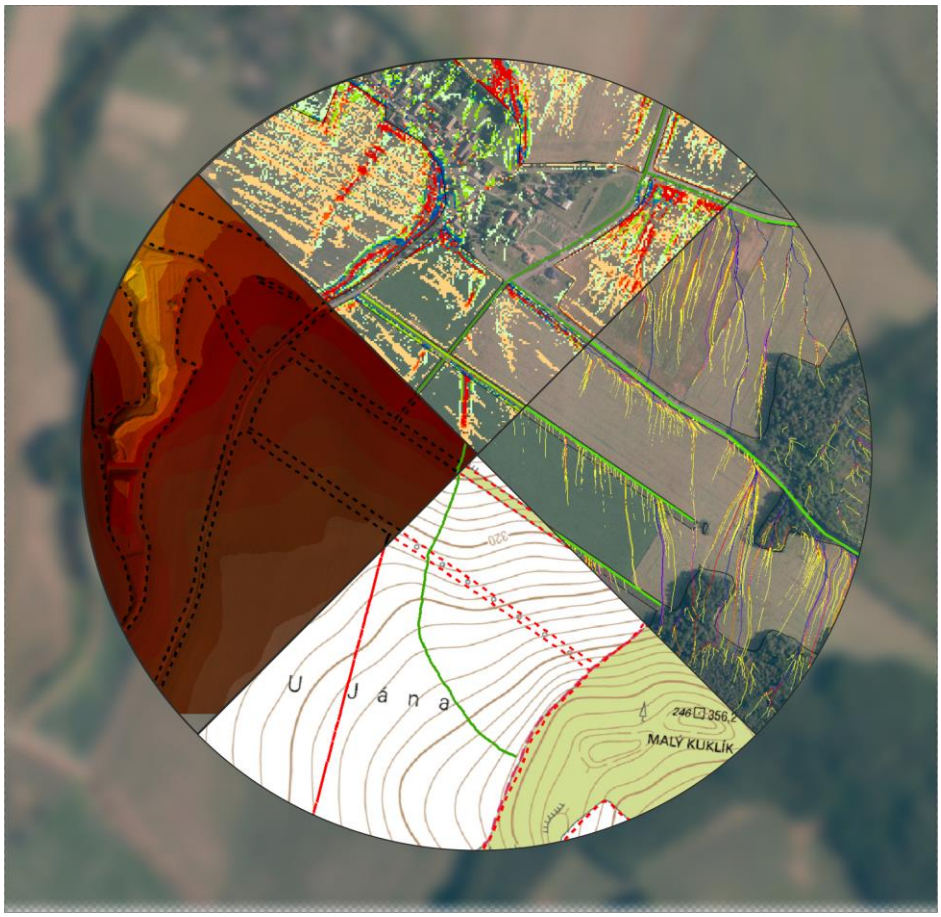
VÚMOP, v.v.i.

ČVUT v Praze

Využití dat a nástrojů GIS a simulačních modelů k navrhování TPEO



Metodika

Tomáš Dostál a kol.

Praha 2014

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

České vysoké učení technické v Praze

Využití dat a nástrojů GIS a simulačních modelů k navrhování TPEO

Metodika

Tomáš Dostál, Josef Krása, Petr Kavka, Karel Vrána, Jan Devátý, Václav Kadlec, Ivan Novotný, Petra Kulířová, Darina Heřmanovská, Vladimír Papaj, Jiří Kapička, Věra Váňová

Praha 2014

Dedikace

Metodika vznikla jako výstup projektu NAZV QI91C008 „Optimalizace postupu navrhování technických protierozních opatření“ řešeného v letech 2009–2013.

Metodika byla certifikována Státním pozemkovým úřad pod číslem 18/2014-VÚMOP

Oponenti

Ing. Radmila Grmelová, CSc. – Státní pozemkový úřad

prof. Ing. František Toman, CSc. – Mendelova univerzita v Brně, Ústav aplikované a krajinné ekologie

Autorský kolektiv

doc. Dr. Ing. Tomáš Dostál[1]

doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.[1]

Ing. Petr Kavka, Ph.D.[1]

doc. Ing. Karel Vrána, CSc.[1]

Ing. Jan Devátý[1]

Ing. Václav Kadlec, Ph.D.[2]

Ing. Ivan Novotný[3]

Ing. Petra Kulířová[2]

Ing. Darina Heřmanovská, Ph.D.[2]

Ing. Vladimír Papaj, Ph.D.[3]

Ing. Jiří Kapička[3]

Mgr. Věra Váňová[3]

Editor	Ing. David Řeháček
Rok vydání	2014
Vydání	1. Vydání
Vydal	© Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
Tisk	powerprint s.r.o., Praha 6 - Suchdol
Rozsah	69 stran
Náklad	100 ks
ISBN	**978-80-87361-30-6**

[1] České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

[2] Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i., Oddělení pedologie a ochrany půdy

[3] Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i., Oddělení půdní služby

Obsah

I. Cíl metodiky 5
II. Vlastní popis metodiky 7
1 Nástroje k posuzování erozní ohroženosti a návrhu technických protierozních opatření 7
2 Specifika pro navrhování technických protierozních opatření 8
3 Univerzální rovnice ztráty půdy USLE 9
4 Univerzální rovnice ztráty půdy USLE v kombinaci s GIS 10
4.1 Popis metody 10
4.2 Vhodnost využití v rámci TPEO 13
4.3 Vstupní data 15
4.4 Výhody a nevýhody 20
4.5 Příklad použití 22
5 EROSION-3D 25
5.1 Popis metody 25
5.2 Vhodnost využití v rámci TPEO 27
5.2.1 Určování kritických míst 28
5.2.2 Průtoky v profilech 28
5.2.3 Porovnání stavu před a po realizaci na zvolené návrhové srážce 28
5.3 Vstupní data 29
5.3.1 Výškopisná data 29
5.3.2 Půdní vlastnosti 32
5.3.3 Srážka 35
5.4 Výhody a nevýhody 36
5.5 Příklad použití 37
6 SMODERP 41
6.1 Popis modelu 41
6.2 Vhodnost využití v rámci TPEO 43
6.3 Vstupní data 43
6.3.1 Morfologie terénu 43
6.3.2 Půdní vlastnosti 45
6.3.3 Povrch a vegetace 46

6.3.4 Srážky 47
6.4 Výstupy z modelu – ukázka 49
6.5 Výhody a nevýhody 51
6.6 Příklady použití 51
6.7 Celkové zhodnocení 58
III. Srovnání „novosti postupů“ 59
IV. Popis uplatnění Certifikované metodiky 60
V. Ekonomické aspekty 61
VI. Seznam použité související literatury 62
VII. Seznam publikací, které předcházely metodice 65
Seznam obrázků a grafů 68
Seznam Tabulek 69
Seznam použitých symbolů 69

I. Cíl metodiky

Metodika Využití dat a nástrojů GIS a simulačních modelů k navrhování technických protierozních opatření byla vytvořena v rámci projektu NAZV QI91C008 „Optimalizace postupu navrhování technických protierozních opatření“ řešeného v letech 2009–2013 a je úzce propojena s metodikou „Navrhování technických protierozních opatření“, vytvořenou v rámci stejného projektu.

Potřeba přípravy a zveřejnění obou citovaných materiálů je vyvolána požadavky praxe, rozvojem výpočetní techniky i postupem ve vývoji nových výpočetních nástrojů a metod. Protierozní ochrana zemědělské půdy je tradičně řešena řadou metodik „Ochrana zemědělské půdy před erozí“, vydávaných a revidovaných v časových intervalech cca pěti let již od 70. let minulého století pod hlavičkou ÚVTIZ, následně VÚMOP a v roce 2012 ČZU v Praze (Janeček a kol., 1972, 1983, 1992, 2007, 2012). Tyto metodiky řeší poměrně dobrým a praktickým způsobem otázky stanovení erozní ohroženosti zemědělské půdy pomocí různých metod. Návrh vlastních protierozních opatření se soustřeďuje především na měkčí typy opatření z kategorie agrotechnických a organizačních. Opatření technická jsou podrobněji pojednána až v poslední z citovaných metodik (Janeček a kol., 2012). V novějších z citovaných metodik jsou kromě klasických metod posouzení erozní ohroženosti, založených na USLE (Wischmeier, Smith, 1965) a metod výpočtu charakteristik povrchového odtoku, využívajících princip čísel odtokových křivek SCS-CN (Mishra, Singh, 2003), stručně popsány i možnosti aplikace jak nástrojů geografických informačních systémů (GIS), tak i vybraných matematických simulačních modelů. Ty jsou ale doporučeny jen pro posouzení erozní ohroženosti. V metodikách jsou sice GIS a matematické modely zmíněny, chybí však praktické informace o jejich reálné využitelnosti.

V posledních letech zaznamenává po masivním rozvoji výpočetní techniky i softwarového vybavení významný pokrok také kvalita a dostupnost vstupních dat. Ta jsou pro nasazení jakýchkoliv automatizovaných způsobů výpočtu zcela klíčová. Dalším významným posunem je u softwarového vybavení orientace na koncového uživatele. Příslušné programy, modely a výpočetní systémy jsou dnes vybaveny co nejpřístupnějším uživatelským rozhraním, které umožňuje aplikaci prakticky každému kvalifikovanému uživateli. Většina modelů pracuje na společné GIS platformě, která umožňuje na standardních datových formátech generovat vstupních vrstvy pro jednotlivé analýzy.

Na popsaném základě vznikala Metodika, kterou právě nyní držíte v ruce. Za cíl si klade ukázat, jak lze rutinním způsobem v inženýrské praxi aplikovat pokročilé matematické simulační modely, resp. GIS asistované výpočetní postupy pro navrhování technických protierozních opatření (dále jen TPEO).

Popsány jsou celkem 3 metody:

- metoda Univerzální rovnice ztráty půdy USLE (Wischmeier, Smith, 1965; Janeček a kol., 2012) za podpory distribuovaného GIS přístupu, která je vhodná především pro aplikace ve větších měřítcích,
- matematický simulační model EROSION-3D (von Werner, 2006; Schmidt a kol., 1996) – fyzikálně orientovaný epizodní plně distribuovaný simulační model, vhodný pro aplikaci ve středním prostorovém měřítku a
- matematický simulační model SMODERP (Holý a kol., 1989; Vrána a kol., 2011; Kavka, 2011) – fyzikálně orientovaný epizodní model pro aplikaci na jednotlivém pozemku nebo malých povodích, vhodný pro detailní návrh a dimenzování protierozních opatření.

Smyslem předkládané Metodiky není doporučit matematické simulační modely nebo GIS asistované výpočetní postupy jako jedinou správnou variantu posuzování erozní ohroženosti a navrhování protierozních opatření. Cílem naopak je na základě výsledku řešení výzkumného projektu reálně shrnout poznatky a zkušenosti a doporučit, k čemu je který nástroj v dnešním stupni vývoje a v současných podmínkách efektivně použitelný, a stanovit, kde jsou jeho limity. Metodika je zaměřena na moderní a pokrokové inženýry, kteří hledají nové a efektivní postupy, ale nemají čas zabývat se vlastním bádáním a testováním.

V následujících kapitolách budou nejdříve velmi stručně popsány způsoby posouzení erozní ohroženosti zemědělských pozemků, a to jak standardními metodami, tak cílovými matematickými modely a GIS asistovaným přístupem. V další části budou velmi stručně charakterizovány jednotlivé podrobněji rozebírané metody (USLE podporovaná GIS, model EROSION-3D, model SMODERP). V dalších kapitolách bude pro každou ze zmíněných metod uveden jednak podrobnější popis, dále její vhodnost a způsob využití pro navrhování TPEO, vhodná vstupní data pro výpočet, výhody a nevýhody, resp. limity oproti standardním postupům, a nakonec bude uveden příklad použití. Pro udržení stručnosti materiálu je řada otázek řešena odkazy na obecně platné metodiky „Ochrana zemědělské půdy před erozí“ (Janeček a kol., 2012) a „Navrhování technických protierozních opatření“ (Kadlec a kol., 2013).

Důležitou informací pro uživatele je, že tato Metodika nebyla koncipována jako manuál pro používání jednotlivých popsaných metod a modelů. Cílovou skupinou Metodiky jsou uživatelé, kteří jsou vzděláni v otázce protierozní ochrany a jsou obecně schopni používat citované metody, nástroje a modely. Metodika jim přináší informace o tom, jakým způsobem lze tyto nástroje, metody a modely využít k navrhování prvků TPEO, což u žádného z nich není původně zamýšlený způsob využití. Upozorňuje na možná úskalí aplikace, doporučuje vhodné postupy, zdůrazňuje pozitiva a negativa. Cílem je povšechně umožnit co nejefektivnější práci s komplikovanými moderními výpočetními nástroji tak, aby vyprodukované návrhy TPEO byly co nejšetrnější, nejekonomičtější a současně co nejspolehlivější.

II. Vlastní popis metodiky

1 Nástroje k posuzování erozní ohroženosti a návrhu technických protierozních opatření

Pro posuzování a navrhování ochranných opatření je v ČR využívána převážně metoda USLE (Wischmeier, Smith, 1965), pro naše podmínky standardizovaná v metodice Ochrana zemědělské půdy před erozí (Janeček a kol., 2012). Zmíněná metodika však odkazuje i na další možné přístupy – konkrétně možnost kombinace USLE a nástrojů GIS, matematické simulační modely EROSION-3D, SMODERP, KINFIL (Kovář, Vaššová, 2010), WEPP (Flanagan, Nearing, 1995) nebo HydroCAD (http://www.hydrocad.net). Z uvedených modelů se ale program HydroCAD a model KINFIL hodí jako hydrologicky orientované nástroje spíše pro určování hydrologických charakteristik při navrhování prvků TPEO a model WEPP je založen na aplikaci vlastních vnitřních databází, které jsou pro podmínky USA velmi rozsáhlé a kvalitní, praktická aplikace v podmínkách ČR je ale zatím poměrně náročná. Pro podrobnější analýzu proto byly do předkládané metodiky zahrnuty nástroje v současnosti nejdostupnější, nejrozšířenější nebo mající široký potenciál praktického uplatnění v podmínkách ČR. Každopádně byly zvoleny pro prezentaci v metodice po jednom zástupci různých skupin modelů – z modelů generelních USLE s podporou GIS, z modelů fyzikálně založených a plně distribuovaných pro střední měřítka EROSION-3D a z modelů fyzikálně založených epizodních, pro jednotlivý svah nebo mikropovodí SMODERP.

Jako referenční oficiální podklad pro posouzení erozní ohroženosti zemědělské půdy je možno generelně akceptovat mapu erozní ohroženosti publikovanou a pravidelně aktualizovanou na adrese http://geoportal.vumop.cz, která je odvozena pomocí kombinace GIS technologií a USLE za využití nejpodrobnějších dostupných vstupních dat týkajících se klimatických, půdních, morfologických podmínek a způsobu využití území.

Obecně ale není otázka posuzování erozní ohroženosti přímo spojena s navrhováním technických protierozních opatření, neboť výsledkem posouzení erozní ohroženosti je informace o tom, jestli daný pozemek (nebo jeho část) je či není erozně ohrožen. Pokud ztráta půdy překračuje přípustnou mez, následuje návrh ochranných opatření, kterých existuje široká škála. Opatření technická představují jen jednu, navíc dosti specifickou, skupinu. Podrobněji je problematika posuzování erozní ohroženosti jako taková pojednána jednak v metodice Ochrana zemědělské půdy před erozí (Janeček a kol., 2012) a jednak v související metodice Navrhování technických protierozních opatření (Kadlec a kol., 2013).

