pro správné sestavení modelu v Erosion-3D.

Rozumím a chci datasety uložit ve stávajícím stavu.

Rastr využití ploch:	D:/Dokumenty/landuse.asc	...
Tabulka vstupních parametrů:	D:/Dokumenty/soil_params.csv	...
Tabulka propojení:	D:/Dokumenty/lookup.csv	...
Pour points raster:	D:/Dokumenty/pour.asc	...
DEM:	D:/Dokumenty/DEM.asc	...

Obr. 25: Dialog pro uložení vstupních datasetů pro model EROSION-3D

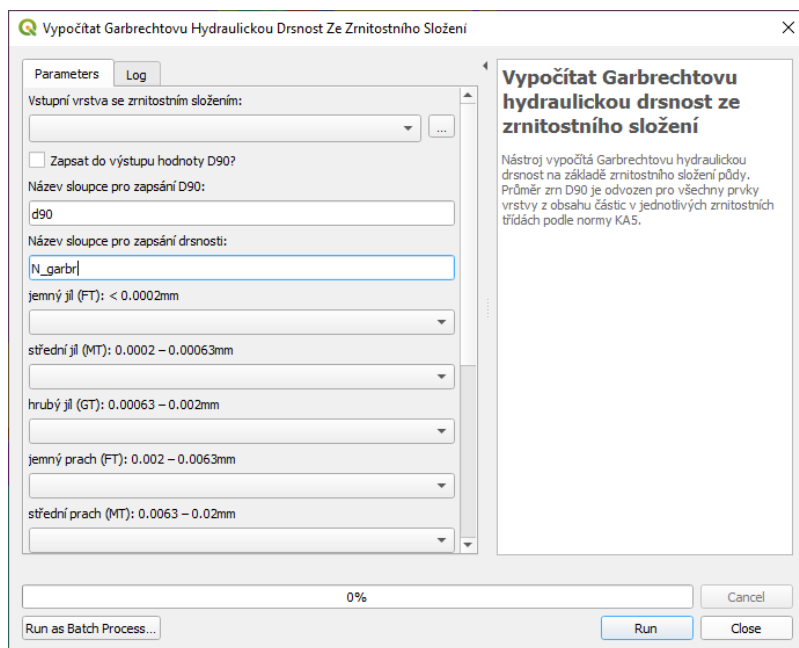
Volby, hodnoty nalezené v katalogu i ručně zadané jsou v průvodci uloženy pro danou instanci aplikace QGIS. Je tak možné pracovat zároveň na několika otevřených projektech a v každém z nich sestavovat nezávisle vstupní datasety. Při zavření aplikace QGIS je průvodce vyprázdněn. Pokud chce uživatel uvést průvodce do původního stavu bez nutnosti zavírat aplikace QGIS, může tak učinit pomocí k tomu určeného nástroje: 

## Doplňkové nástroje pro přípravu vstupů

Kromě průvodce sestavením vstupních datasetů obsahuje distribuce E3D+GIS další nástroje pro přípravu vstupů a zpracování výstupů modelu EROSION-3D. Tyto nástroje jsou přístupné také z nástrojové lišty pluginu.



Výpočet Garbrechtovy drsnosti (Garbrecht 1961) slouží pro získání odhadu hydraulické drsnosti povrchu půdy na základě přístupu využívaného při hydraulických výpočtech otevřených koryt. Hodnota drsnosti je odvozena ze zrnitostního složení půdy a nezohledňuje půdní agregáty. Vypočtené hodnoty tedy odpovídají silně nestrukturní půdě a je nutno to mít při jejich využití na paměti.



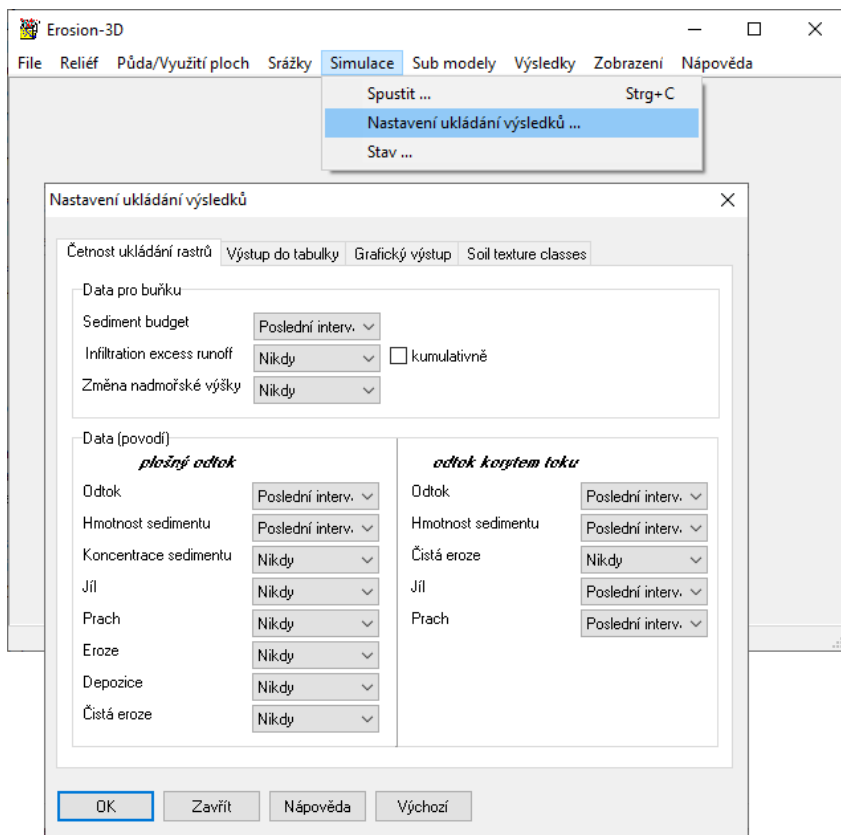
Obr. 26: Dialogové okno nástroje pro výpočet Garbrechtovy hydraulické drsnosti

## I.4 VÝSLEDKY A JEJICH INTERPRETACE

---

Model EROSION-3D tvoří sadu výsledků do uživatelem zvoleného adresáře. Výsledky jsou generovány v rastrové podobě, případně pokud byla zadána vrstva uzávěrových profilů, jsou výsledky pro jednotlivé profily uloženy i v tabelární podobě v souboru pojmenovaném *pp\_data.csv*.

U rastrových výsledků je možno v modelu volit, zda se vygenerují pouze k poslednímu časovému intervalu simulace (suma za celou erozní událost), ke každému kroku simulace či se nevygenerují vůbec. Nastavení je pod záložkou Simulace – Nastavení ukládání výsledků viz Obr. 27. Stručný popis rastrových výsledků, název výsledku v modelu, název výstupního rastru a jednotka jsou uvedeny v Tab. 3. Rastrová data jsou vhodná pro vizualizaci a analýzu výsledků v ploše povodí a tvorbu odvozených interpretovaných výsledků (např. zonální statistiky pro jednotlivé typy využití území, díly půdních bloků, povodí atd.). Tabelární data jsou vhodná pro znázornění průběhu erozní události (hydrogram, sedimentogram) a pro určení maximálního průtoku vody a sedimentu v konkrétním bodě.



Obr. 27: Karta nastavení tvorby rastrových výsledků

Tab. 3: Přehled rastrových výsledků modelu EROSION-3D

Název v modelu	Název rastru	Jednotka	Popis
<b>Výsledky pro daný pixel</b>			
Eroze/depozice	sedbudget.asc	kg/m <sup>2</sup> /m	Eroze/depozice v pixelu
Efektivní srážka	q_cell	mm/min	Efektivní srážka (srážka – infiltrace)
Změna nadmořské výšky	elevchange	m	Změna nadmořské výšky
<b>Výsledky pro povodí pixelu</b>			
Odtok	sum_q	m <sup>3</sup> /m	Kumulativní odtok
Hmotnost sedimentu	sum_sedvol	kg/m	Hmotnost sedimentu proteklého pixelem
	sedvol1 – sedvol9	kg/m	Hmotnost sedimentu proteklého pixelem pro každou z 9 zrnitostních frakcí
	sum_sedvol_b	kg/m	Hmotnost sedimentu – interní parametr modelu (nepoužívat)
Koncentrace sedimentu	sedconc	kg/m <sup>3</sup>	Koncentrace sedimentu v povrchovém odtoku
Jíl	clayfrac	%	Procento jílu v sedimentu

<b>Název v modelu</b>	<b>Název rastru</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
Prach	siltfrac	%	Procento prachu v sedimentu
Eroze	totalero	t/ha	Celková eroze
Depozice	totaldep	t/ha	Celková depozice
Čistá eroze	netero	t/ha	Čistá eroze
<b>Výsledky pro tok</b>			
Odtok	ch_sum_q	m <sup>3</sup> /m	Kumulativní odtok proteklý v toku
Hmotnost sedimentu	ch_sum_sedvol	kg/m	Hmotnost sedimentu proteklá v toku
Čistá eroze	ch_netero	t/ha	Čistá eroze v povodí pixelu toku
Jíl	ch_t	-	Frakce jílu v sedimentu toku
Prach	ch_u	-	Frakce prachu v sedimentu toku

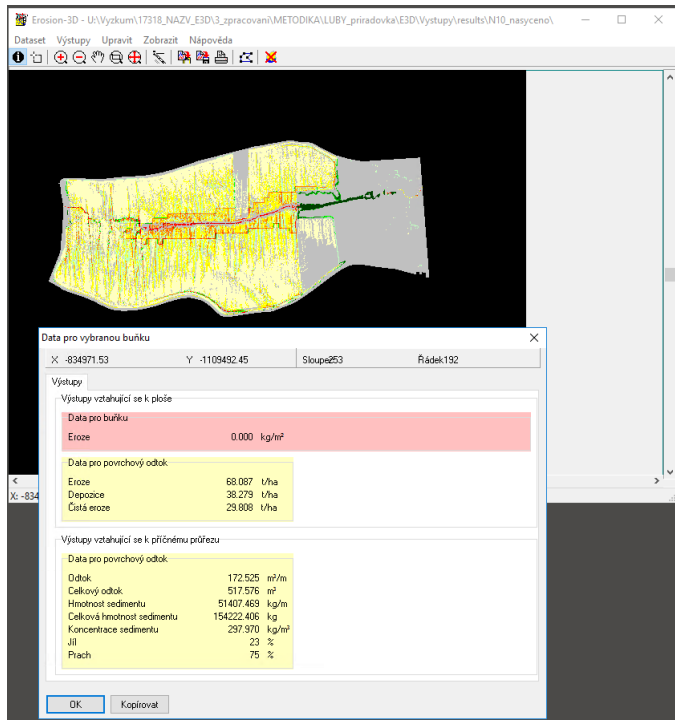
## **POZOR**

- U výsledků vztažených ke hraně (šířce) pixelu (odtok, objem sedimentu, ... obecně rastry mající jednotku .../m) je třeba pro zjištění celkového množství násobit velikostí hrany pixelu (u pixelu 5\*5 m násobíme \*5)
- U výsledků vztažených k ploše pixelu (sedbudget, jednotka .../m<sup>2</sup>) je třeba pro zjištění celkového množství erodovaného/deponovaného materiálu pro daný pixel násobit plochou pixelu (u pixelu 5\*5 m násobíme \*25)
- U rastru sedbudget je doporučeno převést jednotky na obecně používané t/ha (1 kg/m<sup>2</sup> = 10 t/ha)
- U rastru sedbudget záporné hodnoty reprezentují erozi, kladné depozici

Struktura tabelárních výsledků v souboru pp\_data.csv je uvedena na Obr. 29. Ve sloupci A a B je uveden údaj o časovém kroku simulace, sloupce C – E určují ID a souřadnice uzávěrového profilu. Sloupce F – T určují hodnoty jednotlivých výsledků pro daný uzávěrový profil v daném časovém intervalu. Jednotky odpovídají jednotkám v rastrech. **Výsledky se ukládají kumulativně**, poslední interval tedy

udává hodnoty v sumě za celou událost. Z těchto dat je možné získat informace o časovém průběhu erozní události a sestavit například hydrogram či sedimentogram události. Hodnota -9999 znamená, že v UP nenastal odtok a hodnota není k dispozici.

- Chceme-li pouze rychle zjistit výsledné hodnoty výsledků pro konkrétní pixel, aniž bychom dopředu tvořili vrstvu uzávěrových profilů a zkoumali pp\_data.csv, je možné získat informace přímo v prohlížeči výsledků v EROSION-3D na kartě Výsledky – Zobrazit dataset výstupů. Po zadání složky s výsledky se otevře prohlížeč se zobrazeným rastrem výsledku, kde je možné tlačítkem ⓘ kliknout na konkrétní pixel a zobrazí se tabulka s výsledky k poslednímu časovému kroku (kumulativně za celou událost). Hodnoty je možné kopírovat a vložit např. do excelu či textového editoru (Obr. 28).