2 Specifika pro navrhování technických protierozních opatření

Technická protierozní opatření jsou obecně nejvyšší formou protierozní ochrany, navazují na její měkčí způsoby – opatření organizační a agrotechnická. Technická opatření se navrhují zpravidla až po vyčerpání možnosti zajištění požadované ochrany pomocí opatření měkčích, nebo v případě, kdy návrh vyžaduje určitou jasně specifikovanou úroveň míry ochrany, kterou měkčí opatření není schopno poskytnout.

Základním principem technických protierozních opatření je:

- změna sklonu pozemku (terénní urovnávky, terasování, historické meze),
- přerušení volné délky pozemku a neškodné odvedení povrchového odtoku (příkopy, průlehy, protierozní meze, údolnice),
- zachycení povrchového odtoku a splavenin, zdržení odtoku a jeho neškodné odvedení (hrázky, sedimentační, retenční a suché nádrže, vsakovací prvky).

Zásadním rozdílem TPEO proti ostatním typům protierozních opatření je technický charakter prvků, který se promítá do způsobu navrhování a realizace. TPEO jsou opatření investičního charakteru, která je třeba individuálně posoudit v souladu se Stavebním zákonem 183/2006 Sb., a podle něj rozhodnout, zda stavba vyžaduje ohlášení, stavební povolení, či je možno ji realizovat bez nich. Podrobněji je problematika legislativního rámce a podmínek realizace zmíněna v kapitole 5 metodiky „Navrhování technických protierozních opatření“ (Kadlec a kol., 2013).

Z uvedeného vyplývá, že TPEO se navrhují tak, aby zajistila protierozní ochranu pozemku, např. změnou volné délky svahu nebo sklonu svahu. Častým důvodem pro návrh prvků nebo systémů TPEO je i požadavek na ochranu přilehlých pozemků nebo struktur na nich vybudovaných před odtokem vody a transportem splavenin z výše ležících pozemků (tzv. off-site efekty). Navržená technická ochranná opatření tak musí být schopna plnit svou funkci v předem stanovených podmínkách. Jde především o to, že TPEO je třeba navrhovat a dimenzovat na určitou zcela jednoznačnou míru bezpečnosti, vyjádřenou dobou opakování. Ta by se podle typu a významnosti chráněné lokality měla pohybovat od minimálně pěti let v běžných podmínkách po 10–50 let při ochraně intravilánu nebo jiné významné infrastruktury. V odůvodněných výjimečných případech je možné navrhovat na dobu opakování až 100 let. Konkrétní hodnoty zabezpečenosti, vyjádřené dobou opakování výskytu návrhového parametru, jsou uvedeny v Tab. 1. Návrhovými parametry pak jsou nejčastěji kulminační průtok, objem odtoku nebo transport splavenin, vyvolaný konkrétní příčinnou srážkovou epizodou. To vše charakterizováno dobou opakování daného jevu v daném profilu.

Tab. 1: Doporučené zabezpečenosti pro dimenzování základních typů TPEO

Druh opatření	Důvod opatření	Návrhové hodnoty	Poznámka
Opatření odváděcí (příkop, průleh, …)	Ochrana pozemků	Q_5 až Q_{10}	Dle kvality půdy
Opatření odváděcí (příkop, průleh, …)	Ochrana intravilánu	Q_{10} až Q_{50}	Dle významu obce
Opatření odváděcí (příkop, průleh, …)	Ochrana vodního útvaru	Q_{10} až Q_{20}	Dle charakteru a významu vodního útvaru
Objekty	Propustky, mostky	Q_{20} až Q_{50}	Dle místa výskytu
Opatření retenční (suchá nádrž, poldr, …)	Ochrana intravilánu nebo jiné významné lokality	Q_{20} až Q_{100}, tomu odpovídající objem	Dle významu chráněné lokality

3 Univerzální rovnice ztráty půdy USLE

Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE), pro naše podmínky prezentovaná například v metodice Ochrana zemědělské půdy před erozí (Janeček a kol., 2012), byla odvozena jako jednoduchý empirický model ztráty půdy na zemědělském pozemku, který je považován za homogenní z hlediska půdních vlastností a způsobu využití a je nahrazen jedním nebo více charakteristickými profily. Rovnice je velmi jednoduchá, matematicky robustní a byly pro ni připraveny katalogy vstupních dat, které umožňují velmi snadné rutinní nasazení. I přes řadu slabin představuje celosvětově zřejmě nejrozšířenější nástroj pro analýzu erozní ohroženosti zemědělských pozemků.

Klasický způsob využití této metody spočívá v tom, že na zkoumaném pozemku je definován jeden nebo několik charakteristických profilů. Pro ně jsou stanoveny pomocí nomogramů, katalogů vstupních dat, z mapových podkladů nebo z vlastních průzkumů a analýz vstupní parametry, charakterizující šest faktorů ovlivňujících erozní proces: erozní účinnost deště (R), erodovatelnost půdy (K), faktory délky (L) a sklonu svahu (S), typ vegetačního pokryvu a způsobu obdělávání (C) a účinnost protierozních opatření (P).

Výsledkem výpočtu pak je hodnota průměrné roční ztráty půdy G (t ha^{-1} rok^{-1}), která je vztažena k celé části pozemku, reprezentované daným charakteristickým profilem. Posouzení ohroženosti příslušného pozemku pak spočívá v porovnání zjištěné hodnoty průměrné roční ztráty půdy s hodnotou přípustné ztráty půdy, která podle platných metodik závisí na mocnosti půdního profilu. Podle současně platné metodiky (Janeček a kol., 2012) je přípustná ztráta půdy stanovena na 4 t ha^{-1} rok^{-1} pro střední a hluboké půdy (dle klasifikace bonitovaných půdně ekologických jednotek BPEJ), pro mělké půdy je požadováno trvalé zatravnění.

Osamostatněním parametru faktoru délky svahu (L) nebo faktoru sklonu svahu (S) v rovnici při zadání požadované hodnoty přípustné ztráty půdy je možno pomocí rovnice získat maximální přípustnou délku svahu nebo přípustný sklon svahu. Tím je

možno určit polohu přerušujícího prvku na pozemku nebo parametry teras. Z rovnice ale není možno získat parametry nutné pro skutečný návrh ochranného prvku, zejména pro dimenzování jeho kapacity.

Výsledkem snahy o umožnění popisu nehomogenit v časovém vývoji jednotlivých faktorů bylo vytvoření RUSLE – Revidované univerzální rovnice ztráty půdy (Renard a kol., 1991), která vznikla z původního tvaru úpravou některých vztahů pro jednotlivé faktory a rozšířením katalogu vstupních hodnot o údaje pro kratší časová období.

Nevýhodou ať již USLE, nebo modernější RUSLE zůstává především velká generalizace výpočtu a výstup v dlouhodobých průměrných hodnotách, který nepopisuje základní fenomén erozního procesu, tj. jeho nahodilost a silně epizodní charakter. Z tohoto důvodu je možno USLE využít pro navrhování polohy TPEO pouze v případě ochrany půdního fondu. Pokud je cílem projektu ochrana intravilánu nebo vodního útvaru, kde je zapotřebí pracovat buď s konkrétními hodnotami sledovaných parametrů (dimenzování kapacity, kulminační průtoky, objemy odtoku atd.) nebo s pravděpodobností zabezpečenosti (doba opakování), není možné vystačit s prostou aplikací USLE a je zapotřebí sáhnout k jiným, přesnějším metodám založeným na epizodním přístupu.

Ve snaze o automatizaci výpočtu v souvislosti s rostoucí dostupností jak nástrojů GIS, tak i prostorových dat byly vyvinuty metody automatizace výpočtu založeného na profilovém přístupu aplikace USLE, záhy však byl tento přístup překonán modifikací použitých algoritmů pro plně distribuovaný výpočet v rastrové síti. Tento přístup sice přináší řadu zlepšení jak v oblasti výpočtové, tak v oblasti vizualizace výsledků, nemůže ale vyřešit základní problém aplikace USLE – tedy že se jedná o kontinuální model, pracující s dlouhodobými průměrnými hodnotami.

4 Univerzální rovnice ztráty půdy USLE v kombinaci s GIS

4.1 Popis metody

Základní principy a rizika využití metody USLE-GIS jsou popsány v související metodice Navrhování technických protierozních opatření (Kadlec a kol., 2013).

Při manuálním způsobu výpočtu se na každém pozemku stanoví charakteristické odtokové dráhy plošného odtoku (tzv. profily) a všechny faktory rovnice se určují pro plochy těmito profily reprezentované. Podrobnost a kvalita řešení je výrazně závislá na správném stanovení profilů. Výpočet pomocí GIS není založen na určování jednotlivých průměrných hodnot G pro pozemek, tj. jeho charakteristický odtokový profil, ale na určení velikosti ztráty půdy pro jednotlivé pixely (minimální plošky) pozemku, resp. povodí, a následné analýze (součet na ploše pozemků, určení průměrných hodnot pro pozemky apod.). Každému pixelu je přiřazena informační hodnota každého dílčího faktoru USLE. Velikost řešeného území a podrobnost

vstupních podkladů, zejména digitálního modelu terénu určuje vhodné rozlišení výpočtu. Pro optimální data lze doporučit rozlišení v řádu jednotek čtverečních metrů.

Určení faktorů R, K, C a P se tedy při metodě USLE-GIS neliší od běžného nasazení USLE, mapy faktorů jsou vytvořeny z komerčních geoinformačních vrstev (využití území, půdní mapy aj.) přiřazením atributů daným mapovým prvkům a převedením na rastr potřebného rozlišení. Při převodu je vhodné dodržet jednotné rozlišení a lícování pozic pixelů u všech řešených vrstev.

Hlavní rozdíl a přínos aplikace GIS se týká výpočtu topografického faktoru LS. Vstupem pro tento výpočet jsou rastrový digitální model terénu (DMT) a mapa pozemků (ve shodném rozlišení). Nejprve je třeba vždy v rámci jednoho izolovaného pozemku (erozně, resp. odtokově uzavřené oblasti) určit dílčí velikost povodí každého jednotlivého pixelu. K tomu slouží nástroj s odlišným pojmenováním (a mírně odlišnou funkcionalitou) v jednotlivých GIS softwarech – Flow Accumulation (ArcGIS), runoff (IDRISI), r.watershed (GRASS) aj. Dále je třeba určit lokální sklon v oblasti každého pixelu.

Z těchto dvou parametrů je možno vypočítat LS-faktor pomocí různých vztahů, kalibrovaných pro odlišné oblasti a data. Základní porovnání odlišných přístupů používaných ve světě a v ČR publikoval Krása (2010). Pro běžné použití v ČR vyhovuje následující rovnice (Mitasova a kol., 1998):

$$LS_{(x,y)} = (m+1)\left[\frac{A_{(x,y)}}{22{,}13}\right]^{m} * \left[\frac{\sin b_{(x,y)}}{0{,}09}\right]^{n}$$

Kde:

- LS(x,y) faktor LS pro daný pixel o souřadnicích x, y,
- A jednotková zdrojová plocha na vstupu do buňky (m2 na bm)* ,
- m kalibrační parametr (obvykle 0,6),
- n kalibrační parametr (obvykle 1,3),
- b sklon buňky (rad),

*Jednotkovou zdrojovou plochu A lze zjednodušeně určit jako podíl plochy dílčího povodí daného pixelu a velikosti hrany pixelu (tedy rozlišení rastru).

Klíčovým určujícím faktorem pro použití dané rovnice je správné stanovení rastru zdrojových ploch (povodí). Běžně používané GIS aplikace, zejména v ČR nejrozšířenější ArcGIS, však nabízí při výpočtu akumulace odtoku pouze variantu pracující s jednosměrným odtokem – tedy ve směru největšího sklonu. To vede ke značné konvergenci odtoku, nepřesnému směrování a lokálnímu nadhodnocení smyvu. Doporučujeme využít alternativní nástroje, umožňující vícesměrný odtok, případně výpočet na trojúhelníkové síti (TIN).

Jednodušším a často i přesnějším řešením než programování dané rovnice v prostředí GIS je využití některého dostupného modelu, ve kterém je již rovnice (případně její varianty) implementována. Doporučit lze zejména následující nástroje:

- model EROZE v GIS Atlas DMT,
- programový modlu r.watershed v GIS GRASS či QGIS,
- program USLE2D.

Komerčním, nicméně v ČR již zavedeným modelem je model EROZE distribuovaný v rámci GIS Atlas DMT (vyvíjí firma Atlas, s. r. o.), který bude počínaje rokem 2015 dostupný rovněž ve 2D verzi a optimalizovaný pro zpracování podrobného výškopisu ve formě Digitálního modelu reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G).

Nekomerčním řešením pro uživatele dostatečně orientované ve využití informačních technologií je instalace GIS GRASS, případně implementace GRASS uvnitř instalace QGIS. Jedná se o open source distribuce původně programované pro UNIX platformy, nicméně v současných verzích (v případě GRASS počínaje verzí 6) již poměrně snadno využitelné i pro běžné uživatele MS Windows. Výpočet faktoru LS podle rovnice Mitášové je implementován v programovém modulu r.watershed. Uživatel musí samostatně vyřešit problém členění území na jednotlivé pozemky, lze si vybrat ze dvou variant směrování odtoku.

V České republice je pro výpočet faktoru LS v GIS často využíván volně dostupný nekomerční program USLE2D (http://geo.kuleuven.be/geography/modelling/), využívající formát souborů GIS IDRISI. Výhodou programu je několik dostupných rovnic, kalibrovaných pro odlišné půdní podmínky, několik variant výpočtu směrování odtoku a automatizované řešení pro komplexní povodí (skupinu pozemků). Pro podmínky ČR lze obecně doporučit následující nastavení programu: rovnice pro faktor S McCool/moderate, směrování odtoku Multiple Flow (případně Flux decomposition), prostupnost hranic pozemků dle místních podmínek. Pro uživatele nevlastnící GIS IDRISI je důležité, že formát IDRISI rastr lze načítat i exportovat v komerčních i nekomerčních GIS.

Do všech uvedených modelů vstupuje přímo DMT a pozemky, není třeba předem vytvářet doplňující vstupní vrstvy (povodí a sklony), jako v případě přímého použití GIS a rovnice dle Mitášové.

Posledním krokem výpočtu je násobení jednotlivých map faktorů USLE pomocí nástrojů mapové algebry, a tedy určení lokálního smyvu v každém pixelu. Dále je možno využít libovolné nástroje mapové algebry, prostorové statistiky a prostorové analýzy GIS pro další rozbor řešeného území (typicky vymezení drah soustředěného odtoku a výpočet průměrného smyvu na dílčích svazích nebo pozemcích).

4.2 Vhodnost využití v rámci TPEO

Při správném postupu výpočtu si svými průměrnými hodnotami manuální postup a postup USLE-GIS odpovídají. Průměrná hodnota smyvu vypočtená pro každý dílčí svah pozemku je shodná s hodnotou určenou při optimálním vedení odtokového profilu. Průměr na celém pozemku je u metody USLE-GIS vyšší v případě výskytu údolnic, jež jsou z manuálního postupu vyloučeny. Metoda USLE-GIS zohledňuje konvergence a v údolnicích predikuje řádově vyšší hodnoty smyvu, přičemž neuvažuje možnou sedimentaci v těchto lokalitách. Pro případné porovnávání je třeba expertním odhadem tyto lokality ze stanovování průměru vyloučit.

Z mapy lokálních hodnot smyvu pro jednotlivé pixely nelze přímo odečítat konkrétní ztrátu půdy a porovnávat ji s přípustnou ztrátou půdy (G_P) dle metodiky Janečka a kol. (2012). První pixel směrem po svahu, kde dojde k překročení hodnoty G_P, není místem určeným pro návrh TPEO! Jak bylo řečeno výše, k překročení přípustné ztráty půdy na dané části pozemku dojde až ve chvíli, kdy průměrná specifická ztráta půdy (t ha^{-1} rok^{-1}) z celé oblasti nad daným pixelem překročí hodnotu G_P. Stále je třeba si uvědomovat, že přípustná ztráta půdy G_P je definována pro průměrný smyv na daném svahu, přičemž lokální hodnoty, vypočtené metodou USLE-GIS zohledňují podmínky pouze v daném pixelu. Neintegrují v sobě hodnoty smyvu z přispívající oblasti!

Samotná metoda USLE-GIS není nástroj určený pro navrhování TPEO a není ji možno použít k trasování ani dimenzování daných prvků. Nicméně součástí metody a analýzy morfologie území v GIS obecně je řada výpočtů a nástrojů, jež velmi usnadňují lokalizaci kritických profilů (údolnice, uzávěrové profily odtoku) a lokalizaci kritických lokalit (oblasti maximálních sklonů, oblasti konvergencí).

Výsledkem metody USLE-GIS je podrobný prostorový náhled na více a méně ohrožené lokality v rámci každého pozemku. Podstatně rychleji a podrobněji než v případě manuální profilové metody dokážeme takto zmapovat celé řešené území a naplánovat efektivní implementaci všech prvků protierozní ochrany (plošných i technických).

Metodu lze použít pro efektivní vymezení drah soustředěného odtoku. K tomu slouží vstupní vrstva akumulace odtoku (velikostí povodí ke každému pixelu). Je na úvaze každého řešitele a výsledcích místního šetření, jaká plochá mikropovodí bude zvolena za limitní pro vytvoření soustředěného odtoku po povrchu pozemku. Vhodným postupem je přímá vizualizace vrstvy akumulace odtoku a nalezení všech uzávěrových profilů na každém řešeném pozemku. Ty je třeba dále místním šetřením posoudit a navrhnout na nich případná opatření zachycující sediment, resp. odtok. Ideálním postupem je vizualizovat v GIS dráhy soustředěného odtoku společně s mapou ztráty půdy na jednotlivých pixelech, abychom odhadli, z kterých částí svahu bude do údolnic vneseno významnější množství sedimentu.

Dále lze metodu využít pro analýzu místní sklonitosti dle DMT. Mapa sklonu s volitelnou barevnou škálou odpovídajících limitů sklonitosti vizualizovaná společně s dalšími mapami (např. ztráty půdy) umožňuje posoudit dostupné sklony optimální pro jednotlivé prvky TPEO (průleh, mez, svodný příkop aj.). Cílem je zde nikoli dimenzovat, ale rozvrhnout si předběžné umístění daných prvků a stanovit koncepci ochrany celého řešeného území.

S podobným účelem **lze metodu využít pro výpočet orientační přípustné délky svahu** pro jednotlivé svahy daného území. Zde je však preferováno využití fyzikálně orientovaného přístupu (např. modelu SMODERP). Metodou USLE-GIS postupujeme inverzí daných rovnic. Při znalosti všech dílčích faktorů USLE můžeme přípustný L-faktor odvodit jako:

$$L_P = \frac{G_P}{R * K * S * C * P}$$

Kde:

- G_P přípustná ztráta půdy,

a následně přípustnou délku svahu lze vypočítat jako:

$$l_P = 22{,}13 * (L_P)^Q$$

Kde:

- L_P přípustný L faktor univerzální rovnice,
- Q inverzní exponent k exponentu p v rozmezí:

Q = 10/5	resp. 2	pro sklony větší než 5 %
Q = 10/4	resp. 2,5	pro sklony v rozmezí 3–5 %
Q = 10/3	resp. 3,3	pro sklony v rozmezí 1–3 %
Q = 10/2	resp. 5	pro sklony do 1 %

Tento výpočet nelze provádět distribuovaně pro jednotlivé pixely řešeného území, je možné jej provést pouze pro celistvé jednotlivé analyzované svahy. Opět platí, že přípustná délka se určuje na základě průměrných hodnot faktorů USLE pro daný dílčí svah.

Obecně lze konstatovat, že **metoda USLE-GIS je vhodná především pro přehledovou analýzu většího území**, jejímž cílem je vytipovat vhodnost a potřebný počet jednotlivých prvků TPEO v daném regionu, a je tak možno připravit nákladovou cost-benefit analýzu různých variant řešení protierozní ochrany. Pro samotné návrhy a zejména dimenzování je nezbytné metodu doplnit dalšími nástroji.

4.3 Vstupní data

Základní polohopisné podklady potřebné pro výpočet USLE v prostředí GIS lze získat od Českého úřadu zeměměřického a katastrálního – dále jen ČÚZK (digitální modely terénu a polohopisná kostra území – katastrální mapy, cestní síť, intravilán), od Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy, v. v. i. – dále jen VÚMOP, v. v. i., (půdní data) a stáhnout z veřejného registru zemědělské půdy (LPIS). Případně je možno využít nebo digitalizovat data z veřejně dostupných mapových serverů a od ostatních poskytovatelů.

Základními doporučenými podklady pro běžný výpočet jsou:

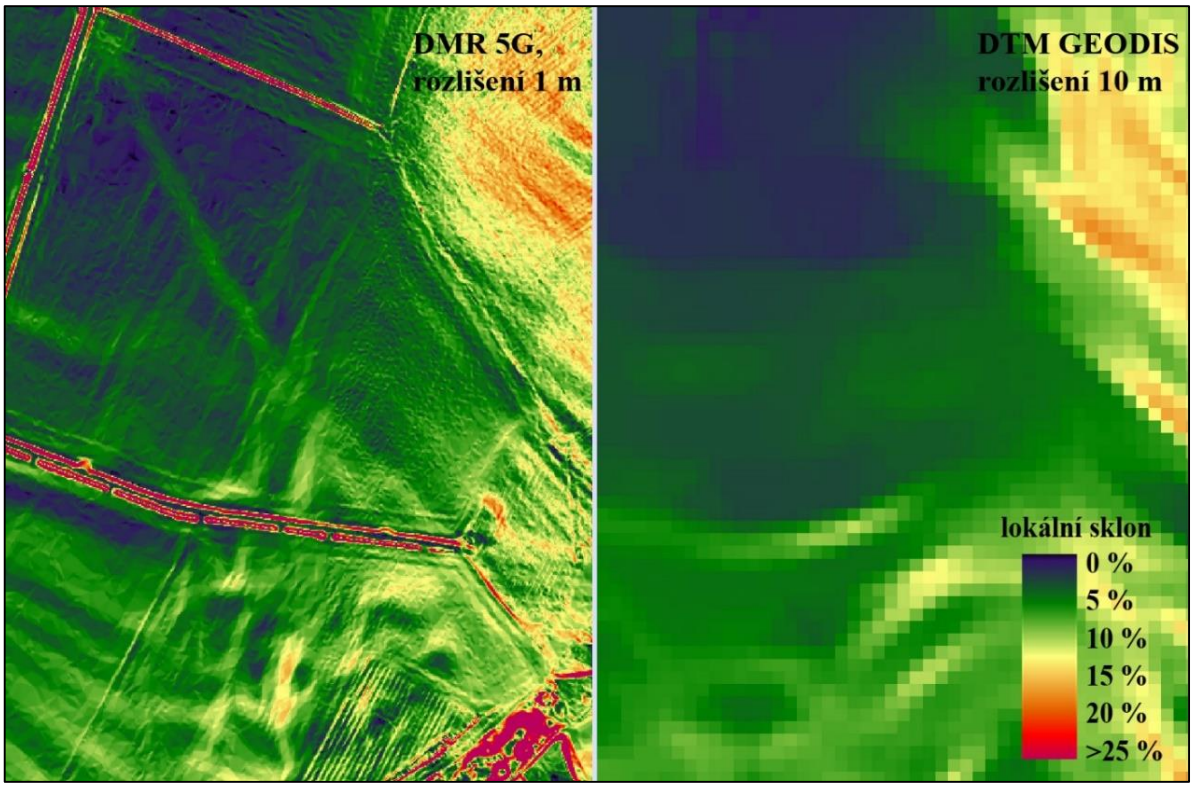
- výpočet faktoru LS: DMT DMR 4G (poskytovatel ČÚZK), případně DMR 5G, případně lokální podrobnější zaměření, např. pomocí dGPS,
- výpočet faktoru R: platná metodika (Janeček a kol., 2012), do budoucna mapa R-faktoru pro ČR dostupná na serveru SOWAC-GIS (poskytovatel VÚMOP, v. v. i.), v případě dostatku podrobných dlouhodobých kontinuálních srážkoměrných údajů pro danou lokalitu lze přímo určit R-faktor výpočtem dle platné metodiky (Janeček a kol., 2012),
- výpočet faktoru K: mapa faktoru K a mapa hloubky půdy vypočtená na základě map BPEJ (poskytovatel VÚMOP, v. v. i.), případně půdní vzorky a postup dle platné metodiky (Janeček a kol., 2012). S výjimkou přehledových výpočtů pro rozsáhlá území není vhodné využití méně podrobných map (např. KPP 1 : 200 000),
- výpočet faktorů C a P: registr zemědělské půdy LPIS a informace o dlouhodobých osevních postupech od hospodařících subjektů. V ČR není dosud dostupná jednotná databáze celorepublikově popisující přesné osevní postupy a zavedené minimalizační technologie zpracování půdy pro jednotlivé půdní bloky.

Celková erozní ohroženost území je dána především převládajícím sklonem a vegetační ochranou půdního povrchu, dále se uplatňuje zrnitostní složení, kvalita půdních agregátů a celková infiltrační schopnost dané půdy. Z tohoto pohledu poměrně hrubá data postačují pro určení více či méně ohrožených pozemků. Ve chvíli, kdy na předem vytipovaném ohroženém pozemku chceme situaci přesněji analyzovat, tedy nalézt lokální rozdíly ve smyvu a preferenční dráhy výmolné eroze, je určujícím faktorem podrobná morfologie a místní kvalita zapojení vegetačního porostu.

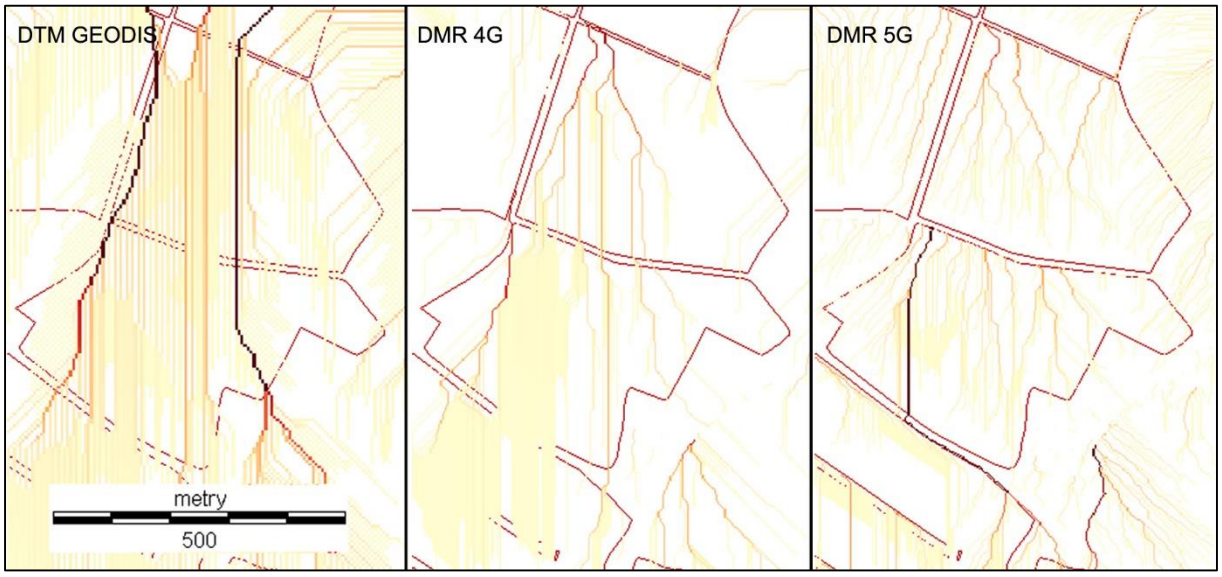
Klíčovým vstupem určujícím místní intenzitu erozního procesu je proto **digitální model terénu.**

Testování prokázalo, že dosud běžně používané zdroje dat v ČR pro tento účel neposkytují dostatečné informace o detailní morfologii pozemků a predispozici k tvorbě menších erozních rýh. Zejména v případě méně sklonitých území nejsou všechny údolnice zachyceny modely ZABAGED VÝŠKOPIS 3D vrstevnice, resp. odvozený

výškopis grid (ČÚZK – rozlišení 10 m), ani DTM (GEODIS, rozlišení 10 m), případně DMÚ 25 (Obr. 2). Méně podrobné zdroje výškopisu jsou pro detailní výpočty zcela nevhodné (Obr. 1).



Obr. 1: Rozdíl v podrobnosti modelů DMR 5G a DTM GEODIS vyjádřený na vrstvě sklonů (nezachycená údolnice křížem pozemku).