Obr. 28: Prohlížeč výsledků programu EROSION-3D

A časové určení		B určení UP			F pixel kg/m <sup>2</sup>	G m <sup>3</sup> /m	H kg/m	I povodí pixelu					M t/ha	N t/ha	O m <sup>3</sup> /m	P povodí pixelu toku			R kg/m	S kg/m	T pixel mm/min
Date	Time	ID	Row	Col	Sedbudget	Runoff	Sedvol	Sedconc	Clay	Silt	Totero	Totdep	Netero	ChRunoff	ChSedvol	ChNetEro	ChClay	ChSilt	Q_Cell		
1. krok	03.05.2013 12:00:00	1	98	326	0	0.29	6.1	21.0	19	79	0.00	0.00	0.00	47.6	789.8	0.1	97.1	538.9	0.0		
	03.05.2013 12:00:00	2	456	804	0	46.82	1842.2	39.3	15	74	3.42	3.27	0.15	136.4	6841.0	0.6	1143.4	5164.2	0.0		
	03.05.2013 12:00:00	3	968	1093	0.022	0.28	0.2	0.9	17	83	0.00	0.00	0.00	104.2	3465.6	0.1	646.7	2777.7	0.0		
2. krok	03.05.2013 12:05:00	1	98	326	0	0.29	6.1	21.0	19	79	0.00	0.00	0.00	47.6	789.9	0.1	97.1	539.0	0.0		
	03.05.2013 12:05:00	2	456	804	0	46.86	1843.7	39.3	15	74	3.42	3.27	0.15	136.5	6851.2	0.6	1145.3	5172.4	0.0		
	03.05.2013 12:05:00	3	968	1093	0.022	0.28	0.2	0.9	17	83	0.00	0.00	0.00	104.2	3466.0	0.1	646.8	2778.1	0.0		

Obr. 29: Ukázka souboru pp\_data.csv s tabelárními výsledky simulace pro uzávěrové profily. Zobrazeny jsou první dva časové intervaly simulace.

---

## INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

---

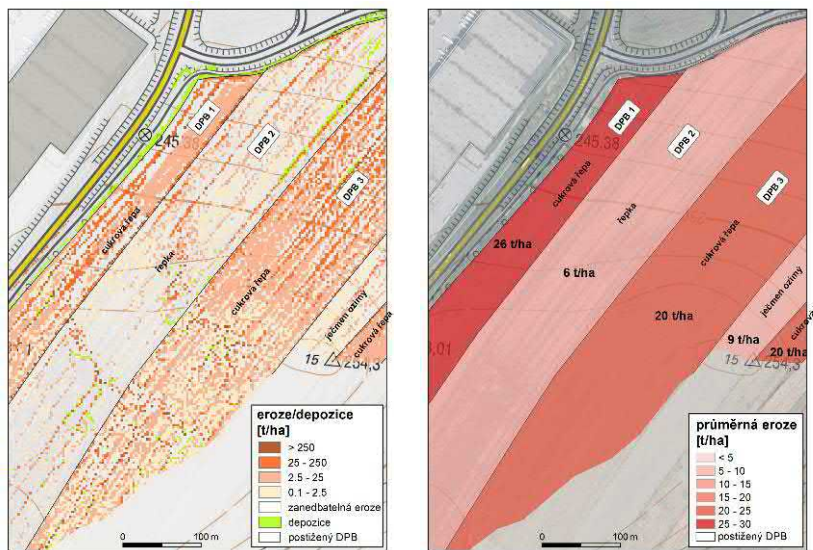
Interpretace výsledků je nutně závislá od cílů modelování. Zde na příkladu uvedeme interpretaci výsledků pro hodnocení erozní události, hodnocení různých návrhů protierozních opatření a dimenzování protierozních opatření na návrhové srážky.

Pro většinu běžných úloh jsou nejdůležitější rastrové výsledky eroze/depozice v pixelu (*sedbudget.asc*) a hmotnost sedimentu proteklého pixelem (*sum\_sedvol.asc*) a tabelární výsledky vztažené k uživatelem zadaným uzávěrovým profilům (*pp\_data.csv*). Rastrové výsledky jsou důležité pro vizuální zhodnocení situace a identifikaci klíčových lokalit pro zaměření ochrany proti erozi. Data k uzávěrovým profilům jsou využitelná dle účelu uzávěrového profilu. Např. pro dimenzování technických protierozních opatření, identifikaci míry ohrožení konkrétních objektů, znečištění vodních toků aj.

Rastr eroze/depozice v pixelu (*sedbudget.asc*) (Obr. 30 vlevo) udává výslednou bilanci materiálu v pixelu na konci události. Rastr udává, kolik materiálu je odkud vlivem modelované srážky erodováno, či naopak kolik materiálu se kde usadí. Z rastru lze tedy identifikovat hlavní zdrojové plochy materiálu, případně plochy, kde se sediment usazuje. Na základě něj lze identifikovat lokality s potřebou plošné ochrany před erozí – plochy vhodné pro setí/sázení ochranných plodin, zatravnění atd.

Tento rastr se může na první pohled zdát hůře čitelný, a tedy obtížně interpretovatelný. Proto je dále vhodné jej analyzovat, kvantifikovat a interpretovat koncovému uživateli výsledků pomocí zonálních statistik. Na Obr. 30 vpravo je vizuálně zobrazena průměrná eroze na dílech půdního bloku (DPB), tentýž výsledek je kvantifikován včetně přepočtu

na celkovou erozi na DPB v Tab. 4. Ze zonálních statistik vyplývá, že problematické byly obecně DPB s cukrovou řepu (eroze  $\geq 20$  t/ha), nejproblematictější je DPB 1.



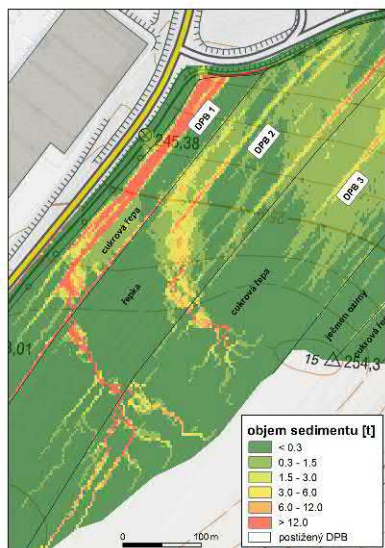
Obr. 30: Ukázka výsledku eroze/depozice v pixelu (sedbudget). Vlevo rastr sedbudget vytvořený modelem EROSION-3D, vpravo rastr interpretovaný zonální statistikou – průměrná eroze na DPB.

Tab. 4: Zonální statistika spočtená nad výsledkem sedbudget pro jednotlivé díly půdních bloků. Vyjadřuje průměrný smyv z hektaru plochy a celkovou erozi na ploše pozemku.

DPB	Plodina	Plocha (ha)	Průměrný smyv na DPB (t/ha)	Celková eroze (t)
1	cukrová řepa	5.2	26	135
2	řepka	10.0	6	60
3	cukrová řepa	10.1	20	202

Hmotnost sedimentu proteklého pixelem (*sum\_sedvol.asc*) (Obr. 31) je vhodný pro identifikaci hlavních drah odtoku sedimentu v ploše povodí. Na základě něj lze identifikovat lokality vhodné pro přerušení či zpomalení odtoku, výsadbu vegetace zachycující transportovaný materiál aj. (např. zatravnění údolnic, přerušovací pásy, technické prvky jako průlehy, příkopy, poldry). Důležité je sledovat kam dráhy vedou, a tedy zda jsou sedimentem ohroženy nějaké objekty a jaké. Na Obr. 31 je vidět velmi výrazná dráha odtoku sedimentu na DPB 1 (tvoří se na DPB 3 a tekoucí přes DPB 2). Dráha teče až k patě pozemku (a dále příkopem a vpustí do toku). Menší se tvoří na DPB 3 a pokračuje na DPB 2. Většina sedimentu se ovšem k patě pozemku nedostane.

Na DPB 1 se sešla nepříznivá kombinace vysoké eroze a odtoku sedimentu mimo zemědělské pozemky (znečišťování vodního toku).

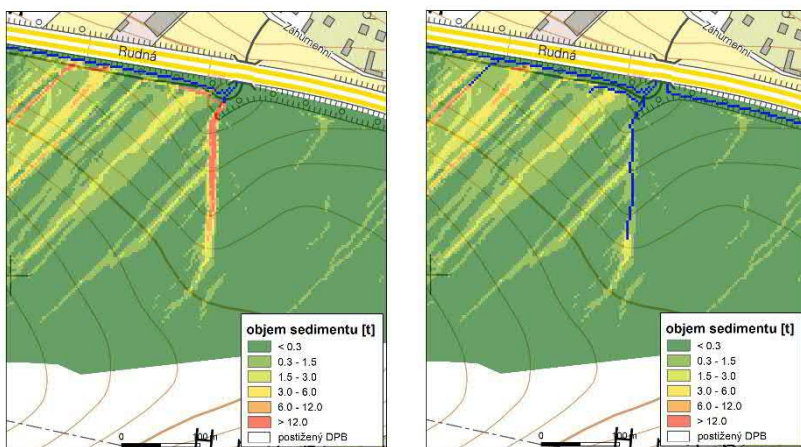


Obr. 31: Ukázka výsledku Objem sedimentu proteklý pixelem (*sum\_sedvol*). Červená, případně oranžová barva identifikuje hlavní transportní trasy erodovaného materiálu.

Objem sedimentu proteklý pixelem v toku (*ch\_sum\_sedvol*) je vhodný pro analýzu znečištění toků sedimentem, případně pro identifikaci úseků toku, kde dochází k výraznému navýšení objemu, a tedy vstupu sedimentu do toku z okolí.

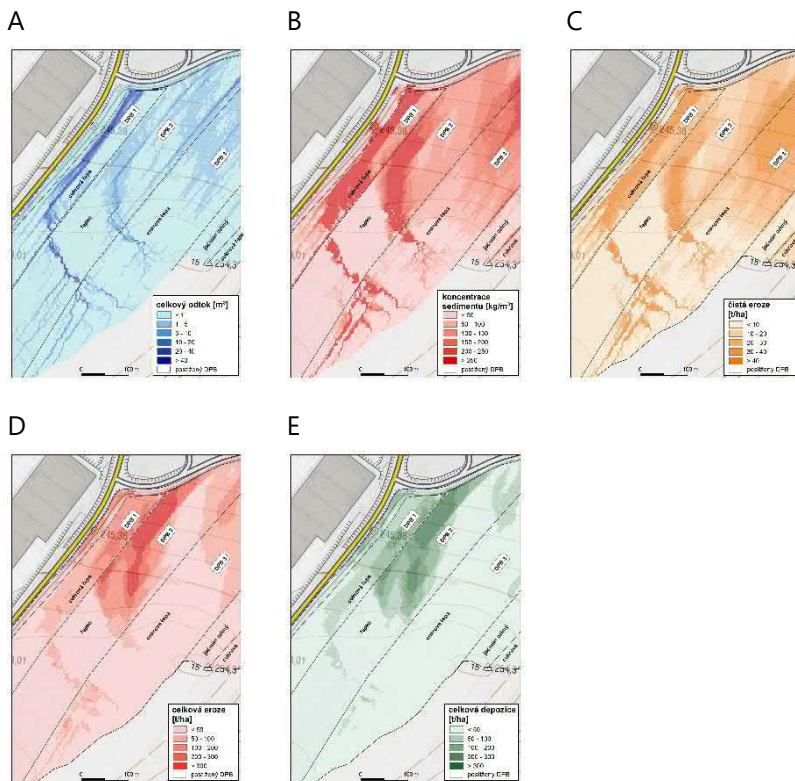
## POZOR

- Pro správnou reprezentaci výsledků je nutné dobře definovat tokovou síť. Definice toku závisí na uživatelem zadané velikosti přispívající plochy na záložce Reliéf – Možnosti datasetu reliéfu – Toková síť nastavením pole příspěvková plocha [m<sup>2</sup>]. Zadáme-li příliš malou přispívající plochu, tok se vytvoří již v místě, kde je povrchový odtok koncentrován do odtokových drah. V plošných rastrech pro povodí tak nezaznamenáme žádnou erozi/depozici či transportovaný sediment, ačkoliv právě tam bude největší. Hodnoty se projeví nesprávně v rastrech pro tok.



Obr. 32: Ukázka rozdílu v rastru *sum\_sedvol* mezi zadanou adekvátní přispívající plochou (vlevo) - tok se vygeneroval pouze v příkopu na patě pozemku, na pozemku je vidět údolnice s vysokým transportem sedimentu, a příliš malou přispívající plochou (vpravo) - tok se vygeneroval v údolnici, v rastru *sum\_sedvol* nelze rozpoznat vysoký transport sedimentu. Transport by se projevil v rastru *ch\_sum\_sedvol*.