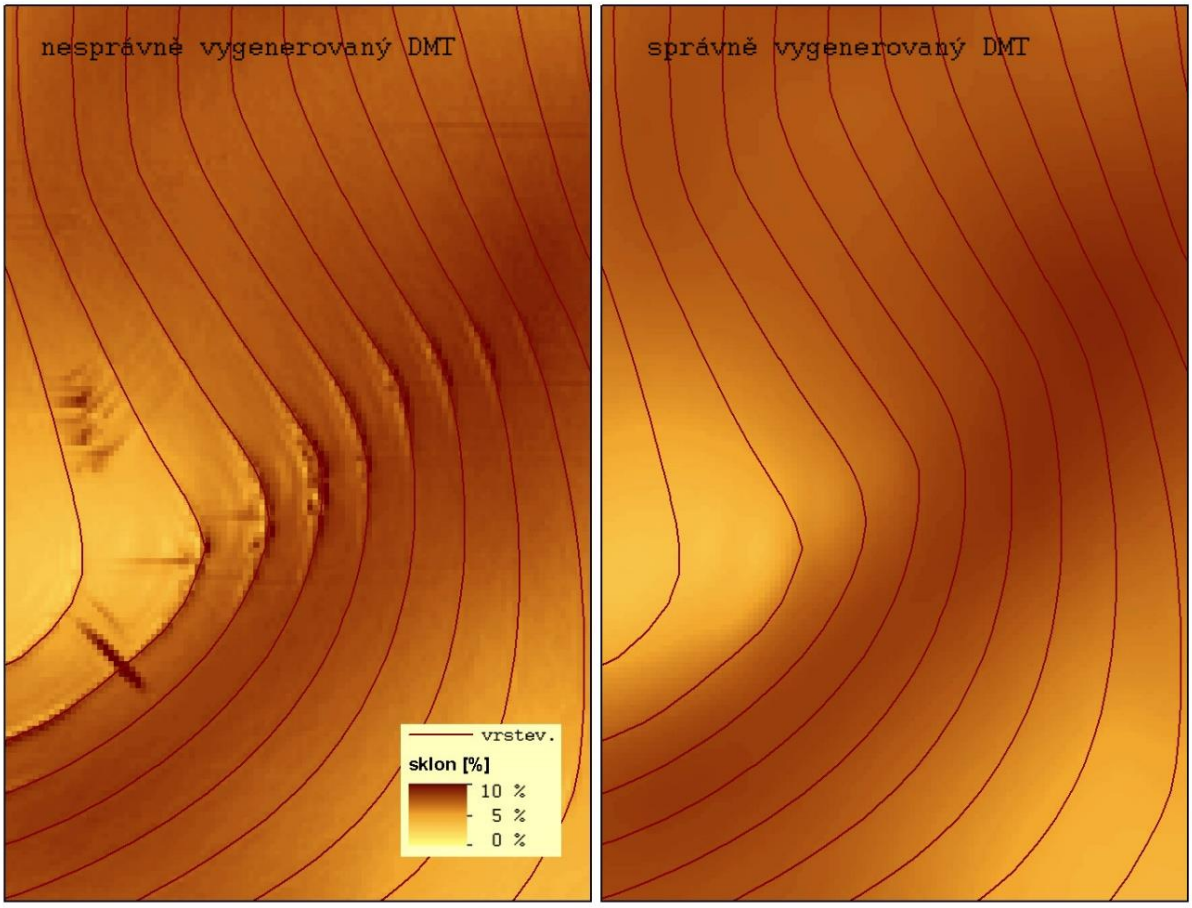


Obr. 2: Nezachycené údolnice a nezachycené hrázky na nedostatečně podrobném modelu DTM GEODIS, porovnání s DMR 4G a DMR 5G

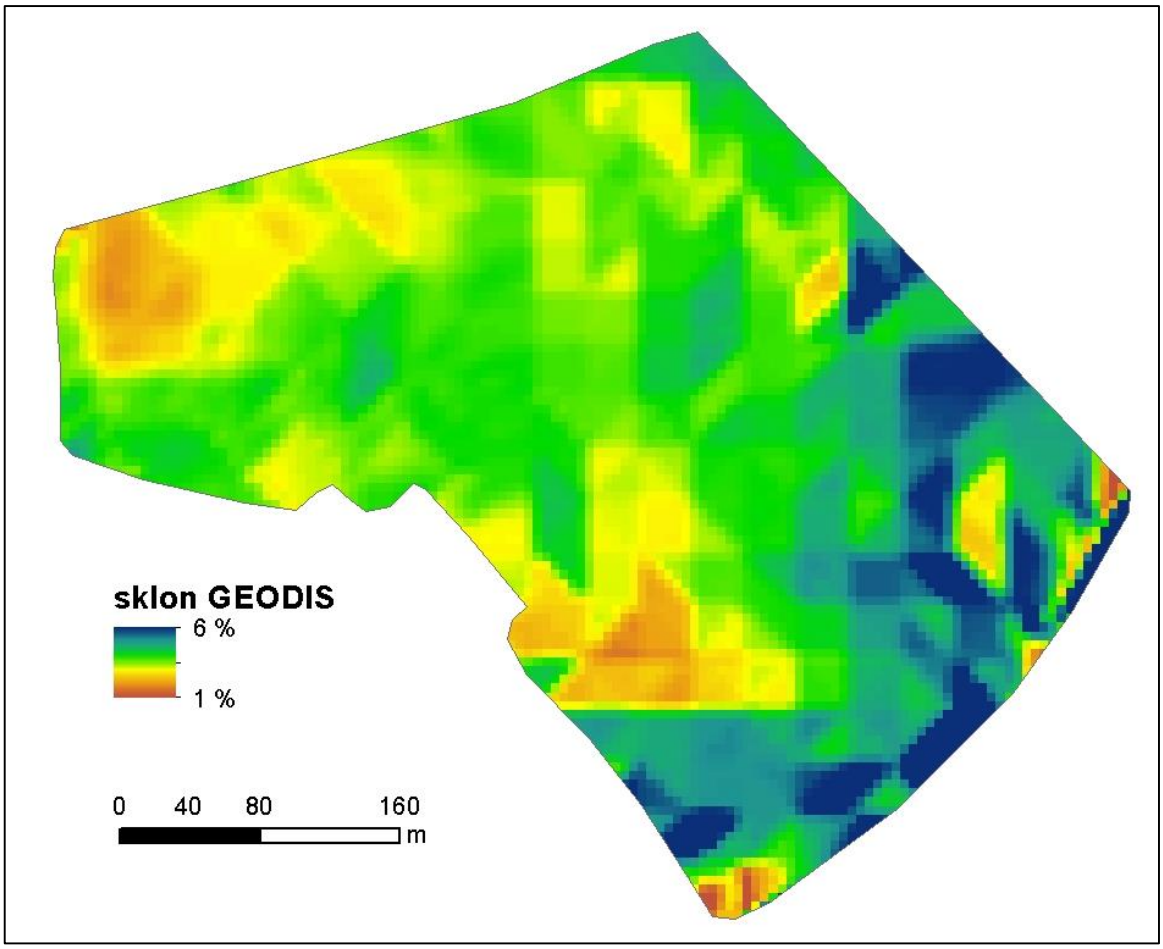
Problémem DMT ve vysokém rozlišení odvozovaných z vrstevnicových modelů (ZABAGED, DMÚ25) často bývá efekt „schodů“, kdy dochází k vytvoření místně sníženého sklonu v místě samotné vrstevnice, jenž se promítne do hodnot LS faktoru

a následně i do rozložení hodnot výsledného smyvu. Tento efekt je však chybou přípravy dat (resp. procesu interpolace) a lze jej eliminovat použitím vhodné interpolační metody a nastavením jejích parametrů (Obr. 3).

Podobné problémy se vyskytují i u komerčních rastrových produktů. Problémem DTM (GEODIS, rozlišení 10 m) je v mnoha lokalitách nevyhlazený terén s různým směrem orientovanými ploškami původních podkladových trojúhelníků TIN sítě, jež byla mezikrokem přípravy modelu. Tyto chyby se následně promítají do nesprávného směrování odtoku a chybně nalezených údolnic řešené lokality (Obr. 4).



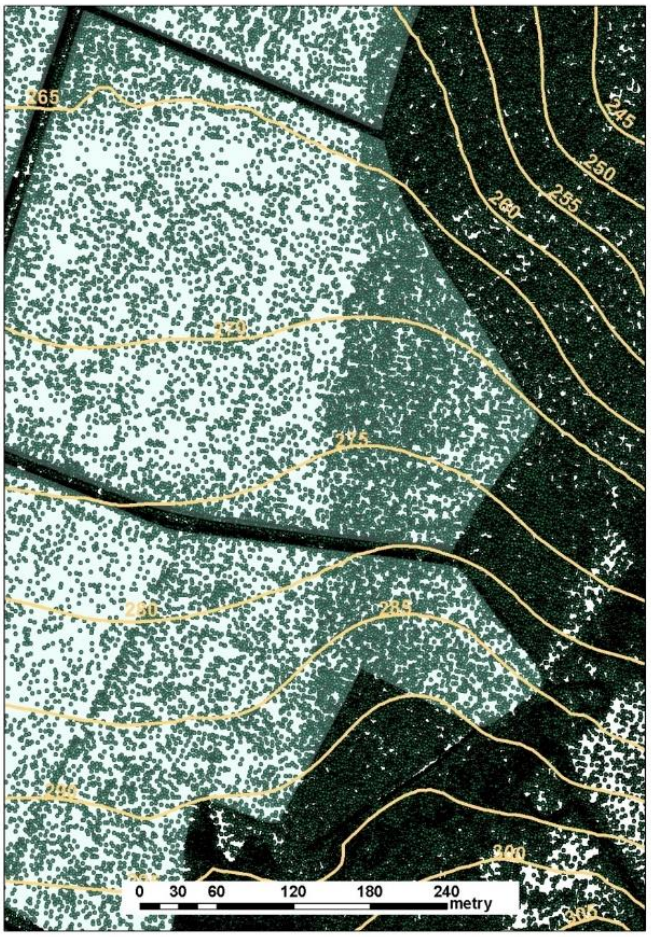
Obr. 3: Artefakty vznikající při nesprávné interpolaci DMT z vrstevnic.



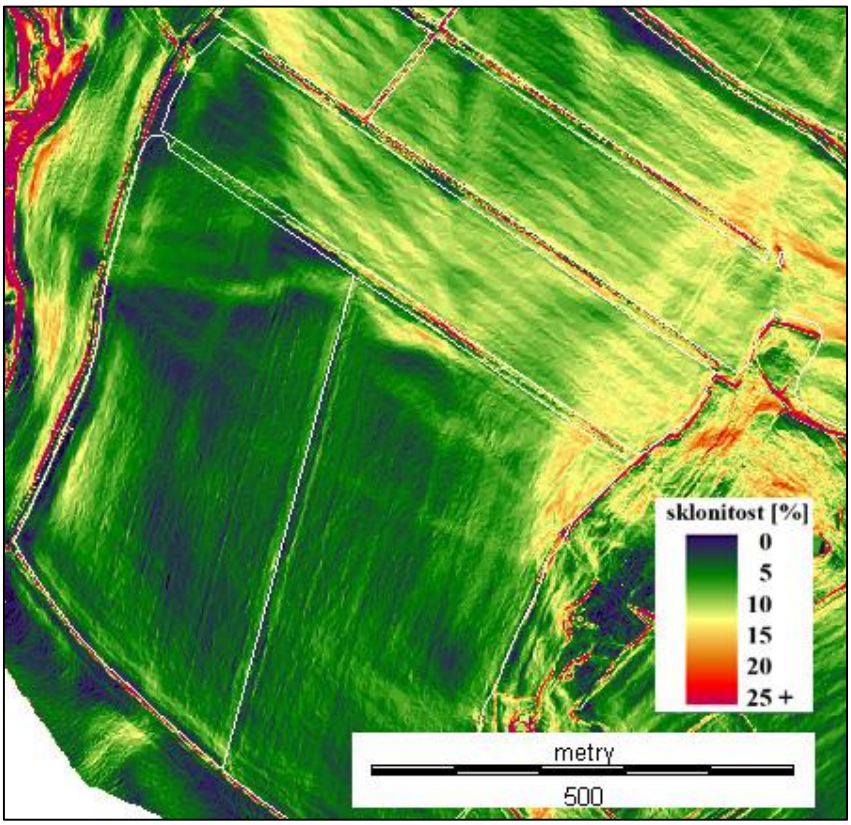
Obr. 4: Artefakty ve výškopisném modelu DTM GEODIS (rozlišení 10 m)

Celorepublikově proto bude v nejbližší době vhodné využívat data ČÚZK vytvářená pomocí leteckého laserového skenování – produkt Digitální model reliéfu České republiky (DMR). Model je dostupný ve dvou verzích označovaných DMR 4. generace (DMR 4G) a DMR 5. generace (DMR 5G), přičemž výrazně podrobnější DMR 5G je nyní k dispozici pro cca 40 % území ČR a celá ČR by měla být tímto modelem pokryta do konce roku 2015. DMR 4G je rovněž ve fázi zpracování, nicméně od počátku roku 2014 by mělo být k dispozici pro celé území ČR.

Běžným postupem výpočtu pomocí USLE-GIS jsou řešeny zemědělské pozemky jako izolované celky. V tom případě DMR 5G (s průměrným pokrytím cca dvou výškopisných údajů na m^2, které tedy umožňuje smysluplné rozlišení výpočtu v rastru cca 1 x 1 m) není zcela nezbytným podkladem pro přibližný výpočet. Postačuje DMR 4G a výpočet odpovídající jeho nativnímu rozlišení, tedy 5 x 5 m. DMR 5G a podrobnější modely jsou nezbytné, chceme-li při výpočtu odtokových drah zohlednit skutečné terénní prvky. To se však již netýká běžného postupu a využití metody USLE-GIS.



Obr. 5: Rozdílná hustota a členitost výškopisného podkladu DMR 5G v rámci jednoho půdního bloku



Obr. 6: Projevy směru obdělávání pozemků ve výškopisu DMR 5G

Problémem DMR 5G je dosud nedostatečná filtrace vegetačního pokryvu a s ní související nerovnoměrná hustota výškopisných bodů v různých lokalitách. V rámci jednoho řešeného pozemku tak model složený ze dvou náletových scén vykazuje odlišnou členitost terénu (Obr. 5), což způsobuje problémy při určování odtokových drah na daném pozemku (Obr. 1). V modelu DMR 5G jsou na pozemcích vždy patrné výškopisné projevy kolejových řádků. Výše uvedený problém filtrace vegetačního pokryvu v řadě případů neumožňuje ověřit, zda prohlubně ve směru kolejových řádků jsou způsobeny skutečnou výškou terénu, nebo právě nedostatečně odfiltrovanou vegetací (Obr. 6). Je-li to nezbytné, je třeba toto ověřit terénním zaměřením.

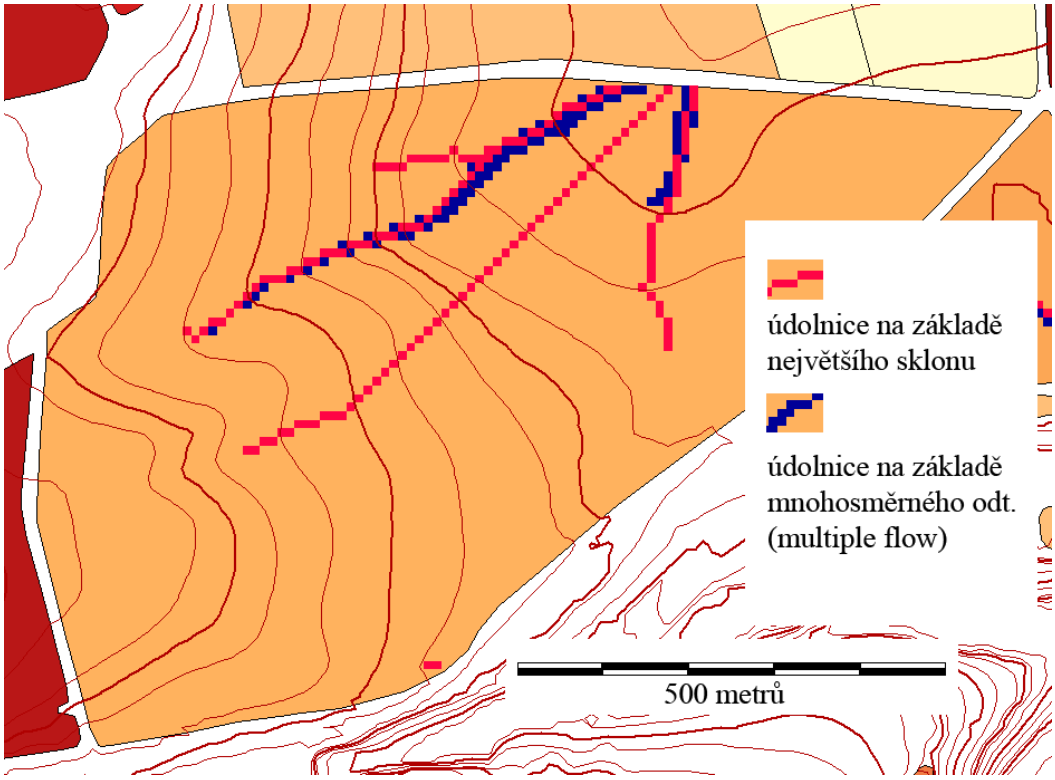
4.4 Výhody a nevýhody

Jak již bylo konstatováno v předchozích kapitolách, výpočet smyvu pomocí USLE-GIS není metodou určenou pro umísťování a dimenzování TPEO. Nelze to hodnotit jako nevýhodu dané metody, jedná se o fakt daný principem metody USLE, která nepracuje s návrhovými hodnotami a neumožňuje dimenzování daných prvků.