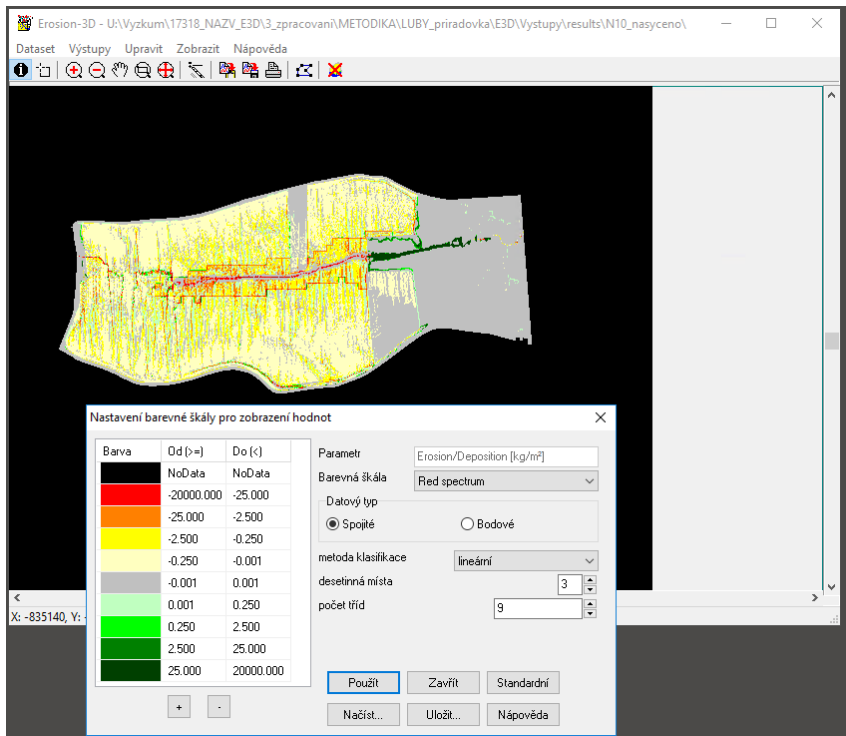
Další rastry jsou spíše pomocné, případně slouží pro specifické použití. Rastr *Sum\_q.asc* vyjadřuje kumulativní odtok vody. Tento rastr je vhodné použít pro kalibraci a kontrolu správného nastavení infiltračního submodulu. Ostatní rastry autoři metodiky prakticky nevyužívají. Informace o nich je možné získat v manuálu modelu (von Werner 2021).



Obr. 33: Ukázka dalších výsledků modelu EROSION-3D. A) *sum\_q*, B) *sedconc*, C) *netero*, D) *totalero*, E) *totaldep*

## TIPY:

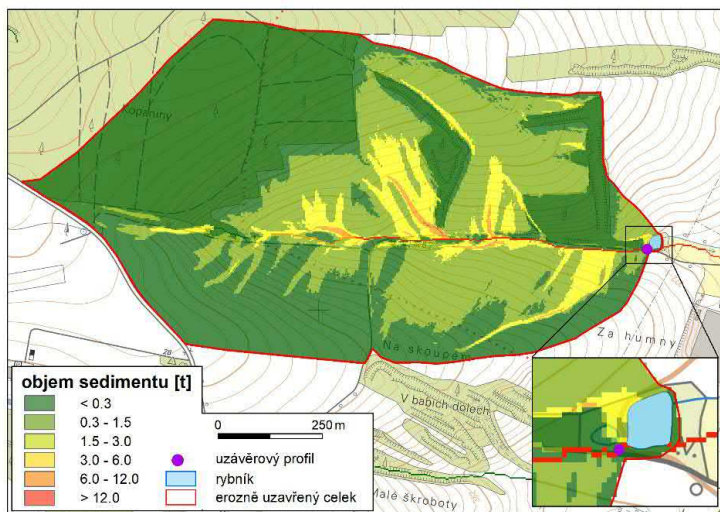
- U zobrazení rastrových vrstev je pro správnou interpretaci výsledků důležitá volba legendy. Zásadní je v rámci hodnocení jedné lokality dodržet jednotné legendy ve všech scénářích, aby mezi scénáři byl na první pohled vidět rozdíl.
- Inspirovat se lze defaultními legendami v programu EROSION-3D pod záložkou *Výsledky - Zobrazit dataset výstupů - Zobrazit - Nastavení barevné škály* (konkrétní zobrazovaný rastr je vybrán ve *Výsledky - Možnosti zobrazení výsledků*) (Obr. 34).



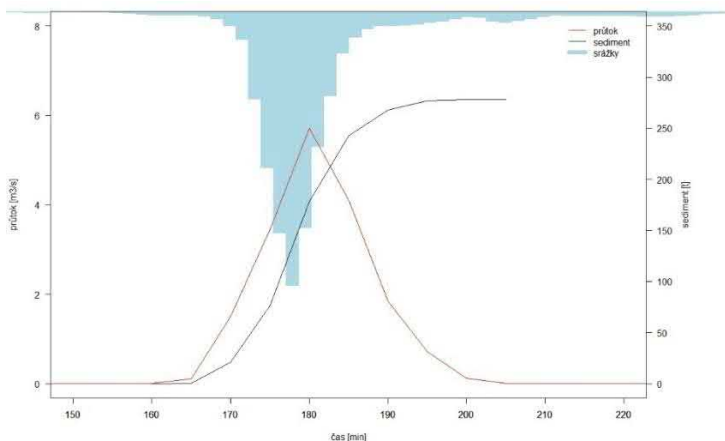
Obr. 34: Přednastavená legenda programu EROSION-3D k výsledku sedbudget.

Kombinace rastrů *sedbudget* a *sum\_sedvol* je vhodná pro identifikaci ohrožených objektů, vodních toků a nádrží, jelikož z nich zjistíme odkud, kudy a kam je materiál transportován.

Údaje pro uzávěrový profil lze vyhodnotit na základě souboru *pp\_data.csv*. Na příkladu na Obr. 35 je uzávěrový profil umístěn na občasném toku před vtokem do malé sedimentační nádrže. Na Obr. 36 je zobrazen graf průběhu erozní události – hydrogram, kde lze vidět maximální průtok (cca 6 m<sup>3</sup>/s), kumulativní sedimentogram (celkem UP proteklo cca 370 t materiálu) a průběh srážek. Při tvorbě grafů ze souboru *pp\_data.csv* je třeba dbát na jednotky, časový krok a rozměr pixelu. U některých výsledků je třeba přepočítávat. Uvedená data lze porovnat s kapacitou nádrže a hodnotit rychlost jejího zanášení, kapacitu aj. Obdobně lze dimenzovat či hodnotit např. kapacitu propustků, příkopů, průlehů, sledovat kolik vody a materiálu odtéká do intravilánu, toku aj.



Obr. 35: Umístění uzávěrového profilu na toku těsně před vtokem do sedimentační nádrže.



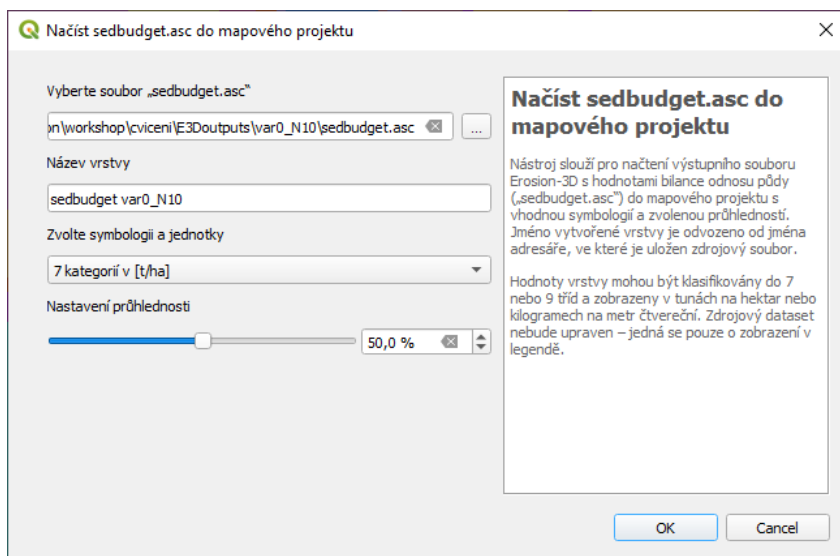
Obr. 36: Vizualizace výsledků k uzávěrovému profilu na Obr. 35 ze souboru pp\_data.csv. Červenou barvou zobrazen je hydrogram, černou barvou kumulativní průtok sedimentů. Modrý sloupcový graf zobrazuje časovou řadu srážek.

## NÁSTROJE E3D+GIS PRO ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ



Vložení výstupního rastru bilance sedimentu (sedbudget.asc) do aktuálního projektu urychluje postprocessing výstupů simulace tím, že nabízí uživateli připravené vhodné symbologie pro zobrazení tohoto datasetu. K dispozici jsou barevné škály klasifikované do 7 nebo 9 tříd v [t/ha] nebo [kg/m<sup>2</sup>]. Zároveň je možné rovnou nastavit hodnotu průhlednosti vložené vrstvy.

Název vkládané vrstvy je odvozen od nadřazené složky datasetu sedbudget.asc, viz Obr. 37.



Obr. 37: Dialogové okno nástroje pro vložení bilance sedimentu do mapového projektu

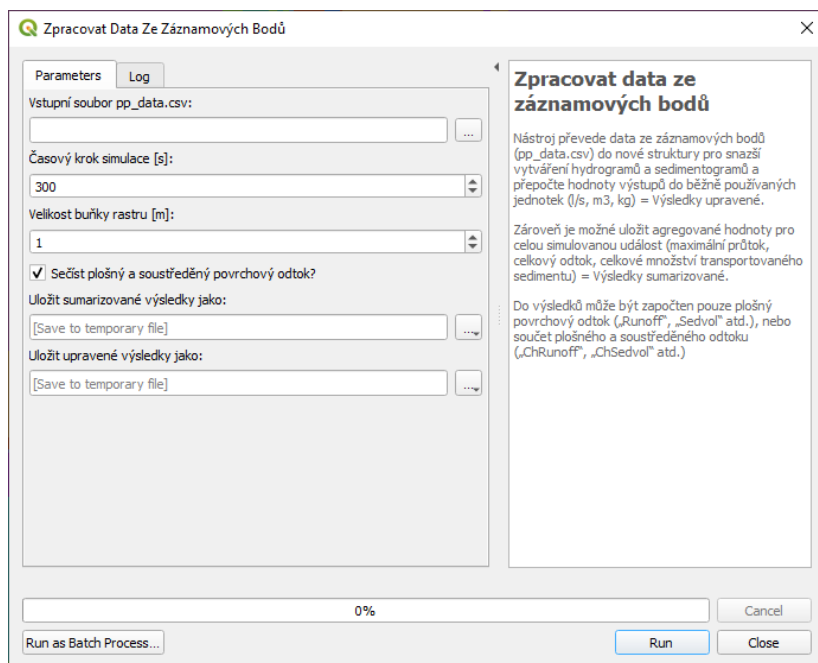


Nástroj pro zpracování dat ze záznamových bodů (pp\_data.csv) transformuje zapsané hodnoty záznamu pro jejich snazší další zpracování a vypočte některé popisné charakteristiky výstupních

datových řad pro každý ze záznamových bodů (maximální průtok [l/s], celkový objem odtoku [m<sup>3</sup>], celkové množství sedimentu [kg] a zastoupení jílových a prachových částice v sedimentu [%].

Hodnoty zapsané ve výstupním souboru jsou vztaženy na metr šířky svahu za jeden výpočetní krok. Pro přepočet do absolutních hodnot vztažených k ploše buňky a času je potřeba zadat délku hrany buňky použitých rastrových vstupů a délku trvání časového kroku.

Výsledky jsou seřazeny primárně podle čísla záznamového bodu a sekundárně podle času simulace, což usnadní vytváření hydrogramů a sedimentogramů ze získaných výsledků.



Obr. 38: Dialogové okno nástroje pro zpracování výsledků ze záznamových bodů

## I.5 PŘÍPADOVÁ STUDIE

---

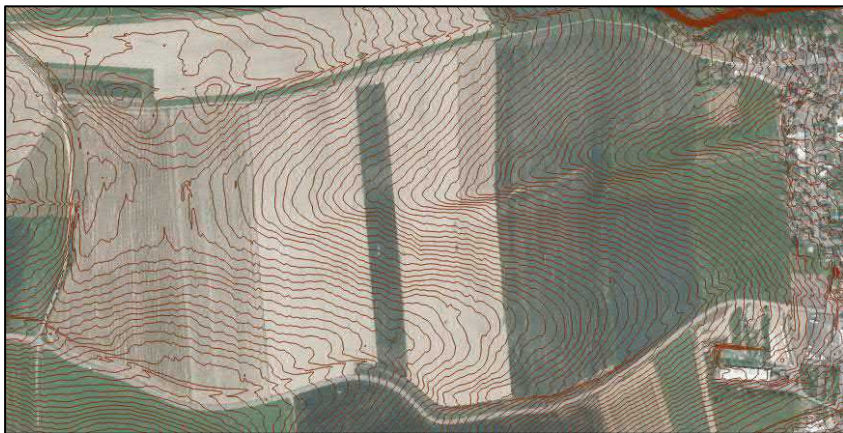
V následujících kapitolách bude na jednoduché případové studii postupně popsáno použití modelu od začátku do konce. Uživatel bude proveden přípravou jednotlivých datových souborů modelu, vstupních parametrů, postupem sestavení modelu včetně různých voleb nastavení a našich doporučení a bude seznámen s jednotlivými výstupy modelu a jejich interpretací. U jednotlivých vstupních souborů a parametrů budou uvedeny zdroje dat pro jejich získání a metody jejich zpracování.