Metoda USLE-GIS je nicméně při správném použití vynikajícím prostředkem pro vytipování rizikových lokalit v řešeném území, umožňuje provést podrobnou analýzu sklonových poměrů i nalezení údolnic a odhad jejich náchylnosti k transportu sedimentu. Za výhodu této metody lze považovat její jednoduchost, která v případě dostatku kvalitních dat umožňuje variantní řešení rozsáhlých lokalit, a tudíž provedení optimalizace procesu návrhu celého komplexu protierozních opatření, nikoli pouze TPEO.

Oproti klasickému manuálnímu postupu je kromě vyšší efektivnosti (rychlosti zpracování) velkou výhodou plně distribuovaný přístup, který umožňuje lokalizovat na pozemcích nejohroženější místa a vymezit jejich skutečný rozsah. Při správném použití je metoda rovněž objektivní – odstraňuje značnou subjektivitu původního postupu, spojenou s manuálním vymezováním charakteristických profilů.

Plně distributivní přístup však v sobě nese rovněž dvě rizika. Za prvé může mít uživatel metody tendenci lokálně predikované hodnoty v jednotlivých pixelech považovat za skutečné hodnoty ztráty půdy v daných místech pozemku a porovnávat je s přípustným smyvem G_P. Jak již bylo řečeno, i GIS metoda vychází z původní USLE, a proto realistické číselné vyjádření dlouhodobého smyvu je možné vyjádřit pouze formou průměru za řešenou část svahu a bez zahrnutí procesu sedimentace a bilance v daných pixelech metoda neurčuje celkový transport sedimentu z plochy pozemku, ale pouze redistribuci půdy na daném půdním bloku.



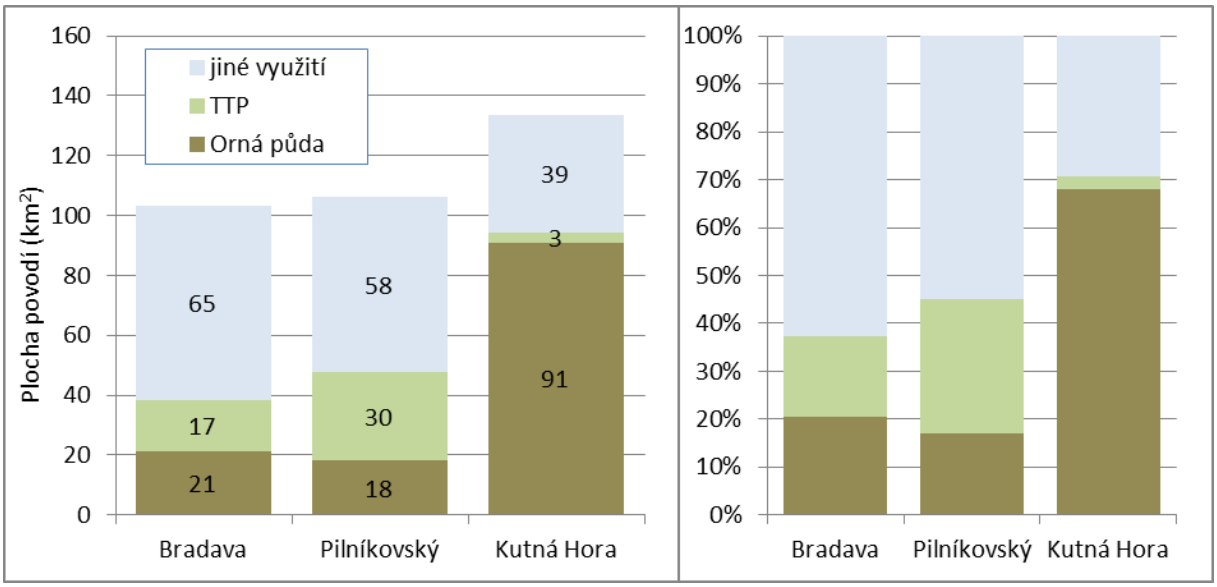
Obr. 7: Rozdíly mezi údolnicemi dané lokality v závislosti na algoritmu směrování odtoku

Za druhé plně distributivní přístup svádí k přesvědčení, že prostorová mozaika smyvu vyjadřuje realistické rozložení rizika odnosu na pozemku. Tato mapa však plně závisí na vstupních datech. Pokud jsou v rámci pozemku vymezeny dvě hlavní půdní jednotky s trojnásobným rozdílem v hodnotě K-faktoru, při přestoupení této hranice poklesne ztráta půdy v mapě mezi dvěma sousedními pixely o třetinu. Budou-li dané půdy na svahu pod sebou, ve směru po spádnici se vzhledem k akumulaci povrchového odtoku velmi pravděpodobně nebude jednat o realistický odhad. Navíc hranice mezi danými půdami pravděpodobně nebude mít na jednom půdním bloku ostré rozhraní. Podobně to je s rizikem možných artefaktů na DMT ilustrovaným v minulé kapitole. Bez důkladné kontroly kvality DMT nelze spoléhat na přesné určení lokálních hodnot smyvu. K výrazně rozdílnému prostorovému vyjádření hodnot maximální ztráty půdy může vést rovněž použití odlišných algoritmů směrování odtoku. Zejména rozdíly mezi jednosměrným a vícesměrným odtokem, který pro rastrové výpočty doporučujeme, mohou vést ke značně rozdílným trasám vypočtených údolnic (Obr. 7).

Využití metody USLE-GIS proto vyžaduje kvalitní znalost problematiky GIS a používaných dat, v opačném případě může vést i k výrazným chybám, případně nesprávné interpretaci výsledků. Proto je nutné doporučit důkladné nastudování problematiky zpracování dat v GIS, případně konzultaci s odbornými pracovišti.

4.5 Příklad použití

Příklad použití USLE-GIS pro přímý návrh TPEO zde není ilustrován, neboť jak bylo výše řečeno, metoda pro tento účel určena není. Jak bylo uvedeno, metoda je vhodná pro vytipování rizikových lokalit, kde je třeba aplikovat potřebná opatření, v širším řešeném území. Například ve třech srovnávacích povodích o rozlohách 103–133 km^2 byly pro různou morfologii a využití území (Obr. 8) testovány nároky na počty zavedených TPEO při maximalistickém scénáři s cílem omezit smyv na všech pozemcích zemědělského půdního fondu (ZPF) na úroveň přípustné ztráty 4 t ha^{-1} rok^{-1}.



Obr. 8: Porovnání celkové výměry ZPF a míry zornění v modelových povodích Bradavy, Pilníkovského potoka a oblasti Hořan u Kutné Hory.

Výpočet byl proveden metodou USLE-GIS popsanou podrobně v předchozích kapitolách, pro výpočet LS faktoru byl využit postup přímého výpočtu v GIS, R-faktor byl určen jednotnou hodnotou 40 N h^{-1} rok^{-1}, protierozní opatření nebyla uvažována a v osevním postupu na orné půdě bylo uvažováno 20% zastoupení širokořádkových plodin (celkový průměrný C-faktor byl 0,27). Polohopisnými podklady byly: výškopis – DTM GEODIS (rozlišení 10 m), pozemky a rozlišení trvalých kultur – databáze LPIS, využití území mimo ZPF – databáze ZABAGED.

Následně byla v GIS při uvažování přípustné ztráty půdy 4 t ha^{-1} rok^{-1} určena přípustná délka svahu metodou popsanou v kapitolách 4.1 a 4.2 a porovnáním se skutečnými délkami svahů byly vypočteny průměrné počty potřebných přerušujících prvků (příkopů, mezí nebo průlehů) na pozemcích. Pomocí automatické analýzy údolnicových profilů na pozemcích (s hodnotou dílčího povodí překračující 2 ha, resp. 5 ha) byly rovněž vypočteny počty rizikových údolnic, pro možné návrhy záchytných prvků.

Výsledky modelování jsou shrnuty v Tab. 2:

Tab. 2: Základní charakteristiky testovacích oblastí a výsledky modelování a analýz

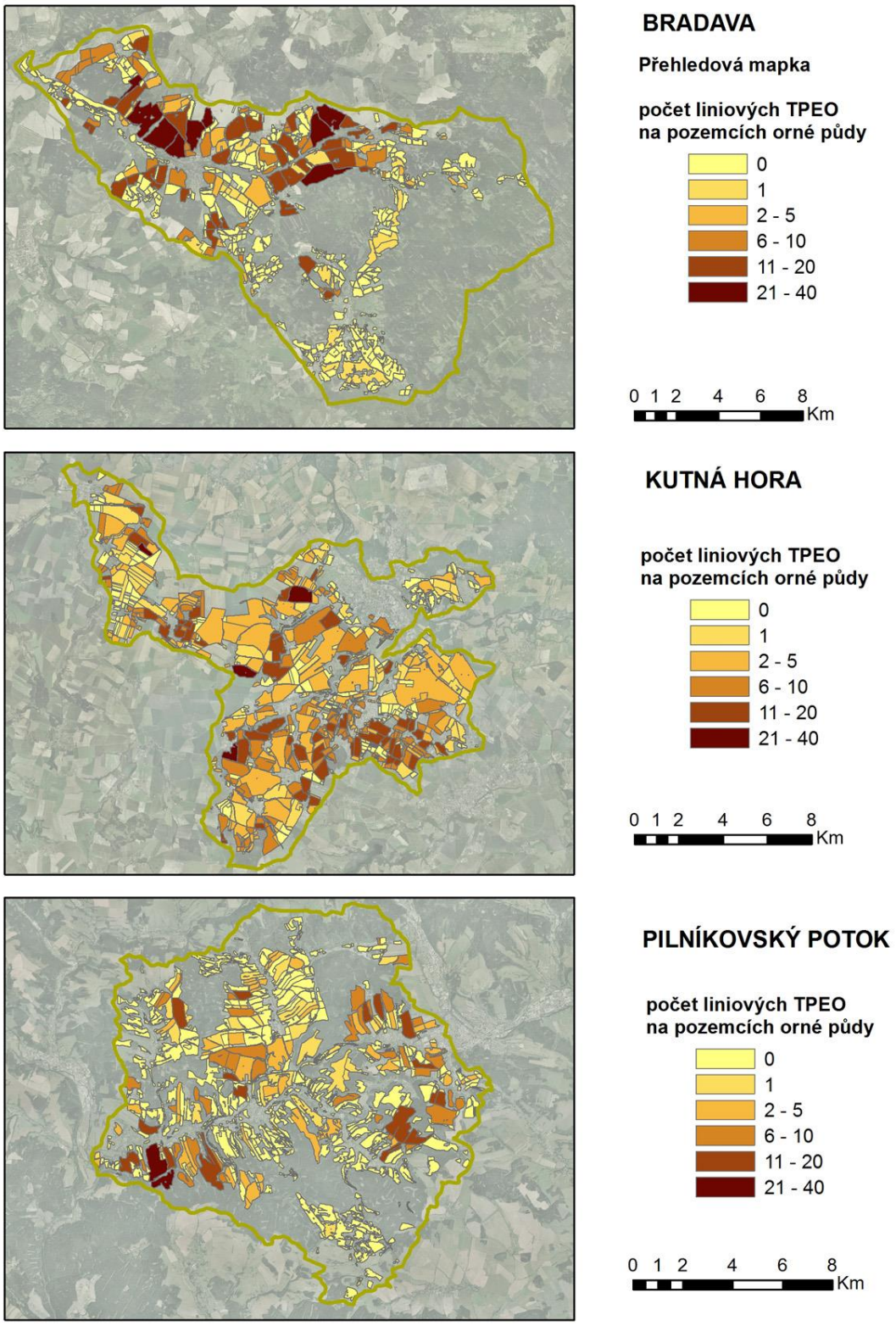
	Bradava	Pilníkovský	Kutná Hora
Počet pozemků orné půdy	**139**	**146**	**674**
Výměra orné půdy dle LPIS (km^2)	21,07	18,16	91,03
Celková výměra ZPF dle LPIS (km^2)	38,48	47,90	94,50
Průměrná ztráta půdy na orné půdě	8,62	6,42	4,93
Počet pozemků překračujících přípustný smyv	124	110	407
Plocha pozemků překračující přípustný smyv (%)	75	76	55
Plocha pozemků překračující přípustný smyv (ha)	1581,6	1372,9	5037,3
Průměrná nejdelší odtoková dráha na pozemcích (m)	369	305	318
Průměrná příp. délka svahu na pozemcích (m)	**88**	**116**	**217**
Maximální počet TPEO na jednom pozemku	41	27	24
Celkový počet liniových TPEO na pozemcích OP	1130	733	2305
Průměrný počet liniových TPEO na pozemcích OP	8,13	5,02	3,42
Průměrná celková délka liniových TPEO v povodí (km)	372,43	268,85	721,01
Průměrná délka liniových TPEO na 1 km^2 OP (km)	**17,67**	**14,81**	**7,92**
Počet ohrožených údolnic (akumulace > 2 ha)	127	168	390
Počet ohrožených údolnic (akumulace > 5 ha)	37	40	142

Ve výsledcích jsou patrné výrazné rozdíly mezi jednotlivými typy krajiny ČR. V rovinatější krajině Kutnohorska je průměrná přípustná délka svahu 217 m oproti 116, resp. 88 m v ostatních povodích. Z toho vyplývá i celkově menší množství navržených TPEO na orné půdě (OP). Jejich celková specifická délka na Kutné Hoře činí cca 8 km km^{-2} OP, přičemž v ostatních povodích je tato hustota zhruba dvojnásobná (Obr. 9).

Pokud bychom ovšem hodnotili celkové množství navržených TPEO metodou GIS v povodích, bude jich na Kutné Hoře realizováno největší množství – celkem přibližně 720 km oproti 370 km na Bradavě a 270 km na Pilníkovském. To je dáno největší celkovou plochou povodí a zejména mimořádně vysokou mírou zornění v tomto typu povodí (Obr. 8).

Z uvedených analýz rovněž jednoznačně vyplývá, že pouze technická opatření nelze ani v jednom typu krajiny k ochraně půdy před erozí využít. Abychom dosáhli trvale udržitelné kvality půdy při zachování současných osevních postupů bez využití ochranné agrotechniky, bylo by v průměru na každém pozemku orné půdy v ČR třeba instalovat tři až osm záchytných prvků úměrně sklonitosti daného území. Investiční náklady na návrat naší krajinné mozaiky do udržitelného stavu formou instalace prvků TPEO na všech potřebných místech by byly enormní.