Případová studie je situována v okrese Klatovy, kde došlo na polích nad vesnicí k opakované vodní erozi. Jedná se o mírně svažité erozně uzavřený blok, jehož středem směřuje k vesnici cca 1 km dlouhá údolnice. V rámci případové studie je modelován stav při erozní události z 1. 6. 2016, kdy byla na erozně uzavřeném celku pěstována převážně kukuřice, v době události málo vzešlá, dále ozimá obilovina a travní porost nad vesnicí. Srážka trvala 30 minut, s celkovým úhrnem 18 mm.

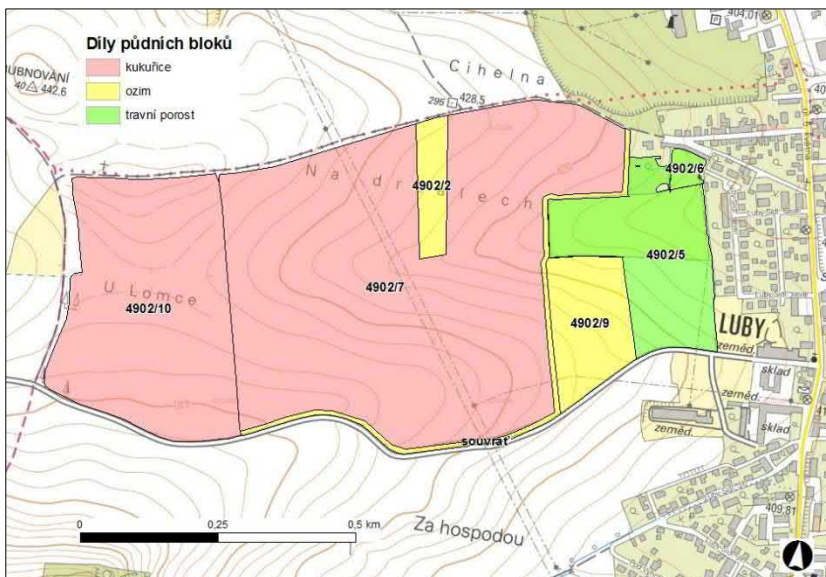
V rámci studie bude modelováno:

- Scénář č. 1 – stav při erozní události
- Scénář č. 2 – návrh protierozního opatření – vyloučení erozně nebezpečných plodin (VENP) – na DPB s kukuřicí je pěstována ozimá obilovina
- Scénář č. 3 – návrh protierozního opatření – zatravnění údolnice
- Scénář č. 4 – návrh protierozního opatření – svodný průleh

Všechny scénáře budou vytvořeny pro návrhovou srážku N10 (ochrana zemědělské půdy dle normy ČSN 75 4500) a N50 (ochrana intravilánu dle normy ČSN 75 4500).



Obr. 39: Ortofoto snímek postíženého území s vrstevnicemi



Obr. 40: Využití území na erozně uzavřeném celku během erozní události 1. 6. 2016



*Obr. 41: Fotodokumentace erozní události 1. 6. 2016 – vlevo akumulace sedimentu na rozhraní kukuřice a zatravnění, vpravo odtoková dráha směřující k vesnici*

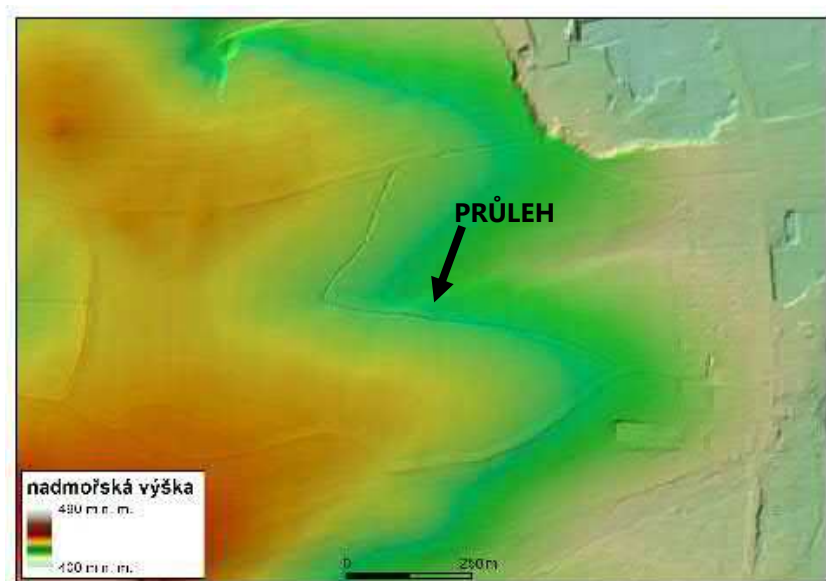
## **PŘÍPRAVA DATOVÉ SADY RELIÉFU**

### ***Tvorba DMT a datové sady reliéfu***

Vstupním podkladem pro datovou sadu reliéfu v území případové studie je rastr DMT 3x3 m, odvozený z podkladu DMR 5G (© ČÚZK). Tento rastr definuje rozsah a rozlišení všech ostatních uživatelem i modelem vytvořených rastrů:

```
ncols      650
nrows     513
xllcorner -835727.53
yllcorner -1110457.45
cellsize   3
NODATA_value -9999
```

Pro scénář č. 1 – 3 je použit základní DMT. Pro scénář č. 4 je nutné do DMT vypálit svodný průleh. Průleh je veden napříč územím ve sklonu cca 1 %, má šířku 3 m (1 pixel) a hloubku 1 m (Obr. 42).



Obr. 42: Digitální model reliéfu pro scénář č. 4 (svobodný průleh).

Datová sada reliéfu byla vytvořena v menu *Reliéf* programu EROSION-3D. Na kartě *Možnosti datasetu reliéfu* bylo nastaveno:

- a) *Směrování odtoku*: algoritmus *divergentní (FD8)*. Modelujeme především v ploše a chceme, aby byl odtok směrován proporcionálně do všech buněk s nižší nadmořskou výškou.
- b) *Toková síť*: Jelikož v území není žádný tok a není žádoucí, aby si model vytvořil koryto soustředěného odtoku v údolnici, je *Kritická zdrojová plocha* zvýšena stonásobně (80 000 m<sup>2</sup>).
- c) Ostatní záložky jsou ponechány v základním nastavení.

Datová sada byla následně vytvořena na kartě *Dataset reliéfu* nahráním *Rastr DMR*, spuštěním tlačítka *Vytvořit dataset* a zadáním složky pro uložení datové sady reliéfu.

---

### ***Vrstva uzávěrových profilů***

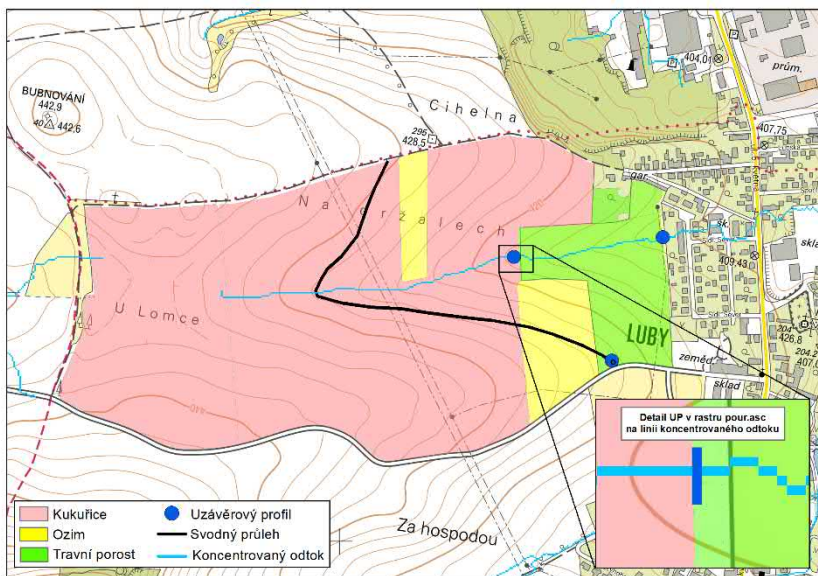
---

Do datové sady reliéfu byla manuálně přidána vrstva *pour.asc* obsahující uzávěrové profily.

V rámci lokality Luby nás zajímá:

- 1) Množství sedimentu transportovaného z kukuřice = UP v údolnici na rozhraní kukuřice a zatravněného DPB
- 2) Sedimentační účinek zatravněného DPB a vstup sedimentu z údolnice do zástavby = UP v údolnici na rozhraní zemědělské půdy a zástavby
- 3) U scénáře č. 4 vliv svodného průlehu a údaje pro dimenzování navazujícího odvodnění = UP na konci průlehu

Je tedy vytvořena vrstva se 3 uzávěrovými profily (Obr. 43). Jelikož v údolnici není vytvořen korytový odtok, v ní ležící UP mají šíři několika pixelů o stejném ID.



Obr. 43: Uzávěrové profily a detail jejich polohování na linii koncentrovaného odtoku

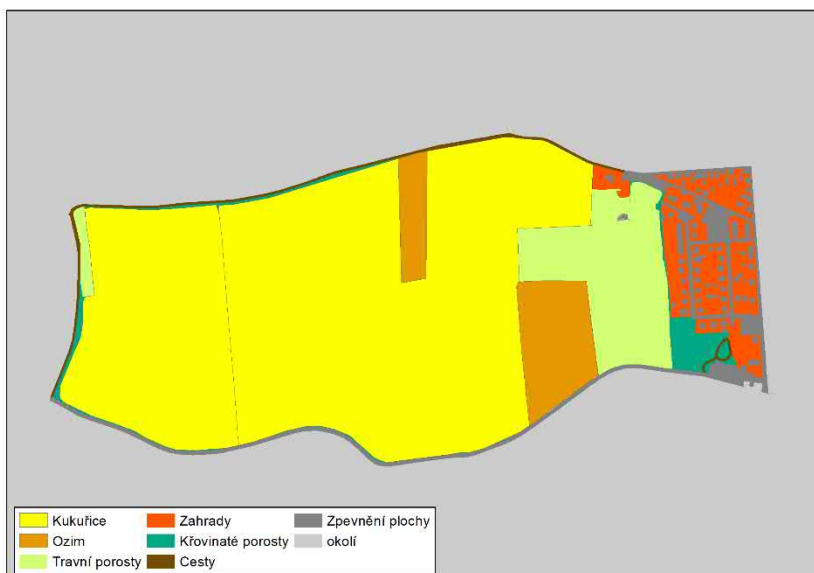
## PŘÍPRAVA DATOVÉHO SOUBORU PŮD

Datový soubor půd byl pro případovou studii vytvořen tabelárním přístupem s využitím nástroje E3D+GIS. Vytvořeny byly tedy vektorová vrstva využití ploch a vrstva půdních vlastností. Pomocí nástroje E3D+GIS byla vytvořena ascii vrstva parametrizačních ploch, tabulka parametrů a propojující tabulka. Následně byla v programu EROSION-3D vytvořena datová sada půd.

### Vrstva využití ploch

Vrstva využití ploch byla vytvořena kombinací vrstev ZABAGED a LPIS. Na zájmových půdních blocích orné půdy byla následně specifikována plodina. Veškerým plochám mimo zájmové území byla

přiřazena kategorie *Okolí* (Obr. 44). V atributové tabulce vrstvy byly specifikovány sloupce využití ploch a plodiny.



Obr. 44: Vstupní vrstva využití území do nástroje E3D+GIS složená z vrstev ZABAGED a LPIS

### ***Vrstva půdních vlastností***

Pro vrstvu půdních vlastností byla využita mapa zrnitostních tříd v klasifikačním systému KA5 (Beitlerová et al. 2021b). Rastrová mapa byla generalizována tak, aby byly odstraněny malé několikapixelové plošky a zůstaly naopak větší homogenní celky. Rastrová vrstva byla převedena na vektor a dále zjednodušena tak, že na plochách, kde se vyskytuje jiná než orná půda, byly plochy půdních vlastností sjednoceny (Obr. 45). Pro plochy typu zástavba, les atd. není zrnitostní kategorie podstatná a zjednodušení vrstvy zpřehlední následnou parametrizaci pomocí nástroje E3D+GIS a zrychlí výpočetní čas modelu EROSION-3D.