V GIS je dále možno prostorově analyzovat lokality, kde je navržený počet prvků TPEO ještě realistický oproti oblastem a pozemkům, kde je třeba integrovat více nástrojů protierozní ochrany, zejména pak doporučit bezorebné technologie nebo trvalé zatravnění.



Obr. 9: Počty potřebných TPEO přerušujících povrchový odtok dle výpočtu metodou USLE-GIS v jednotlivých povodích.

5 EROSION-3D

5.1 Popis metody

EROSION-3D (Schmidt a kol., 1996) je plně distribuovaný, fyzikálně založený, epizodní model srážko-odtokových vztahů, erozních a transportních procesů. Vstupní i výstupní veličiny jsou tvořeny rastrovými vrstvami plně pokrývajícími modelované území. Model lze použít pro výpočet množství a charakteru erodovaného materiálu a množství protékající vody v každém výpočetním elementu (pixelu) zvolené oblasti. Model je epizodní a je možné jím simulovat povrchový odtok vyvolaný příčinnou srážkou proměnnou v čase i prostoru (von Werner, 2006). Výsledky modelu je možné použít pro určení rizikových ploch z hlediska intenzity eroze, koncentrace odtoku a depozice erodovaného materiálu.

Model EROSION-3D je dostupný pouze v placené verzi a je možné jej zakoupit u společnosti GeoGnostics (http://www.geognostics.de). Předmětem nákupu je licence pro časově omezené užívání programu případně doplňkových modulů. Doplňkové moduly zahrnují:

- sub-model pro simulaci povrchového odtoku (Runoff module),
- sub-model pro simulaci odtoku z tání sněhu (Snow module),
- sub-model pro simulování transformace odtoku a transportu sedimentu nádržemi (Retention basin module),
- sub-model pro simulaci infiltrace ve vícevrstvém prostředí (Multi layer infiltration module),
- sub-model pro simulaci dlouhodobých a opakovaných sekvencí srážek (Long term module),
- databázový systém pro generování vstupních parametrů z katalogových dat (Data processor).

Výstup z modelu tvoří soubor rastrových vrstev pro jednotlivé výstupní veličiny. Tyto vrstvy výsledků je možné ukládat pro každý časový krok simulace a četnost ukládání je možné zvolit zvlášť pro každou výstupní vrstvu. Odtokový modul dále umožňuje definovat profily (buňku rastru), z nichž jsou hodnoty výstupních veličin ukládány jako časové řady v tabelované podobě.

Výstupy z modelu EROSION-3D zahrnují:

- charakter odtoku v buňce:
  - bilanci erodovaného materiálu,
  - bilanci přítoku, srážky a odtoku,
- charakter odtoku v přispívající oblasti buňky:
  - průměrnou absolutní erozi,
  - průměrnou absolutní depozici,

- čistou erozi,
- přítok vody do buňky,
- vstup sedimentu do buňky,
- poměr hmotnosti sedimentu a objemu vody vstupujícího do buňky,
- zastoupení jednotlivých zrnitostních frakcí v sedimentu,
- celkovou absolutní erozi.

Model simuluje pouze povrchový odtok, infiltrovaná část srážky již není dále sledována. V základní verzi umožňuje modelovat pouze vertikálně homogenní půdní profil, při použití modulu pro vícevrstvou infiltraci lze půdní vlastnosti definovat pro více vrstev (půdních profilů). Tyto vrstvy jsou však využity pouze pro modelování svislé infiltrace, hypodermický odtok a exfiltrace podzemní vody tedy nejsou součástí výstupních hodnot odtoku.

Model v základní verzi umožňuje modelovat jednu srážkovou epizodu, která nemá omezené trvání, nicméně zadané vlastnosti půdy a digitální model terénu zůstávají neměnné pro celou simulovanou srážku. Rozšiřující modul programu „Long term simulation module“ umožňuje modelovat sekvenci srážkových epizod a pro každou z nich definovat jiné půdní vlastnosti, což umožňuje simulovat změnu vlastností půdního povrchu v průběhu roku v závislosti na obdělávání a růstu plodiny. Zároveň je možné využít modifikace terénu na základě vypočtené eroze/depozice v předchozí srážkové události.

Long term simulation module také umožňuje nastavit počet opakování výpočtu pro zadanou srážku (sekvenci srážek) a tím simulovat dlouhodobou ztrátu půdy. Návrhová sekvence srážek pro Českou republiku nebo metodika pro její vytvoření v této chvíli neexistuje, a tak není možné přímé porovnání epizodního modelu EROSION-3D s dlouhodobými empirickými modely.

Velkou výhodou modelu EROSION-3D v prostředí, kde je lokalizován, je jeho velmi dobrá podpora databázemi vstupních hodnot. K modelu je možné dokoupit „Data processor“, který je grafickým uživatelským rozhraním pro databázové dotazy z katalogů vstupních hodnot. Pomocí něj je možné snáze a rychleji generovat tabulky vstupních parametrů pro dané půdy a zvolené podmínky simulace (období roku, plodiny, způsob obdělávání, stav ploch a další). Model byl vyvinut v SRN – ve spolkové zemi Sasko, pro niž v současné době existují v plné šíři katalogy všech nutných vstupních hodnot. Současně se dokončuje i podobný katalog pro Brandenbursko a další spolkové země.

Největší slabinou pro rutinní využití modelu v podmínkách ČR je nedostatek vstupních dat především z kategorie půdních a klimatických podmínek. Jedná se především o klasifikaci půd do devíti tříd podle zastoupení zrnitostních frakcí a o návrhové srážky s časově proměnným průběhem. Tato data lze pro podmínky ČR zajistit, nicméně pouze vlastním průzkumem, resp. poměrně náročným odvozením. Podrobně je tato problematika diskutována v kapitolách 5.3.2 a 5.3.3.

5.2 Vhodnost využití v rámci TPEO

Díky plně distribuovaným vstupním i výstupním vrstvám lze simulovat chování povrchového odtoku a transportu splavenin pro svah, půdní blok i povodí. Modelovaná plocha nemusí tvořit uzavřené povodí a způsob sestavení závisí pouze na účelu modelu. Podrobnost výstupů je závislá na podrobnosti sestavení modelu, dané především přesností a zvoleným rozlišením digitálního modelu terénu. Možnosti pro modelování protierozních opatření jsou tedy poměrně široké, od organizačních v rámci půdního bloku, agrotechnických v rámci skupiny pozemků až po technická pro dílčí povodí i středně velká povodí.

Možnosti simulace technických protierozních opatření jsou limitovány použitým způsobem směrování odtoku v modelu. Odtok je směrován pouze na základě digitálního modelu terénu, čili není možné externě definovat směr odtoku jinak než úpravou vstupního DMT. Tento přístup nese jistá rizika, nicméně principiálně jej lze použít pro simulaci celé škály technických protierozních prvků.

Z výsledků simulace EROSION-3D nelze přímo odvodit konkrétní umístění prvků TPEO, protože simulace dává výstupy pouze pro konkrétní simulovanou srážku a metodika odvození zátěžové srážky není k dispozici stejně jako limity přípustné eroze pro epizodní modelování. Pokud je simulováno více scénářů zahrnujících různé srážky i různé počáteční podmínky, mohou výsledky simulace ukázat na místa, která mají díky morfologii terénu predispozice ke zvýšené intenzitě eroze, soustředění povrchového odtoku, nebo depozici sedimentu. Tyto informace pak mohou poskytnout užitečné vodítko pro návrh celkové koncepce systému prvků technické protierozní ochrany. Model lze naopak velmi efektivně využít pro posouzení nutnosti ochrany před off-site efekty povrchového odtoku (pluviální povodně), eroze a transportu splavenin a napomoci při návrhu účinných opatření proti nim.

Prvky TPEO lze modelovat úpravou vlastností povrchu a úpravou DMT. V případě upravení morfologie DMT je nutné v odpovídajícím rozsahu změnit vlastnosti povrchu, aby nedocházelo ke zvýšené erozi na plochách s uměle zvýšeným sklonem (břehy) a koncentrací odtoku (dno). Je také třeba si uvědomit, že zahloubení koryta o šířce 1 pixel se projeví na trojnásobně široké ploše, protože snížení buněk v trase koryta logicky vede k výraznému zvýšení sklonu v navazujících okolních buňkách, a tím k odpovídajícímu zvýšení rychlostí toku a intenzity eroze. Absolutní velikost pozměněné plochy se odvíjí od použitého rozlišení modelu a teoreticky odpovídá realitě při rozlišení zhruba 1 m a menším. Při rozlišení 10 m je už vliv na okolní plochy poměrně značný.

Samostatná úprava vlastností povrchu nijak neovlivní směrování odtoku. Díky tomu jsou možnosti tohoto přístupu pro modelování prvků TPEO omezené. Další možností, která však vylučuje reprezentativní záznam hodnot povrchového odtoku nebo průtoků v korytech toků nebo prvků TPEO, je celkové odstranění povrchového odtoku pomocí kategorie využití ploch s nulovou počáteční vlhkostí (více viz kap. 5.3.2).

5.2.1 Určování kritických míst

Plně distribuovaný přístup umožňuje rozlišit plochy, na kterých dochází k plošné (mezirýžkové) erozi, místa koncentrace povrchového odtoku a místa ukládání transportovaného sedimentu. Lze tak identifikovat místa, která vyžadují zvláštní pozornost z pohledu návrhu systému TPEO v území. Pokud chybí konkrétní zkušenosti ze zájmového území, může model EROSION-3D poskytnout náhled do rizikových míst, ve kterých lze očekávat problémy spojené povrchovým odtokem a transportem splavenin.

Problematická z hlediska praktického rutinního využití modelu může být neexistence doporučených kritických (limitních) hodnot ztráty půdy nebo odtoku. Vlastní erozní škody na pozemku je třeba posuzovat individuálně. Dobrým vodítkem je například přepočet ztráty půdy, vyjádřené v lokalitě hmotnostně, na objem a jeho převedení na očekávané škody v lokalitě (např. rozměry rýhy nebo depozičního kužele). Při použití modelu pro hledání kritických míst je vždy nutno brát v úvahu dopad konkrétní modelované události v konkrétní lokalitě, a tedy i lokalizaci a kvantifikaci rizika spojeného s povrchovým odtokem a erozí.

5.2.2 Průtoky v profilech

Pro navrhování dimenzí příkopů, propustků i dalších prvků TPEO je potřeba znát hodnoty maximálního návrhového průtoku. Odtokový modul EROSION-3D poskytuje nástroj pro snadné ukládání průtokových dat ve zvolených profilech. Do zvoleného profilu (profilů) je umístěn bod, pro nějž jsou zaznamenány údaje o časovém průběhu průtoku v tabelované podobě. Bod (buňka rastru) musí být pečlivě umístěn tak, aby se nacházel v nejnižším bodě koryta.

Koryto toku je možné zdůraznit snížením vstupního digitálního modelu terénu v trase koryta. Snížení nemusí nutně odpovídat hloubce koryta. Naopak je tuto úpravu vhodné provést s hodnotou změny výšky větší než odpovídá reálným výškovým poměrům, aby bylo zaručeno správné směrování toku v místech se špatně zachycenou morfologií. Pokud je upravován DMT, je třeba ošetřit půdní parametry v místech s pozměněným sklonem nebo výškou tak, aby nedocházelo ke zvýšené erozi vlivem zvýšeného sklonu nebo koncentrace odtoku.

Je nutné ověřit a případně ošetřit, aby v zájmovém profilu nedocházelo k souběžnému toku v okolních buňkách podél koryta, což by vedlo k nezaznamenání části průtoku profilem, a tedy k znehodnocení dat pro návrh. Toku vody podél koryta lze zabránit pouze úpravou DMT a to tak, aby souběžný odtok byl sveden do sledovaného koryta před měřeným profilem.

5.2.3 Porovnání stavu před a po realizaci na zvolené návrhové srážce

Obecně platí, že k absolutním hodnotám výstupních veličin je třeba přistupovat obezřetně, neboť jsou platné pouze pro konkrétní simulovaný stav modelované plochy

a použitou srážku. Model je velmi citlivý na některé vstupní parametry (viz dále), a tak i malá změna ve vstupech může výrazně ovlivnit výstupy a závěry z nich vyvozované.

Z hlediska relativních hodnot pro porovnávání alternativních scénářů představuje EROSION-3D velmi silný nástroj. Srovnání efektů alternativních návrhů systému technických protierozních opatření a situace bez jejich realizace poskytuje velmi užitečné informace pro výběr optimální varianty a o očekávatelných důsledcích na intenzitu odtoku a erozi, transport a ukládání sedimentu.

5.3 Vstupní data

Primární vstupní vrstvou modelu EROSION-3D je rastrový digitální model terénu, který určuje prostorový rozsah a rozlišení všech ostatních rastrových vrstev. Dalšími vstupními parametry jsou srážková data, vlastnosti půdy, půdního povrchu a půdního pokryvu.

Všechny rastrové vrstvy jsou zadávány ve formátu ASCII (*.asc, *.txt), všechny tabelované hodnoty jsou zadávány ve formátu CSV (*.csv). Tyto datové formáty jsou použity z důvodu nezávislosti na použité platformě či GIS softwaru použitém pro přípravu dat. Oproti zápisu CSV používanému v českých podmínkách (oddělovač buněk středník, desetinný oddělovač čárka) musí být použito formátu běžného v anglicky mluvících zemích (oddělovač buněk čárka, desetinný oddělovač tečka). Stejně tak všechny hodnoty ve vstupních rastrových vrstvách musí být zadávány ve formátu s desetinnou tečkou. Opomenutí těchto pravidel má za následek nepoužitelnost daného souboru v prostředí EROSION-3D.

Vstupní vrstvy DMT, půdních vlastností (ať již v plně či semi-distribuované formě) i průběh srážky jsou v prostředí EROSION-3D načítány v příslušných dialogových oknech a následně z nich program automatizovaně odvodí datové vrstvy, které jsou dále použity při samotném spuštění simulace. Uživatel je okamžitě informován o úspěšnosti načtení a vzájemné kompatibilitě datových vrstev a spuštění simulace je možné, pouze pokud jsou poskytnuté vstupní vrstvy v pořádku.

5.3.1 Výškopisná data

Limitujícím faktorem pro podrobnost rozlišení je výkon použitého počítače a dostupný zdroj výškových údajů. Autoři programu nicméně doporučují používat rozlišení v rozmezí 1–20 m.

Jako zdroj výškových dat lze použít vlastní zaměření nebo kterákoliv z celoplošně dostupných dat pro Českou republiku. Každý z dostupných zdrojů má své výhody i nedostatky a není možné jednoznačně určit nejlepší z nich. Každý z uvedených zdrojů má své využití pro některé účely a měřítko.

Vlastní zaměření pomocí dGPS nebo geodetických metod představuje optimální zdroj dat z pohledu přesnosti, volby potřebné míry detailu i zahrnutí/vynechání některých

terénních prvků (např. propustky). Pro území větší než několik půdních bloků je však již časová a finanční náročnost příliš vysoká a je nutné použít některý z celorepublikově dostupných zdrojů výškových údajů. Odvození rastrové vrstvy DMT ze zaměřených bodů je navíc velmi citlivé na použitý interpolační algoritmus, systematické chyby při sběru dat i zkušenost zpracovatele.