Obr. 45: Vstupní vrstva půd do nástroje E3D+GIS - Generalizovaná mapa zrnitostních kategorií KA5

## **Odvození vstupních parametrů**

Vstupní parametry byly připraveny dle dostupnosti dat čtyřmi způsoby (Tab. 5):

*Tab. 5: Zdroj parametrů a způsob jejich zpracování pro ornou půdu*

<b>Parametr</b>	<b>Zdroj dat</b>	<b>Způsob zpracování</b>	<b>Soubor</b>
Zrnitost půdy	Mapy jílu, prachu a písku v klasifikaci KA5 (Beitlerová et al. 2021b)	Zonální statistika	Vrstva půdních vlastností
Objemová hmotnost	E3D+GIS	Poloautomatické odvození z katalogu parametrů	
Obsah organického uhlíku	Mapa organického uhlíku (Žížala et al. 2020)	Zonální statistika	Vrstva půdních vlastností
Počáteční vlhkost	E3D+GIS	Poloautomatické odvození z katalogu parametrů	
Drsnost	E3D+GIS	Poloautomatické odvození z katalogu parametrů	
Vegetační kryt	Odhad při terénním průzkumu	Editace atributové tabulky	Vrstva využití ploch

Parametr	Zdroj dat	Způsob zpracování	Soubor
Erodibilita	E3D+GIS	Poloautomatické odvození z katalogu parametrů	
Skinfaktor	Pedotransferová funkce viz str. 55	Editace tabulky parametrů	Tabulka parametrů

- 1) Parametry pro ornou půdu, jejichž hodnoty známe či pro jejich odvození máme vhodný zdroj dat, byly zpracovány do atributové tabulky vrstvy využití ploch či půdních vlastností před použitím nástroje E3D+GIS.
- 2) Parametry pro ornou půdu, jejichž hodnoty neznáme a nemáme pro ně jiný zdroj dat, byly odvozeny pomocí nástroje E3D+GIS.
- 3) Kalibrační parametr skinfaktor pro ornou půdu byl odvozen po použití nástroje E3D+GIS do vygenerované tabulky parametrů pomocí pedotransferových funkcí.
- 4) Veškeré parametry pro jinou, než ornou půdu byly odvozeny na základě zkušenosti autorů metodiky.

Tab. 6: Hodnoty parametrů pro jinou než ornou půdu dle tabulky poskytnuté společně s licencí modelu EROSION-3D

POLY_ID	FT	MT	GT	FU	MU	GU	FS	MS	GS	OBJ. HMOT.	CORG	POČ. VLHK.	ERODIBIL.	DRSNOST	VEG. KRYT	SKINFaktor
les	0	5	0	10	17	24	11	17	16	1000	2.4	39	0.1	0.9	100	18
louka	0	5	0	10	17	24	11	17	16	1300	2.4	39	0.03	0.3	90	10
silnice	0	5	0	10	17	24	11	17	16	2600	2.4	15	1	0.011	100	0.01
voda	0	5	0	10	17	24	11	17	16	2600	2.4	100	1	1	100	100
zahradra	0	5	0	10	17	24	11	17	16	1300	2.4	39	0.03	0.5	90	10
zástavba	0	5	0	10	17	24	11	17	16	2600	2.4	15	1	0.9	100	100
cesta	0	5	0	10	17	24	11	17	16	2600	2.4	15	1	0.015	100	0.05

---

## ***Vstupní soubory datové sady půd***

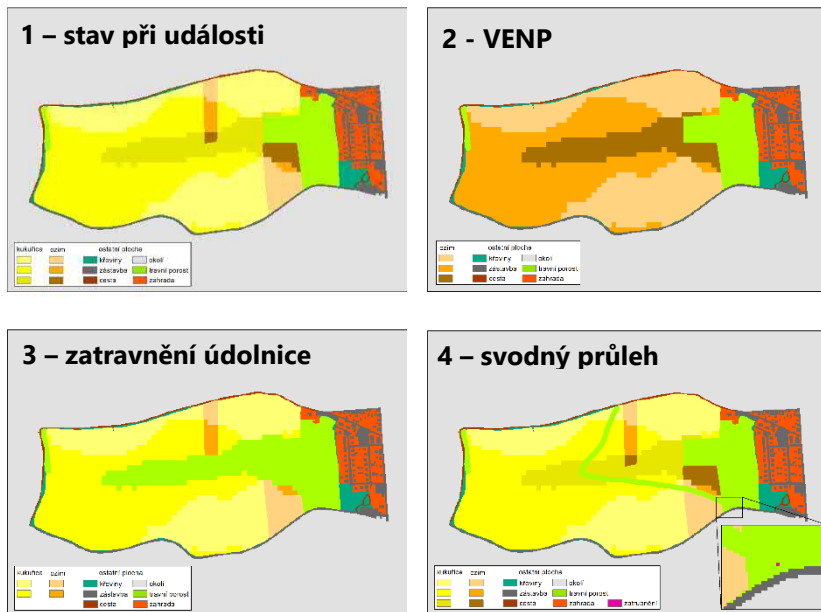
---

Pomocí nástroje E3D+GIS byly vytvořeny vstupní soubory datové sady půd, tedy vrstva parametrizačních ploch, tabulka parametrů a propojující tabulka pro scénář č. 1. Pro všechny tři návrhové scénáře byly vrstva, případně tabulky následně upraveny.

U scénáře č. 2 a 3 byly pouze změněny ID parametrizačních ploch. U scénáře č. 2 – VENP byly plochy kukuřice nahrazeny ozimou obilovinou. U scénáře č. 3 – zatravnění údolnice byly plodiny na plochách zrnitostní třídy Slu, která se nachází pouze v údolnici, nahrazeny travním porostem. Obě tabulky zůstaly beze změny.

U scénáře č. 4 – svodný průleh bylo nutné ve vrstvě parametrizačních ploch nově definovat plochu průlehu, kterému bylo přiřazeno využití travní porost. Zatravnění bylo definováno pásu v šíři 21 m kolem průlehu. Jelikož průleh bude zaústěn do zatrubnění, je nutné ošetřit, aby z něj koncentrovaná voda a sediment neodtékaly povodím dále. Proto byla vytvořena zcela nová kategorie parametrizační plochy „zatrubnění“, která byla přiřazena pouze jednomu pixelu situovanému v nejnižším bodě průlehu. Pro tuto kategorii byla hodnota počáteční vlhkosti 0, což zajistí, že veškerá přitékající voda bude infiltrována. Parametrizační plocha zatrubnění byla přidána do atributové tabulky a propojující tabulky.

Přehled vrstev parametrizačních ploch pro scénáře č. 1 – 4 je zobrazen na Obr. 46. Tabulka parametrů je uvedena v Tab. 7 a propojující tabulka je uvedena v Tab. 8. Obě tabulky jsou jednotné pro všechny 4 scénáře.



Obr. 46: Parametrizační plochy pro scénáře č. 1 – 4.

Tab. 7: Tabulka parametrů obsahující sadu parametrů pro všechny parametrizační plochy přítomné ve scénářích 1 – 4

POLY_ID	LAYER_ID	LAYERTHICK	BLK DENSITY	CORG	SKINFACOR	INITMOIST	ROUGHNESS	ERODIBIL	COVER	FT	MT	GT	FU	MU	GU	FS	MS	GS
kukurice_S13	0	1000000	1400	1.3	0.382	30.5	0.015	0.0018	5	0	11	0	0	36	0	0	53	0
kukurice_S14	0	1000000	1400	1.3	0.587	33	0.015	0.0018	5	0	12	0	0	39	0	0	49	0
kukurice_S1u	0	1000000	1350	1.4	0.879	37.5	0.015	0.00076	5	0	13	0	0	42	0	0	45	0
ozim_S13	0	1000000	1500	1.3	0.801	30.5	0.7	0.005	90	0	11	0	0	36	0	0	53	0
ozim_S14	0	1000000	1500	1.3	1.231	33	0.7	0.005	90	0	12	0	0	38	0	0	50	0
ozim_S1u	0	1000000	1480	1.3	2.301	37.5	0.7	0.004	90	0	14	0	0	45	0	0	41	0
trava	0	1000000	1250	10	0.116	30	0.3	0.01	100	0	13	0	0	43	0	0	44	0
zahrada	0	1000000	1250	10	0.116	30	0.3	0.01	100	0	14	0	0	44	0	0	42	0
kroviny	0	1000000	1500	20	1	36.01	0.9	1	100	0	13	0	0	40	0	0	47	0
zpevnene	0	1000000	1900	0	1	51.51	0.9	1	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
cesty	0	1000000	1800	0	1	51.51	0.9	1	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
zatrubneni	0	1000000	1900	0	1	0	0.9	1	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
okoli	0	1000000	1900	0	1	0	0.9	1	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 8: Propojující tabulka pro scénáře 1 – 4.

POLY_NR	POLY_ID
0	okoli
3	trava
4	zahrada
5	kroviny
6	cesty
7	zpevnene
8	zatrubneni
106	kukurice_S13
107	kukurice_S14
108	kukurice_S1u
206	ozim_S13
207	ozim_S14
208	ozim_S1u

---

### ***Datová sada půd***

---

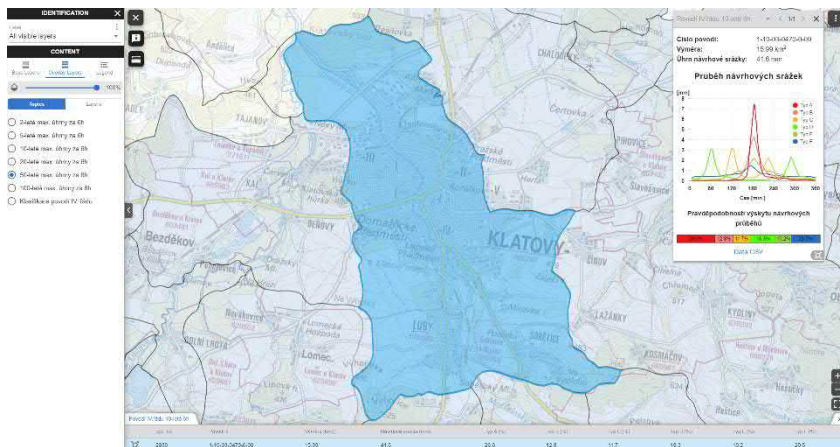
Datová sada půd byla vytvořena v programu EROSION-3D v menu *Půda/Využití ploch* na kartě *semi-distribuovaný dataset půdních parametrů*. Datová sada byla vytvořena zvláště pro všechny 4 scénáře nahráním *Rastru zón*, *Tabulky parametrů* a *Tabulky propojení*. Tvorba datasetu je spuštěna tlačítkem *Vytvořit dataset*. Datová sada pro každý scénář je nahrána do své vlastní složky.

---

### **PŘÍPRAVA SRÁŽKOVÝCH ŘAD**

---

Pro případovou studii byla modelována návrhová srážka N10 a N50. Data byla stažena z webové aplikace dostupné na <https://rain.fsv.cvut.cz>, kde jsou volně stažitelné šestihodinové návrhové srážky pro povodí IV. řádu, a to ve tvaru šesti typických hyetogramů. Data jsou stažena ve formátu \*.csv. V aplikaci je uvedena pravděpodobnost, s jakou bude mít v daném povodí srážka tvar jednotlivých hyetogramů (Obr. 47). Pro povodí, kam spadá erozní událost, je nejtypičtější srážka typu A – jeden výrazný vrchol srážky. Bude tedy použita srážková řada typu A. Srážková data mají 5min časový krok. Celkový úhrn srážky N10 tvoří 41.6 mm, srážky N50 55 mm. Pro rychlejší výpočet byla srážka zkrácena na prostřední 2 hodiny, během kterých spadne 91 % celkového objemu srážky. Srážkové řady byly překlomeny do vstupního souboru *Luby\_N10\_A.csv* a *Luby\_N50\_A.csv* dle Obr. 48. Hodnoty srážek byly vyděleny 5, aby byla získána minutová intenzita.



Obr. 47: Mapový portál <https://rain.fsv.cvut.cz> s dostupnými šestihodinovými návrhovými srážkami

\*Luby\_N10\_A – Poznámkový blok

Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda

Y,M,D,H,M,0  
 Y,M,D,H,M,0  
 Y,M,D,H,M,0  
 Y,M,D,H,M,0  
 Y,M,D,H,M,0  
 Y,M,D,H,M,0  
 2016,6,1,12,0,0.0142  
 2016,6,1,12,5,0.0184  
 2016,6,1,12,10,0.0192  
 2016,6,1,12,15,0.0192  
 2016,6,1,12,20,0.0184  
 2016,6,1,12,25,0.0242  
 2016,6,1,12,30,0.0382  
 2016,6,1,12,35,0.0766  
 2016,6,1,12,40,0.1522  
 2016,6,1,12,45,0.475  
 2016,6,1,12,50,0.8494  
 2016,6,1,12,55,1.204  
 2016,6,1,13,0,1.4892  
 2016,6,1,13,5,1.174  
 2016,6,1,13,10,0.7338  
 2016,6,1,13,15,0.4568  
 2016,6,1,13,20,0.2254  
 2016,6,1,13,25,0.1398  
 2016,6,1,13,30,0.0916  
 2016,6,1,13,35,0.0758  
 2016,6,1,13,40,0.0766  
 2016,6,1,13,45,0.074  
 2016,6,1,13,50,0.0674  
 2016,6,1,13,55,0.06

Obr. 48: Srážka N10 modelovaná v případové studii

---

## SPUŠTĚNÍ MODELU

---

Před samotným výpočtem bylo nastaveno:

1. zpoždění odtoku v menu *Sub modely - Model odtoku*
2. parametry simulace v menu *Simulace - Nastavení ukládání výsledků*:
  - Na kartě *Výstup do tabulky* byl vybrán *Zdroj referenčních bodů Rastr*.
  - Na kartě *Četnost ukládání rastrů* byl všude vybrán *Last interval* (poslední interval). Budou tedy vytvořeny veškeré výsledné rastry, a to k poslednímu časovému kroku simulace, tedy kumulativně za celou událost.
3. Ostatní karty jsou ponechány v základním nastavení.

Model byl následně spuštěn.

---

## VÝSLEDKY A JEJICH INTERPRETACE

---

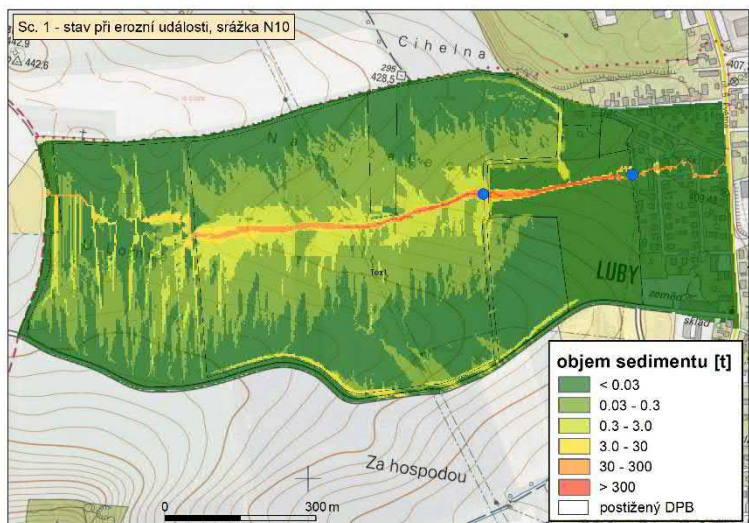
U výsledků modelu nás zajímají rastry vyjadřující transport sedimentu – *sum\_sedvol.asc* (Obr. 49 - Obr. 52) a eroze/depozice v povodí – *sedbudget.asc* (Obr. 53 - Obr. 56).

- Vzhledem k horší čitelnosti rastru *sedbudget.asc* byly vytvořeny zonální statistiky na díly půdních bloků.
- Pro dimenzování protierozní a protipovodňové ochrany nás zajímá, kolik sedimentu a vody projde jednotlivými uzávěrovými profily – *pp\_data.csv*.
- Z výsledků zonálních statistik a tabelárních výsledků *pp\_data.csv* bylo vytvořeno srovnání jednotlivých scénářů a vyhodnocena účinnost opatření.
- Výsledky a jejich interpretace je uvedena v následujících kapitolách.

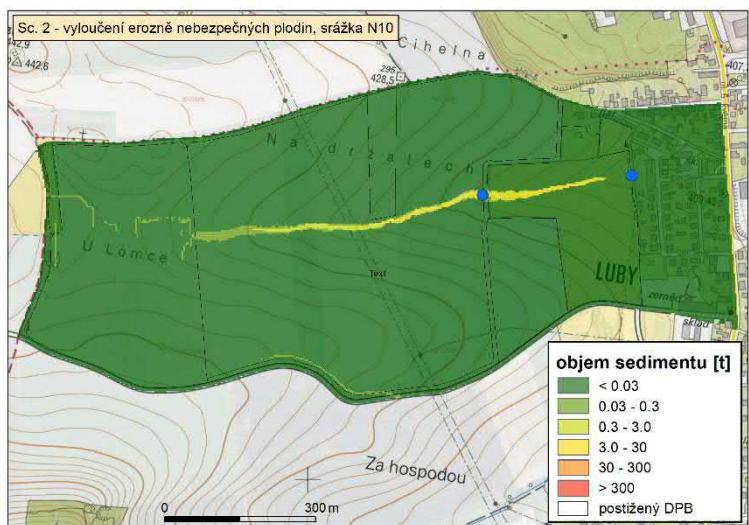
### ***Transport materiálu při srážce N10 – kvalitativní posouzení***

---

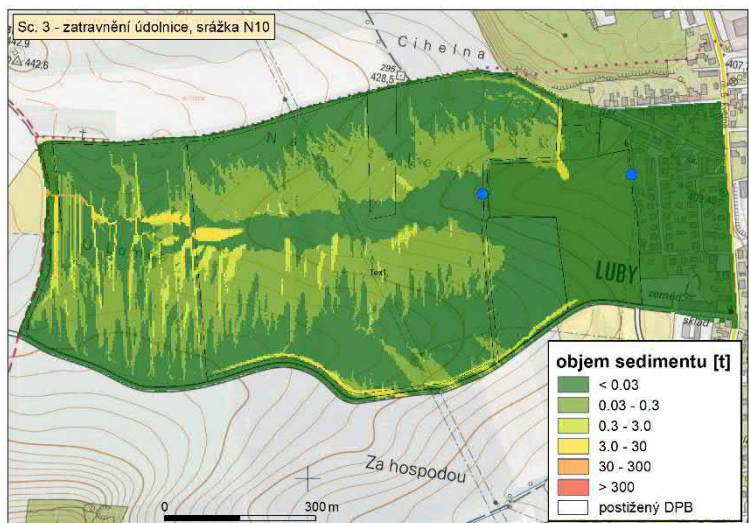
- Scénář 1, stav při erozní události – plošný transport materiálu ze svahů povodí do údolnice, výrazný soustředěný transport materiálu údolnicí, sediment vniká do intravilánu (Obr. 49).
- Scénář 2, vyloučení erozně nebezpečných plodin (ozim místo kukuřice) – eliminace plošného transportu materiálu, transport pouze v údolnici, sediment nedosahuje intravilánu, je zadržen v travním porostu nad vesnicí (Obr. 50)
- Scénář 3, zatravnění údolnice – plošný transport materiálu ze svahů povodí, díky zatravnění v údolnici nedochází ke koncentraci a soustředěnému transportu materiálu směrem k intravilánu (Obr. 51).
- Scénář 4, svodný průleh – plošný transport materiálu ze svahů povodí do údolnice, soustředěný transport materiálu údolnicí, materiál z horní části povodí sveden průlehem, materiál z dolní části povodí transportován na hranu intravilánu. Intravilán nebyl zasažen (Obr. 52).



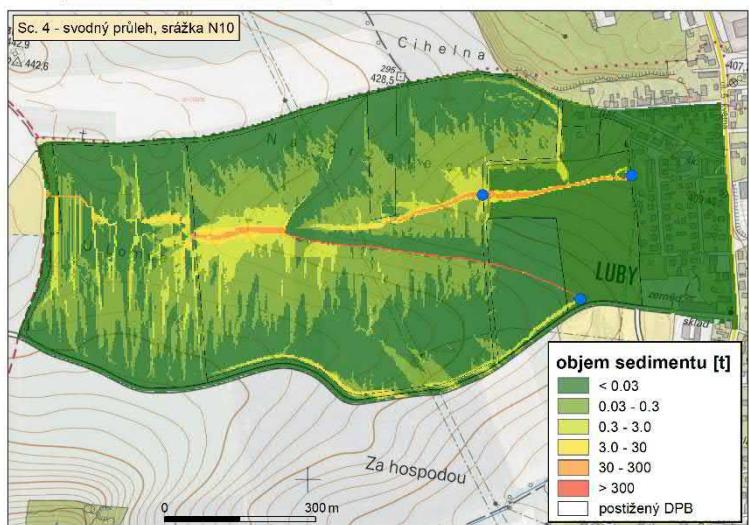
Obr. 49: Transportovaný sediment z povodí při scénáři č. 1 – stav povodí při erozní události, návrhová srážka N10.



Obr. 50: Transportovaný sediment z povodí při scénáři č. 2 – vyloučení erozně nebezpečných plodin, návrhová srážka N10.



Obr. 51: Transportovaný sediment z povodí při scénáři č. 3 – zatravnění údolnice, návrhová srážka N10.



Obr. 52: Transportovaný sediment z povodí při scénáři č. 4 – svodný průleh, návrhová srážka N10.

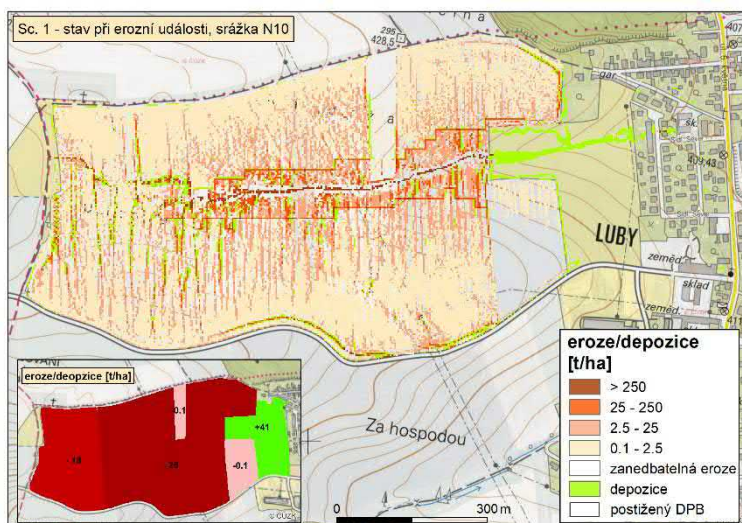
### ***Eroze/depozice v povodí při srážce N10 – kvalitativní posouzení***

- Scénář 1, stav při erozní události - výrazná plošná eroze DPB s kukuřicí (18, resp. 26 t/ha), výrazná rýhová eroze v údolnici, menší rýhy na svazích povodí směřujících k údolnici. Sedimentace v zatravněném DPB nad vesnicí a v zástavbě (Obr. 53).
- Scénář 2, vyloučení erozně nebezpečných plodin (ozim místo kukuřice) - eliminace plošné eroze ( $< 0.5$  t/ha), eroze pouze v údolnici (Obr. 54).
- Scénář 3, zatravnění údolnice - plošná eroze DPB s kukuřicí, sedimentace v zatravněné údolnici (Obr. 55).
- Scénář 4, svodný průleh - výrazná plošná eroze DPB s kukuřicí (18, resp. 16 t/ha), rýhová eroze v údolnici, pod průlehem eroze v údolnici snížena. Sedimentace v zatravněném DPB (Obr. 56).

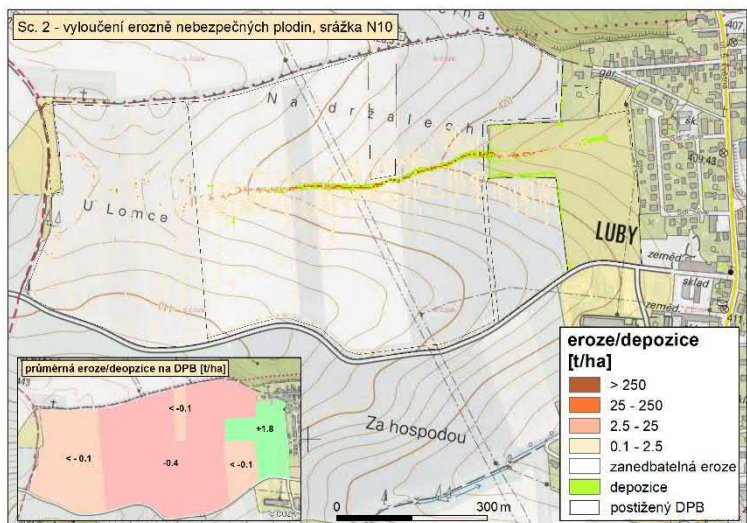
#### **POZNÁMKA**

- EROSION-3D je velmi citlivý na transportní kapacitu povrchového odtoku. Ačkoliv celková eroze v údolnici je výrazně větší u scénáře 1, než u scénáře 2, na hranu zatravněného DPB přitéká ve sc. 1 voda nasycená materiálem, a tedy neschopna erodovat další materiál. V travním porostu dochází k okamžité sedimentaci. Naopak u sc. 2 k zatravněnému DPB přitéká mnohem méně nasycená voda, a tedy s vysokou erozivní schopností a v horní části zatravnění dochází stále k erozi.