Výškopisná část mapového díla ZABAGED představuje dostupný zdroj výškových dat ve formě vrstevnic s výškovým intervalem 2 m, lomových a břehových hran. V místech s mírným sklonem jsou pak přítomny doplňkové vrstevnice s výškovým intervalem 1 m. Všechny prvky jsou reprezentovány 2D liniovými prvky s výškovým atributem. Tento fakt neumožňuje použít lomové hrany pro doplnění informací o průběhu terénu, neboť mají vždy konstantní výšku, i pokud kříží několik vrstevnic. Dalším nedostatkem je přerušení vrstevnic v okolí liniové infrastruktury, v místech s vyšším sklonem terénu a v zastavěných územích.

Pro použití v modelu EROSION-3D je potřeba interpolovat z vrstevnic rastrový digitální model terénu. I když je k dispozici mnoho algoritmů pro interpolaci, výsledný DMT vždy obsahuje artefakty interpolace, které mají většinou podobu „vlnek“ kopírujících směr vrstevnic, kde se směrem po spádnici střídají plochy s větším a menším sklonem Vliv na výslednou plošnou distribuci i celkovou (průměrnou, maximální, minimální) intenzitu eroze/depozice není zanedbatelný a je závislý na celkové sklonitosti terénu. Ve svažitějších polohách dochází k nadhodnocení simulované eroze, v polohách s mírnějším sklonem pak dochází k podhodnocení intenzity eroze, případně nadhodnocení depozice (Dostál a kol., 2011).

DTM GEODIS je komerčně dostupný rastrový model terénu v prostorovém rozlišení 10 m odvozený z fotogrammetrických měření. Tento DMT je po konverzi do ASCII formátu možné přímo použít jako vstupní vrstvu pro EROSION-3D a odpadají tím rizika spojená s interpolací. I tak lze ale na tomto DMT najít pozůstatky preprocessingu na straně poskytovatele. Vyskytují se opět „vlnky“ rovnoběžné s vrstevnicemi, i když v menší míře než při uživatelské interpolaci z vrstevnic ZABAGED. Dále se vyskytují artefakty způsobené odvozením rastrové verze DMT z TIN (triangulated irregular network), které se projevují jako navazující plochy s konstantním sklonem. Na přechodu jednotlivých ploch tak dochází k náhlé změně sklonitosti s odpovídajícími důsledky při simulaci eroze ve fyzikálně založeném modelu.

Nejnovějším zdrojem výškových dat, který je v současné době zatím dostupný pouze pro část území ČR, je Digitální model reliéfu České republiky (DMR), produkt ČÚZK, dostupných ve dvou verzích označovaných jako DMR 4. generace (DMR 4G) a DMR 5. generace (DMR 5G). Oba produkty DMR vznikají laserovým skenováním a následným odfiltrováním vegetace a budov. Verze 4G představuje pravidelnou mřížku bodů s rozestupy 5 m nesoucích výškový atribut. Verze 5G je tvořena nepravidelným mrakem bodů s výškovou hodnotou. Hustota bodů se liší v závislosti na morfologii terénu (vyšší v členitějších polohách), ale vykazuje proměnnou hustotu i

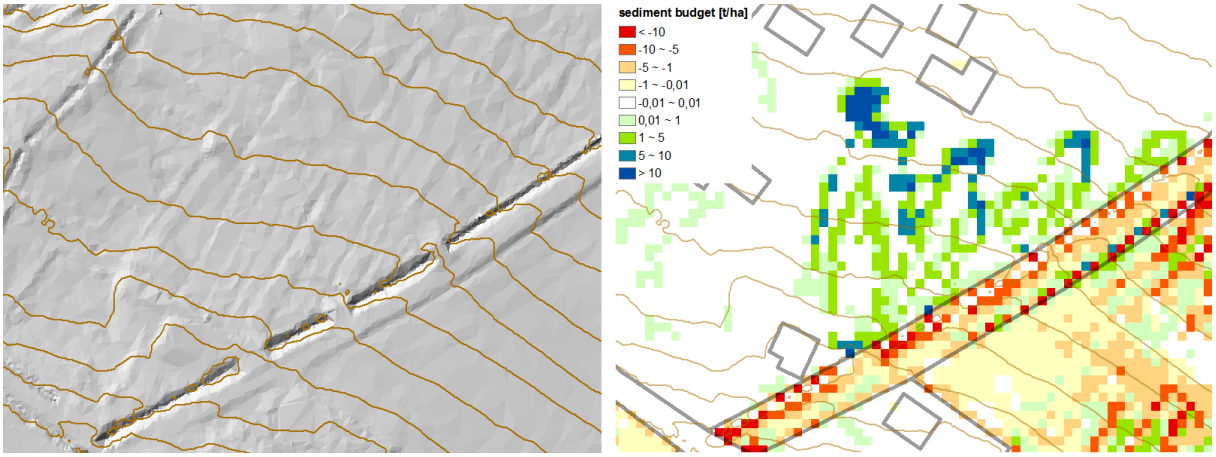
nezávisle na složitosti nebo sklonitosti povrchu. Zvýšená hustota bodů při zachování výškové chyby vede ke zvýšené drsnosti povrchu, což se projevuje i na výsledcích erozního modelování.

DMR 4G vykazuje hladší průběh ve velkých plochách (i sklonitých) s malou členitostí než 5G, tedy hlavně na orné půdě a plochách travních porostů. 5G oproti tomu výrazně lépe reprezentuje morfologii v členitých a sklonitých plochách tedy v okolí toků. Obě verze jsou zatíženy chybou zpracování při filtraci vegetačního krytu, která má podobu vysoké drsnosti povrchu v plochách s odfiltrovanou vegetací. Tato drsnost se částečně ztratí při konverzi do rastrového formátu (v závislosti na výsledném rozlišení). Nicméně i tak lze na plochách orné půdy pozorovat anizotropní drsnost terénu, která souhlasí se směrem obdělávání a která se zřetelně projeví i na výsledcích erozního modelování.

Díky vysoké přesnosti jsou v DMR 5G zachyceny i samotné prvky hospodaření s vodou a protierozní ochrany, pokud jsou v území přítomny. Vzhledem ke způsobu snímání a záznamu dat nemohou být tyto prvky zachyceny tak, jak to odpovídá pohybu vody, ale je zaznamenán povrch terénu. V místě mostků a propustků tak na příkopech vzniká neprůtočná hrázka, která nutně způsobuje vytékání vody na okolní terén, viz Obr. 10. Tento fakt může silně ovlivnit výslednou distribuci eroze, protože se povrchový odtok koncentrovaný ve svodném prvku „vylévá“ na okolní plochy. Pokud je cílem simulace zaznamenání průtoku v těchto prvcích, je výsledná hodnota zmenšena o množství odtoku, které nedoteče až do měřeného profilu.

Při použití výškových dat DMR 5G ve výsledném rozlišení rastru 5 m a méně je nutná podrobná příprava DMT, kdy je manuálně zajištěna průtočnost všech možných překážek v korytech příkopů a drobných vodních toků. Při úpravách DMT je nutné odpovídajícím způsobem pozměnit i půdní vlastnosti, aby na plochách s pozměněným sklonem nedocházelo ke zvýšené erozi (Dostál a kol., 2012).

Celkově lze pozorovat trend rostoucí průměrné ztráty půdy s rostoucím rozlišením použitého DMT, nicméně je to způsobeno také způsobem měření a přípravy dat. Při menším rozlišení jsou vyhlazeny nerovnosti a povrch terénu je hladší, což se projeví i ve směrování odtoku a jeho koncentraci. Volba výškových vstupních dat je kompromisem mezi požadovanou přesností a drsností povrchu vyvolanou šumem v datech nebo nedokonalou přípravou.



Obr. 10: Porovnání neupraveného DMR 5G a výsledku simulace v EROSION-3D v rozlišení 3 x 3 m na kterém je patrné „přetékání“ příkopu způsobené zaplněním bezodtokých míst na návodní straně propustků

5.3.2 Půdní vlastnosti

Skupina vstupních dat označovaná jako půdní vlastnosti v sobě zahrnuje vlastnosti samotné půdy, vlastnosti a stav půdního povrchu a vlastnosti půdního pokryvu. Půdní parametry mohou být zadávány v plně nebo semi-distribuované podobě. Pro plně distribuovanou formu jsou všechny půdní parametry zadávány jako rastrové vrstvy (se shodnou geometrickou definicí jako vstupní výškový rastr) obsahující v každé buňce rastru hodnotu daného vstupního parametru. (Michael a kol., 1996).

Pro semi-distribuovanou formu je vytvořen rastr (opět se shodnou geometrickou definicí jako použitý terénní model), který pomocí unikátního číselného identifikátoru určuje jednotlivé oblasti, v rámci nichž jsou hodnoty konstantní. Pro každou z oblastí jsou pak hodnoty vstupních parametrů uvedeny v tabulce a jsou přiřazeny na základě vytvořeného identifikátoru.

Pro každý element výpočetní oblasti je potřeba definovat následující hodnoty:

- zrnitostní složení (hm. % pro devět zrnitostních frakcí),
- objemová hmotnost půdy (kg m^{-3}),
- obsah organického uhlíku (hm. %),
- počáteční vlhkost (obj. %),
- erozní odolnost (N m^{-2}),
- Manningova hydraulická drsnost povrchu (s $m^{-1/3}$),
- pokrytí povrchu rostlinami a rostlinnými zbytky (%),
- opravný faktor závislý na stavu povrchu (–).

Zrnitost je zadávána hmotnostním procentuálním zastoupením devíti zrnitostních tříd. Základní přednastavené hodnoty velikosti zrn jednotlivých frakcí, tak jak odpovídají německému zatřídění KA4, uvádí Tab. 3. Hranice zrnitostních tříd pro zadávání vstupních parametrů je možné přímo v programu změnit. Nicméně pro odvozování dalších vstupních parametrů z katalogu půdních dat je potřeba provést zatřídění dle

KA4, které se provádí na základě obsahu souhrnných tříd jíl-prach-písek s hranicemi uvedenými v Tab. 3.

Půdní vlastnosti se nejlépe zjišťují analýzou půdních vzorků odebraných v modelovaném území, případně je možné data odvodit z katalogu vstupních parametrů, který je distribuován s modelem. Katalogové parametry je třeba využívat s rozvahou, neboť jsou odvozeny a kalibrovány na území německého Saska a mohou se v místních podmínkách lišit. Katalog půdních parametrů vychází ze standardu KA4 (AG Boden, 1994), který klasifikuje půdy podle jiného klíče než tuzemský standard Komplexního průzkumu půd (KPP) nebo bonitovaných půdně ekologických jednotek (BPEJ) a tyto zdroje jsou proto bez vlastního terénního průzkumu a analýzy odebraných vzorků jen velmi obtížně využitelné.

Tab. 3: Hranice zrnitostních tříd používaných v metodice KA4 (AG Boden, 1994)

Název frakce		**velikost od**		**do [mm]**
JÍL	jemný jíl		<	0,0002
	střední jíl	0,0002	–	0,00063
	hrubý jíl	0,00063	–	0,002
PRACH	jemný prach	0,002	–	0,0063
	střední prach	0,0063	–	0,02
	hrubý prach	0,02	–	0,063
PÍSEK	jemný písek	0,063	–	0,2
	střední písek	0,2	–	0,63
	hrubý písek	0,63	–	2,0

Zrnitostní rozbor je rutinní analýzou prováděnou kombinací prosívací a hustoměrné metody případně nějakou alternativní metodou. Česká standardizovaná sada sít pro zrnitostní rozbor je složena z odlišné rozměrové řady, ale hodnoty pro uvedené hranice tříd je možné odvodit interpolací z vynesené čáry zrnitosti. Pokud jsou půdní vlastnosti zadávány v plně distribuované podobě, je pro každou zrnitostní třídu vytvořena samostatná vrstva obsahující její procentuální zastoupení. Hodnoty musí být celočíselné a součet hodnot ze všech tříd musí být v každém pixelu roven stu.

Objemovou hmotnost půdy je možno zjistit analýzou neporušených půdních vzorků, nicméně takto zjištěná hodnota je reprezentativní pouze pro konkrétní místo (může se lišit v rámci svahu) a čas odběru (mění se v průběhu roku v závislosti na prováděných zemědělských operacích). Zjištění hodnoty objemové hmotnosti pro danou strukturní třídu, různé plodiny, různé způsoby obdělávání a stav půdy lze zjistit z katalogu vstupních parametrů (Michael a kol., 1996).

Celkový obsah organického uhlíku je možné zjistit laboratorními metodami, případně dohledat pro danou půdu a zvolené podmínky v katalogu vstupních parametrů (Michael a kol., 1996). Hodnota je zadávána v hmotnostních procentech.

Počáteční vlhkost půdy je zadávána v objemových procentech a reprezentuje obsah vody v půdě ve hloubce mezi 20 a 25 cm. I když je možné poměrně snadno hodnoty vlhkosti měřit in situ i v laboratoři, je použitelnost naměřených hodnot omezená. Hodnoty vlhkosti jsou silně variabilní jak časově v průběhu dne, tak prostorově v rámci polohy na svahu, podle stavu vegetace a dalších vlivů. Velmi malé změny počáteční vlhkosti mohou mít zásadní dopad na hodnoty výstupní. Při změně počáteční vlhkosti z 30 na 40 % může průměrná ztráta půdy na pozemcích orné půdy být až 500krát větší. Modelování s cílem použít výsledky modelu jako návrhové parametry prvků technické protierozní ochrany tak vyžaduje zásadní rozvahu týkající se vlhkostí půdy v celé modelované ploše před návrhovou srážkou, protože se jedná o zásadní součást návrhového scénáře.

Pro získání hodnot vlhkosti půdy na základě předchozích srážek je možné využít modulu dlouhodobé simulace a odvozovat návrhové parametry z poslední srážky v sekvenci nebo z posledního opakování jedné srážky. V tomto případě ale opět narážíme na neexistenci metodiky pro odvození návrhové srážky nebo návrhové srážkové řady pro české podmínky. Možné je také simulovat hypotetickou nejhorší variantu pro zcela nasycené povodí a zadat všem povrchům počáteční vlhkost 100 %.

Pokud je hodnota počáteční vlhkosti nulová, dochází na takovém povrchu k absolutní časově neomezené infiltraci. Toho je možné využít pro definice ploch, na kterých má být odtok „ukončen“, tedy přechod do ploch mimo zájmovou oblast bez nutnosti ostrého ukončení digitálního modelu terénu bez rizika vzniku okrajových efektů. Dalším využitím může být simulace prvků TPEO, u kterých je předpokládána dostatečná kapacita. Tento přístup samozřejmě nelze použít, pokud je cílem modelování měření průtoků v korytech nebo odtoků z ploch.

Erozní odolnost vyjadřuje smykové napětí, při kterém dojde k uvolnění půdních částic z povrchu. Hodnotu je možno zjistit laboratorně, ale postup je poměrně časově náročný. Hodnotu erozní odolnosti podle zvolených podmínek a pro danu půdu je možné dohledat v katalogu vstupních parametrů.

Manningova hydraulická drsnost povrchu je známým hydraulickým parametrem a její hodnoty jsou pro zvolenou půdu a podmínky uvedeny v katalogu půdních parametrů. Hodnotu je případně možné vypočítat dle Garbrechta z náhradního průměru zrna D_{90} (Garbrecht, 1961 in Michael a kol., 1996).