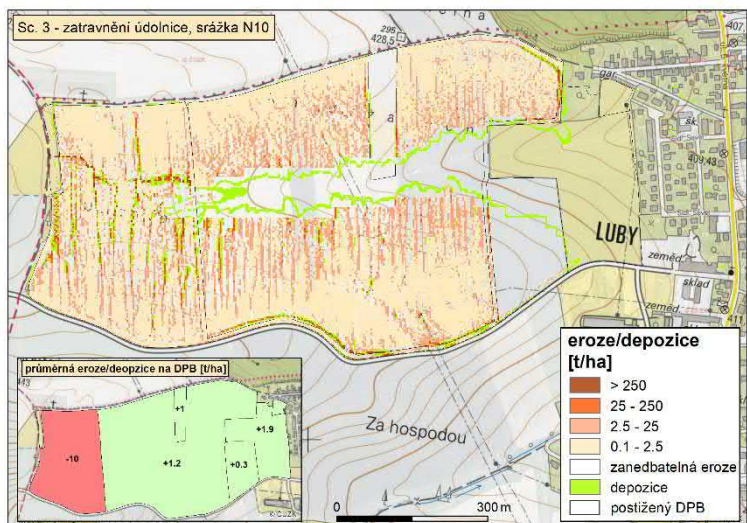
- U scénáře 1 a 4 je vidět zvýšená eroze kolem údolnice. To je dáno změnou půdních vlastností parametrizačních ploch. Na přechodu těchto ploch vznikla ostrá hranice s výraznou změnou eroze. Tento efekt vzniká právě na hranicích, kde dochází k výraznější změně půdních parametrů. Je na uživateli zvážení přenastavení parametrů a vyhlazení hranice, které by tento efekt eliminovalo.



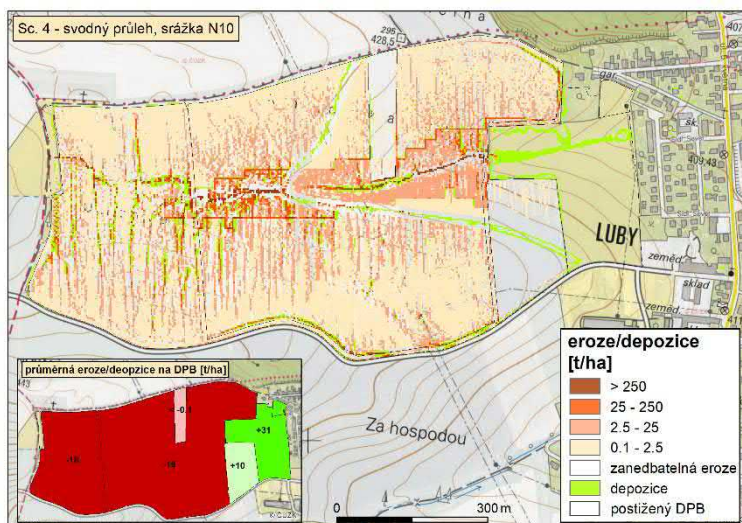
Obr. 53: Eroze/depozice v ploše povodí při scénáři č. 1 – stav povodí při erozní události, návrhová srážka N10.



Obr. 54: Eroze/depozice v ploše povodí při scénáři č. 2 – vyloučení erozně nebezpečných plodin, návrhová srážka N10.



Obr. 55: Eroze/depozice v ploše povodí při scénáři č. 3 – zatravnění údolnice, návrhová srážka N10.



Obr. 56: Eroze/depozice v ploše povodí při scénáři č. 4 – svodný průleh, návrhová srážka N10.

### **Tabelární výsledky – kvantifikace v uzávěrových profilech**

Následky erozní události a vliv jednotlivých opatření v uzávěrových profilech byl kvantifikován pomocí souborů *pp\_data.csv*. Vyhodnocení bylo provedeno tabelárně – množství sedimentu protékého uzávěrovým profilem (Tab. 9) a procentní účinnost protierozních opatření (Tab. 10). Graficky je vyjádřen průtok v uzávěrových profilech (Obr. 57). Pro návrhovou srážku N10 lze vyhodnotit:

- Scénář 1, stav při erozní události – z kukuřice je transportováno 965 t materiálu, do intravilánu z toho vnikne 405 t (42 %), zbytek je sedimentován na zatravněném DPB. Případné odvodnění údolnice je nutno dimenzovat na  $1.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- Scénář 2, vyloučení erozně nebezpečných plodin (ozim místo kukuřice) – z orné půdy je transportováno 12 t materiálu (1 %

oproti SC1), který je sedimentován v zatravněném DPB. Intravilán je tímto opatřením zcela chráněn.

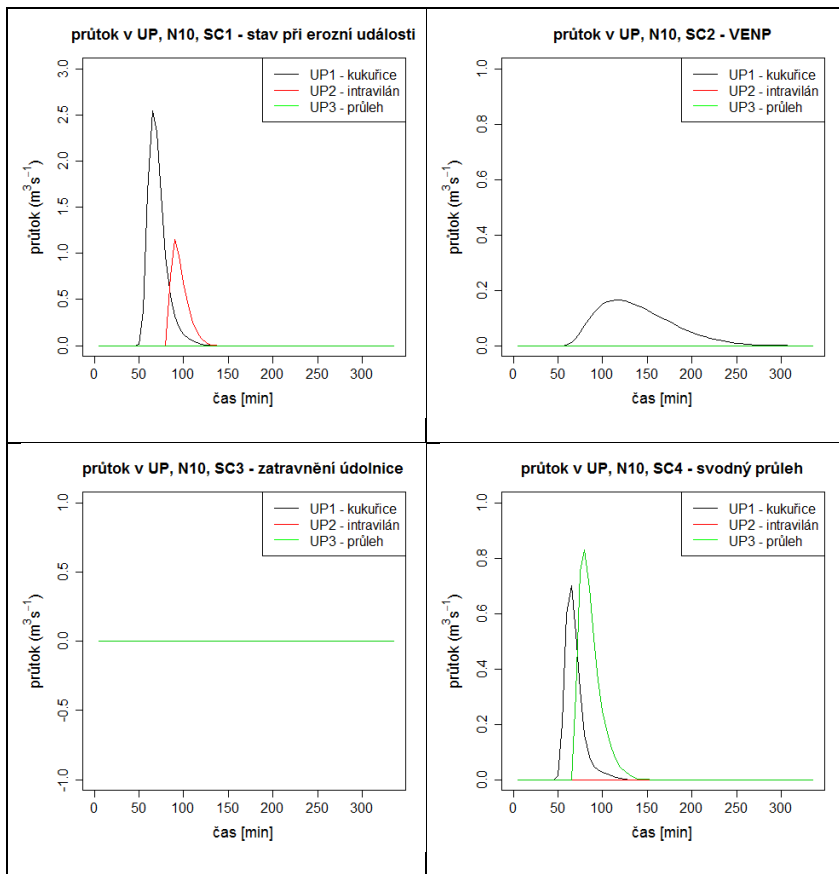
- Scénář 3, zatravnění údolnice – v uzávěrových profilech nedochází k transportu materiálu, účinnost opatření je 100 %.
- Scénář 4, svodný průleh – Transport materiálu z kukuřice je snížen na 241 t (25 % oproti SC1). Ten je sedimentován na zatravněném DPB a do intravilánu se nedostává. Průleh odvede 374 t (39 %) materiálu z kukuřice. Maximální průtok, na který je nutno dimenzovat průleh a návazné odvodnění, je  $0.9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Tab. 9: Množství sedimentu proteklého uzávěrovým profilem při návrhové srážce N10 a N50

Uzávěrový profil	Množství sedimentu proteklého uzávěrovým profilem [t]							
	N10				N50			
	SC1	SC2	SC3	SC4	SC1	SC2	SC3	SC4
1 - transport z kukuřice	965	12	0	241	1950	52	0	469
2 - vnik do intravilánu	405	0	0	0	1762	0	0	33
3 - odvedeno průlehem	-	-	-	374	-	-	-	1072

Tab. 10: účinnost protierozních opatření – procento materiálu proteklého uzávěrovým profilem oproti scénáři 1 při návrhové srážce N10 a N50

Uzávěrový profil	Množství sedimentu proteklého uzávěrovým profilem oproti SC1 [%]							
	N10			N50				
	SC2	SC3	SC4	SC2	SC3	SC4		
1 - transport z kukuřice	-	1	0	25	-	3	0	24
2 - vnik do intravilánu	-	0	0	0	-	0	0	2
3 - odvedeno průlehem	-	-	-	39 z UP1	-	-	-	55 z UP1

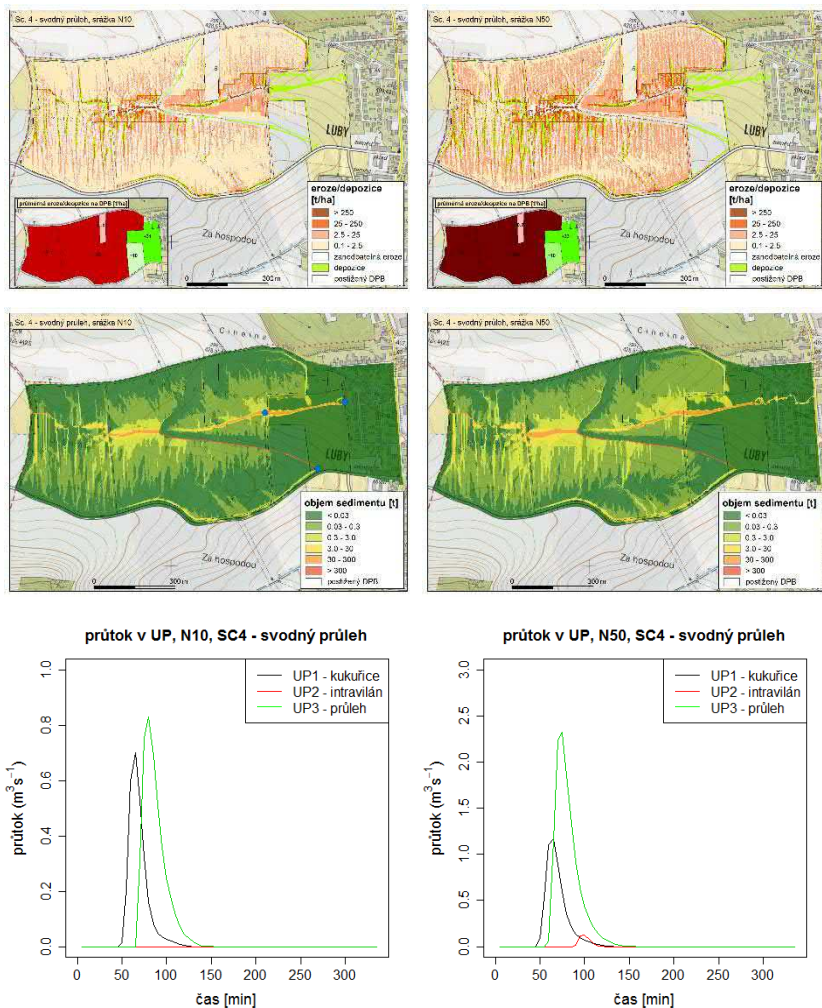


Obr. 57: Průtoky v uzávěrových profilech při návrhové srážce N10.

### **Porovnání N10 a N50 pro scénář 4 – svodný průleh**

- Při N50 výrazně vzrůstá plošná eroze na DPB s kukuřicí (z 18, resp. 16 t/ha na 41 resp. 39 t/ha). Naopak sedimentace na zatravněném DPB téměř nevzrostla. (rastr *sedbudget* a zonální statistika na DPB - Obr. 58 nahoře)

- Při N50 se již sediment dostává do intravilánu (rastr *sum\_sedvol* - Obr. 58 uprostřed, 33 t dle *pp\_data.csv*).
- Průleh a jeho odvodnění je třeba dimenzovat na  $2.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (oproti N10 násobné navýšení) - Obr. 58 dole.



Obr. 58: Srovnání SC4 – svodný průleh při srážce N10 (vlevo) a N50 (vpravo)

# SROVNÁNÍ „NOVOSTI POSTUPŮ“

Epizodní modelování vodní eroze je silným, avšak dosud poměrně málo využívaným, nástrojem pro ochranu zemědělské půdy před vodní erozí. Hlavním důvodem pro malé rozšíření tohoto přístupu k modelování vodní eroze je větší náročnost na použití modelů a nižší dostupnost vstupních dat. Metodika přináší první ucelený návod pro rutinní využití jednoho z nejpoužívanějších epizodních modelů, EROSION-3D a překonává hlavní limity jeho využití. Hlavními přínosy metodiky je:

1) návod na použití modelu od přípravy vstupních parametrů po interpretaci výsledků, sestavený na základě zkušeností autorů z výzkumné i projekční praxe.

2) uvádí zdroje dat jednotlivých vstupních vrstev a parametrů modelu, včetně nově vytvořených detailních map zrnitosti vytvořených přímo pro EROSION-3D (Beitlerová et al. 2021b), dalších detailních map vstupních parametrů (Žížala et al. 2020, Žížala et al. in print) či návrhových srážek (Kavka et al. 2018b)

3) představuje nový nástroj *E3D+GIS – nástroj pro přípravu vstupních parametrů* (Caha a Devátý 2021) pro jednoduchou přípravu vstupních vrstev a parametrizaci modelu, vytěžující databázi experimentálních dat RunoffDB (Devátý 2021)

4) Představuje nové pedotransferové funkce pro kalibraci infiltračního submodelu, výrazně zvyšující přesnost modelu EROSION- 3D (Beitlerová et al. 2021a).

# POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

---

Metodika je primárně určena současným a budoucím uživatelům modelu EROSION-3D jako základní pomocný materiál k jejich práci s modelem. Vzhledem k aplikovatelnosti mnoha v metodice uvedených postupů, pravidel, datových zdrojů aj. i pro jiné erozní a hydrologické modely se však předpokládá využití metodiky širším okruhem odborníků z modelářské praxe. Předpokládanými uživateli metodiky jsou projektanti pozemkových úprav, projekční kanceláře a výzkumná pracoviště. Použití metodiky a modelu na školách a univerzitách může z jiné (detailnější) perspektivy seznamovat s erozí jako s důležitým procesem v současné krajině.

Výsledky vzniklé na základě metodiky budou využívány především státní správou a samosprávou, zejména institucemi, jako je Ministerstvo zemědělství, Státní pozemkový úřad, orgány ochrany přírody a krajiny, a obce. Větší potenciál využití lze očekávat také od uživatelů a vlastníků zemědělské půdy (půda jako jen pomalu se obnovující výrobní faktor / majetek). V případě škod na majetku jako následků erozních událostí může být model a metodika nástrojem pro analýzu těchto událostí.

## EKONOMICKÉ ASPEKTY

---

Využití softwarů pro erozní a hydrologické modelování s sebou nese náklady dvojího typu – počáteční náklady na pořízení licence (u některých softwarů včetně EROSION-3D) a průběžné náklady vynaložené při jeho používání – data a čas potřebné při zpracování erozních studií. Metodika přináší ucelené informace, jak model EROSION-3D využívat rutinně a efektivně, kde sehnat dostupná data a jak minimalizovat čas strávený při jeho parametrizaci a interpretaci výsledků. Metodika tedy uživatelům modelu EROSION-3D výrazně snižuje průběžné náklady vynaložené při jeho používání.

Hlavním přínosem metodiky je však podpora ochrany půdy a majetku před erozí. Ekonomické i mimoekonomické přínosy erozních opatření, které budou realizovány s přispěním této metodiky, dalekosáhle převyšují přímé ekonomické přínosy pro uživatele modelu a jsou tou hlavní motivací pro tvorbu této metodiky.

# SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

---

BARKER, David, Jim BEUERLEIN, Anne DORRANCE, Don ECKERT, Bruce EISLEY, Ron HAMMOND, Edward LENTZ, Patrick LIPPS, Mark LOUX, Robert MULLEN, Mark SULC, Peter THOMISON a Maurice WATSON, 2005. Ohio Agronomy Guide. *Soybean Production*. 1–158.

BEITLEROVÁ, Hana, Jonas LENZ, Jan DEVÁTÝ, Martin MISTR, Jiří KAPIČKA, Arno BUCHHOLZ, Ilona GERNDTOVÁ a Anne ROUTSCHEK, 2021a. Improved calibration of the Green–Ampt infiltration module in the EROSION-2D/3D model using a rainfall-runoff experiment database. *Soil* [online]. **7**(1), 241–253. ISSN 2199398X. Dostupné z: doi:10.5194/soil-7-241-2021

BEITLEROVÁ, Hana, Daniel ŽÍŽALA, Robert MINAŘÍK, Anna JUŘICOVÁ a Jiří KAPIČKA, 2021b. *Zrnitostní složení zemědělské půdy ČR v německém klasifikačním systému KA5*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

BEITLEROVÁ, Hana, Daniel ŽÍŽALA, Robert MINAŘÍK, Luděk STROUHAL, Petr KAVKA a Anna JUŘICOVÁ, 2021c. *Fyzikální a hydrologické vlastnosti půd ČR*. 2021. B.m.: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy.

CAHA, Jan a Jan DEVÁTÝ, 2021. E3D+GIS - nástroj pro přípravu vstupních parametrů.

CAMPBELL, G. S., 1985a. *Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems*. Amsterdam, New York: Elsevier.

CAMPBELL, Gaylon S., 1985b. *Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems*. 1. vyd. Amsterdam, New York: Elsevier. ISBN 9780080869827.

DEVÁTÝ, Jan, 2021. *Katalog vstupních parametrů modelu EROSION-3D*. B.m.: ČVUT v Praze.

GARBRECHT, G., 1961. Abflussberechnungen für Flüsse und Kanäle. *Die Wasserwirtschaft*. **3**, 72–77.

JANEČEK, M., Tomáš DOSTÁL, Jana KOZLOVSKY-DUFKOVÁ, Miroslav DUMBROVSKÝ, Josef HŮLA, Václav KADLEC a Jana KONEČNÁ, 2012. *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. 1. vyd. Praha: ČZU FŽP. ISBN 978-80-87415-42-9.

KAVKA, P., M. MÜLLER a KOL., 2018a. *Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině*. B.m.: ČVUT v Praze. ISBN 978-80-01-06363-7.

KAVKA, Petr, M. MÜLLER, L. STROUHAL, M. KAŠPAR, V. BLIŽŇÁK, M. LANDA, L. WEYSKRABOVÁ, M. PAVEL a Tomáš DOSTÁL, 2018b. *Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině*. Praha: České vysoké učení v Praze. ISBN 9788001063637.

KOVÁŘ, Pavel, D. HEŘMANOVSKÁ a M. SŮVA, 2015. *Program DES\_RAIN\_VARIABLE*. 2015. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.

MICHAEL, Anne, 2000. Anwendung des physikalisch begründeten Erosionsprognosemodells EROSION 2D/3D – Empirische Ansätze zur Ableitung der Modellparameter. *TU Bergakademie Freiberg, Disertation*. 147.

MICHAEL, Anne, Jürgen SCHMIDT a Walter SCHMIDT, 1996. *EROSION 2D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Band II: Parameterkatalog*.

SCHMIDT, J., 1996. Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen. *Berliner Geogr. Abh.* **Heft 61**, 148.

SCHMIDT, Jürgen, 1991. A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena Supplement*. **19**, 101–109.

SPONAGEL, Herbert a AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. Hannover: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-95920-4.

VAN GENUCHTEN, M. TH., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils<sup>1</sup>. *Soil Science Society of America Journal* [online]. **44**(5), 892. ISSN 0361-5995. Dostupné z: doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

VAŠŠOVÁ, Darina a Pavel KOVÁŘ, 2011. *Program DES\_RAIN*. 2011. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.

VON WERNER, Michael, 1995. *GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten*. B.m. Freie Universität Berlin.

VON WERNER, Michael, 2021. *EROSION-3D Uživatelská příručka*. 3.2. B.m.: GeoGnostics Software.

WISCHMEIER, W. H. a D. D. SMITH, 1978. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* [online]. B.m.: United States Department of Agriculture. ISBN Agriculture Handbook 537. Dostupné z: doi:10.1029/TR039i002p00285

ŽÍŽALA, Daniel, Robert MINAŘÍK, Hana BEITLEROVÁ, Anna JUŘICOVÁ, Jan SKÁLA, Reyes ROJAS, Vít PENÍŽEK a Tereza ZÁDOROVÁ, nedatováno. High-resolution soil property maps from digital soil mapping methods, Czech Republic. *Catena*.

ŽÍŽALA, Daniel, Robert MINAŘÍK, Anna JUŘICOVÁ, Tereza ZÁDOROVÁ, Hana BEITLEROVÁ a Vít PENÍŽEK, 2020. *Soubor detailních map půdních vlastností ČR - zemědělské půdy*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy v.v.i.

# SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

---

BEITLEROVÁ, Hana, Jonas LENZ, Jan DEVÁTÝ, Martin MISTR, Jiří KAPIČKA, Arno BUCHHOLZ, Ilona GERNDTOVÁ a Anne ROUTSCHEK, 2021. Improved calibration of the Green–Ampt infiltration module in the EROSION-2D/3D model using a rainfall-runoff experiment database. *Soil* [online]. **7**(1), 241–253. ISSN 2199398X. Dostupné z: doi:10.5194/soil-7-241-2021

ŽÍŽALA, Daniel, Robert MINAŘÍK, R. VAŠÁT, Jan SKÁLA, Anna JUŘICOVÁ, Zádorová TEREZA, Vít PENÍŽEK a Hana BEITLEROVÁ, 2020. *Tvorba půdních map pedometrickými metodami*. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy v.v.i. ISBN 9788088323341.

ŽÍŽALA, Daniel, Robert MINAŘÍK, Anna JUŘICOVÁ, Tereza ZÁDOROVÁ, Hana BEITLEROVÁ a Vít PENÍŽEK, 2020. *Soubor detailních map půdních vlastností ČR - zemědělské půdy*. 2020. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

KONEČNÁ, Jana, Petr KARÁSEK, Hana BEITLEROVÁ, Petr FUČÍK, Jiří KAPIČKA, Jana PODHRÁZSKÁ a Tomáš KVÍTEK, 2019. Using WaTEM/SEDEM and HEC-HMS models for the simulation of episodic hydrological and erosion events in a small agricultural catchment. *Soil and Water Research* [online]. **14**(1), 0–00 [vid. 2019-12-08]. Dostupné z: doi:10.17221/202/2018-SWR

BEITLEROVÁ, Hana, Robert MINAŘÍK, Anna JUŘICOVÁ, Jan DEVÁTÝ, Jiří KAPIČKA a Daniel ŽÍŽALA, 2019. Zrnitostní složení půdy v klasifikačním

systému USDA, okresy Mělník, Mladá Boleslav, Česká Lípa a Příbram. *Mapa se specializovaným obsahem, projekt MZe NAZV QK1810341*. 1–35.

BEITLEROVÁ, Hana, Jonas LENZ, Jiri KAPICKA, Jan DEVATY, Anne ROUTSCHEK a Jürgen SCHMIDT, 2019. Calibration of infiltration module for physically based soil erosion modelling. In: *Geophysical Research Abstracts Vol. 21. EGU General Assembly*. s. 5305.

DEVÁTÝ, Jan a Hana BEITLEROVÁ, 2019. Setup for measuring surface runoff velocity under a rainfall simulator. In: *Geophysical Research Abstracts Vol. 21. EGU General Assembly*. s. 16826.

LENZ, Jonas, Hana BEITLEROVÁ a Arno BUCHHOLZ, 2019. R in soil erosion modelling-Parameter determination and estimation for EROSION-3D. In: *Geophysical Research Abstracts Vol. 21. EGU General Assembly [online]*. s. 16991.

STEHLÍK, Martin, Hana BEITLEROVÁ, Jan DEVÁTÝ, Martin PAVEL, Jiří KAPÍČKA a Tomáš DOSTÁL, 2018. Erozní ohroženost Rtyně v Podkrkonoší pohledem epizodního a dlouhodobého modelu. *Specializovaná mapa s odborným obsahem. Projekt MZe NAZV QK1810341*. 1–35.

BEITLEROVÁ, Hana, Jan DEVÁTÝ, Martin PAVEL, Jiří KAPÍČKA, Daniel ŽÍŽALA, Tomáš DOSTÁL a Martin STEHLÍK, 2020. Vytvoření národní databáze parametrů matematického simulačního modelu Erosion 3D a jeho standardizace pro rutinní využití v podmínkách ČR. *Periodická zpráva projektu NAZV QK1810341*.

BEITLEROVÁ, Hana, Jan DEVÁTÝ, Martin PAVEL, Jiří KAPÍČKA, Daniel ŽÍŽALA, Tomáš DOSTÁL a Martin STEHLÍK, 2019. Vytvoření národní databáze parametrů matematického simulačního modelu Erosion 3D a

jeho standardizace pro rutinní využití v podmínkách ČR. *Periodická zpráva projektu NAZV QK1810341.*

BEITLEROVÁ, Hana, Jan DEVÁTÝ, Martin PAVEL, Jiří KAPIČKA, Daniel ŽÍŽALA, Tomáš DOSTÁL a Martin STEHLÍK, 2018. Vytvoření národní databáze parametrů matematického simulačního modelu Erosion 3D a jeho standardizace pro rutinní využití v podmínkách ČR. *Periodická zpráva projektu NAZV QK1810341.*

Název metodiky Využití matematického simulačního modelu EROSION-3D pro posuzování erozní ohroženosti a navrhování ochranných opatření

Autorský kolektiv Hana Beitlerová, Jan Devátý, Martin Stehlík, Jonas Lenz, Jiří Kapička, Tomáš Dostál, Martin Pavel, Daniel Žížala, Robert Minařík, Anna Juřicová, Kateřina Zelenková

Editor Mgr. Hana Beitlerová, Ing. Jiří Kapička

Rok vydání 2021

Vydání 1. vydání

Vydal Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

Tisk Powerprint s.r.o., Praha 6 - Suchbátka

Náklad 100 ks

ISBN (tisk) 978-80-88323-63-1

ISBN (pdf) 978-80-88323-64-8