Pokrytí povrchu rostlinami a rostlinnými zbytky snižuje plochu půdního povrchu přímo vystavenou dopadu dešťových kapek. Hodnotu je možno zjistit měřením in situ pro konkrétní modelovanou situaci, ale kvalitní vyhodnocení půdního pokryvu je poměrně náročné. Opět je tedy možné využít katalogu vstupních parametrů, který udává

hodnoty půdního pokryvu po měsících pro různé plodiny a způsoby hospodaření. Existuje zde i přímá návaznost na požadavky systému GAEC.

Opravný faktor „skinfactor“ reprezentuje stav půdy vzhledem k infiltraci a slouží pro zohlednění vlivů, které nejsou zahrnuty v žádném z ostatních parametrů. Opravný faktor nabývá hodnot od 0 do 100, hodnota 1 značí nulový vliv na intenzitu infiltrace. Hodnoty větší než jedna zlepšují infiltrační schopnost a použijí se, pokud je infiltrace usnadněna například přítomností makropórů, dobrým strukturním stavem nebo dlouhodobým půdoochranným obděláváním. Hodnoty menší než 1 se použijí pro povrch se sníženou schopností infiltrace např. zakolmatování povrchu jemným sedimentem z předchozí srážky nebo utužené podbrázdí. Konkrétní doporučené hodnoty opravného faktoru pro různé plodiny, způsoby obdělávání a stav půdy lze dohledat v katalogu vstupních parametrů.

Z uvedeného přehledu vstupních dat je patrné, že neobsahují žádnou zvláštní možnost pro definici antropogenních povrchů. Zpevněné povrchy je tedy nutné simulovat změnami v uvedených parametrech. Kromě zvýšení objemové hmotnosti, zvýšení hodnoty erozní odolnosti a zadání stoprocentního pokryvu povrchu je možné upravit i zrnitostní složení směrem k vyššímu obsahu hrubších částic. Rychlejší nástup povrchového odtoku je simulován zvýšenou hodnotou počáteční vlhkosti zpevněných ploch, případně snížením hodnoty opravného faktoru.

5.3.3 Srážka

Vstupní srážka je zadána průběhem intenzity v konstantním časovém kroku s minimální délkou 1 minuta. Srážka je zadána ve formě tabulky zahrnující časový údaj a odpovídající intenzitu v mm min^{-1}. Pokud je používán modul pro výpočet povrchového odtoku, lze nastavit výpočetní krok nezávisle na časovém kroku zátěžové srážky a sledovat tak vývoj generování povrchového odtoku ve větší časové podrobnosti.

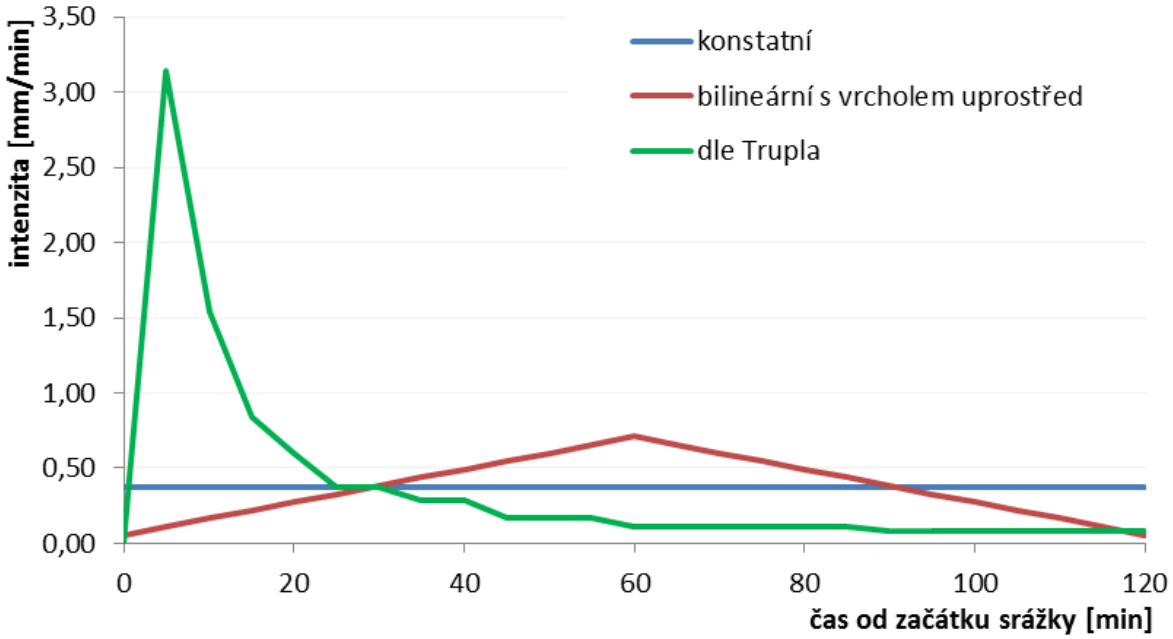
Nehomogenitu rozdělení srážky na modelovaném území lze zahrnout tak, že je zadáno více vstupních srážkových řad s unikátním celočíselným identifikátorem a je vytvořena rastrová vrstva, která nabývá hodnoty identifikátoru časové řady, která má být pro daný výpočetní element použita.

Časový průběh srážky je zásadní pro výsledný průběh povrchového odtoku a transportu splavenin. Celková intenzita eroze se může řádově lišit v závislosti na maximální intenzitě i době výskytu maximální intenzity v průběhu srážky pro srážky se stejným úhrnem a dobou trvání (tedy se stejnou průměrnou intenzitou).

Pro odvození úhrnu zátěžové srážky je možno v našich podmínkách využít například redukce 24hodinových srážkových úhrnů s dobou opakování 2, 10, 20, 50, 100 let. (Šamaj a kol., 1983), které jsou k dispozici pro meteorologické stanice na území ČR. Denní úhrn je redukován na požadovanou délku trvání srážky dle Hrádka a Kováře (1994), případně s využitím nástroje DES_RAIN (Vaššová, Kovář, 2011). Technická

protierozní opatření slouží zejména pro ochranu před následky krátkodobých přívalových srážek, a proto je běžně používána 120minutová srážka, nicméně v odůvodněných případech je možné využít i srážkou s jinou dobou trvání, například dle doby koncentrace ke zvolenému profilu toku nebo svodného prvku TPEO.

Časový průběh srážky je odvozován z jejího úhrnu a je aproximován libovolnou funkcí, která má v délce trvání srážky integrál rovný požadovanému úhrnu. Nejjednoduššími funkcemi pro odvození časového průběhu intenzit jsou konstanta (tzv. „obdélníková srážka“), bilineární (tzv. trojúhelníková srážka“) s vrcholem uprostřed či v době 1/3 trvání srážky. Dále je možno uvažovat přívalovou srážku s časovým průběhem odvozeným z maximálních intenzit přívalových dešťů stanovených J. Truplem (1958). Srážky mají jednotný tvar s proměnným časovým průběhem – dobou trvání 120 minut a maximální intenzitou v páté minutě.



Obr. 11: Ukázka časového průběhu srážky dobou opakování 10 let a s dobou trvání 120 minut

Příklad uvádí Obr. 11, který dokládá výrazný rozdíl v maximální intenzitě srážky při využití různých způsobů odvození jejího časového průběhu při shodném celkovém úhrnu a době trvání. Pro epizodní modelování je v našich podmínkách běžně doporučováno využít „trojúhelníkový“ časový průběh srážek s maximem uprostřed doby trvání.

5.4 Výhody a nevýhody

Výsledky modelu EROSION-3D poskytují velmi věrný náhled do prostorového rozložení erozních a depozičních ploch. Směrování odtoku vychází z použitého digitálního modelu terénu, a tak je třeba rozlišovat projevy nedostatků DMT od projevů morfologie terénu. Plně distribuované zadávání vstupních parametrů umožňuje velmi věrně simulovat stav modelovaného území, ale většinu potřebných údajů nelze zjistit

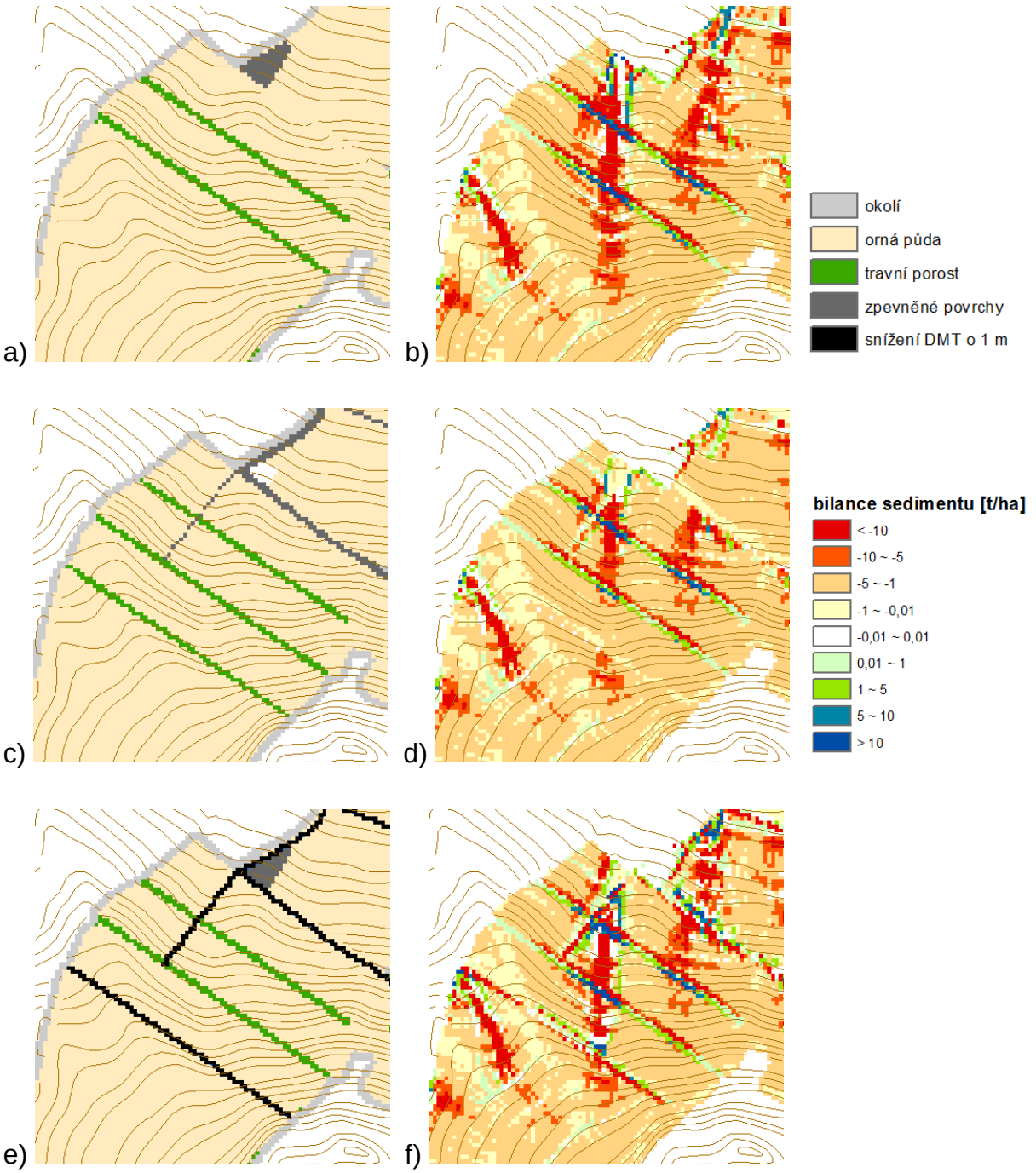
snadno, nebo je jejich platnost časově a prostorově omezená. Mnoho vstupních parametrů lze odvodit z dostupného katalogu, který ale není odvozen a verifikován pro české podmínky. Na druhou stranu lze těžit z toho, že přírodní podmínky jsou v Sasku velmi podobné podmínkám v ČR.

Úpravou vstupních parametrů půdy, digitálního modelu terénu a jejich kombinací lze poměrně věrně simulovat vliv prvků TPEO na povrchový odtok. Použití výsledků modelu pro navrhování kapacity prvků je limitováno omezenou možností věrně zachytit stav modelovaného území v konkrétním okamžiku, a tedy nutností velmi pečlivě definovat návrhový stav. Dalším problémem je pak obtížná dostupnost některých vstupních datových vrstev (srážky, sekvence srážek) a absence limitů přípustného odnosu půdy pro epizodní modelování.

Výsledky modelu EROSION-3D jsou silně ovlivněny nedostatky ve vstupních datech, které často nemohou být předem správně odhadnuty a posouzeny. Typickým příkladem může být například extrémní vliv počáteční vlhkosti půdy na ztrátu půdy, zmiňovaný v kapitole 5.3.2. Proto, pokud mají být pro návrh prvků TPEO využívány absolutní hodnoty výstupů modelu, je třeba být při jejich posuzování velmi obezřetný a vzít v úvahu všechna možná negativa a nejistoty. Posouzení návrhů systému TPEO pomocí simulace v EROSION-3D však poskytuje velmi užitečný vhled do chování povodí jako celku a umožňuje identifikovat potenciál a rizika spojená s realizací konkrétních návrhů.

5.5 Příklad použití

Následující příklad ilustruje dvě možnosti simulace záchytných a svodných prvků TPEO. Model byl sestaven na DTM GEODIS v rozlišení 10 m a ukazuje situaci, kdy je dvojice travních pásů na pozemku orné půdy doplněna záchytnými a svodným příkopem. Horní dvojice obrázků na Obr. 12 (a, b) ukazuje referenční stav bez realizace dodatečných prvků TPEO. Prostřední dvojice (c, d) zobrazuje efekt simulace příkopů pomocí změny parametrů ploch. Povrchový odtok je zpomalen a redukován v závislosti na drsnosti a infiltračních vlastnostech ploch. Spodní dvojice obrázků (e, f) ukazuje modelování pomocí snížení DMT v trase koryt příkopů. Povrchový odtok je odkloněn a lze pozorovat zvýšenou intenzitu eroze v simulovaných příkopech vlivem zvýšeného sklonu břehů a koncentrace odtoku. Zároveň je patrné „přetečení“ příkopu v místě křížení s údolnicí vlivem nedostatečného ošetření výškového průběhu nivelety dna příkopu.



Obr. 12: Porovnání různých způsobů simulace záchytných a svodných prvků TPEO. Vlevo je vždy uvedena mapa definice ploch, vpravo pak výsledek simulace pomocí EROSION-3D. Legenda je společná pro všechny ukázky

Následující příklad ukazuje výsledky simulace na DMT odvozeném z DMR 5G. Obr. 13 ukazuje výsledek simulace na DMT bez úprav, v plochách orné půdy je patrné „vytékání“ z příkopů v místech křížení s údolnicemi. V horní části je vidět nesprávná funkce příkopu způsobená přítomností propustků (detail viz Obr. 10). Obr. 14 ukazuje situaci po úpravě DMT dostatečným zahloubením příkopů. Plošný i soustředěný povrchový odtok je přerušen a neškodně odveden mimo dotčené pozemky orné půdy.

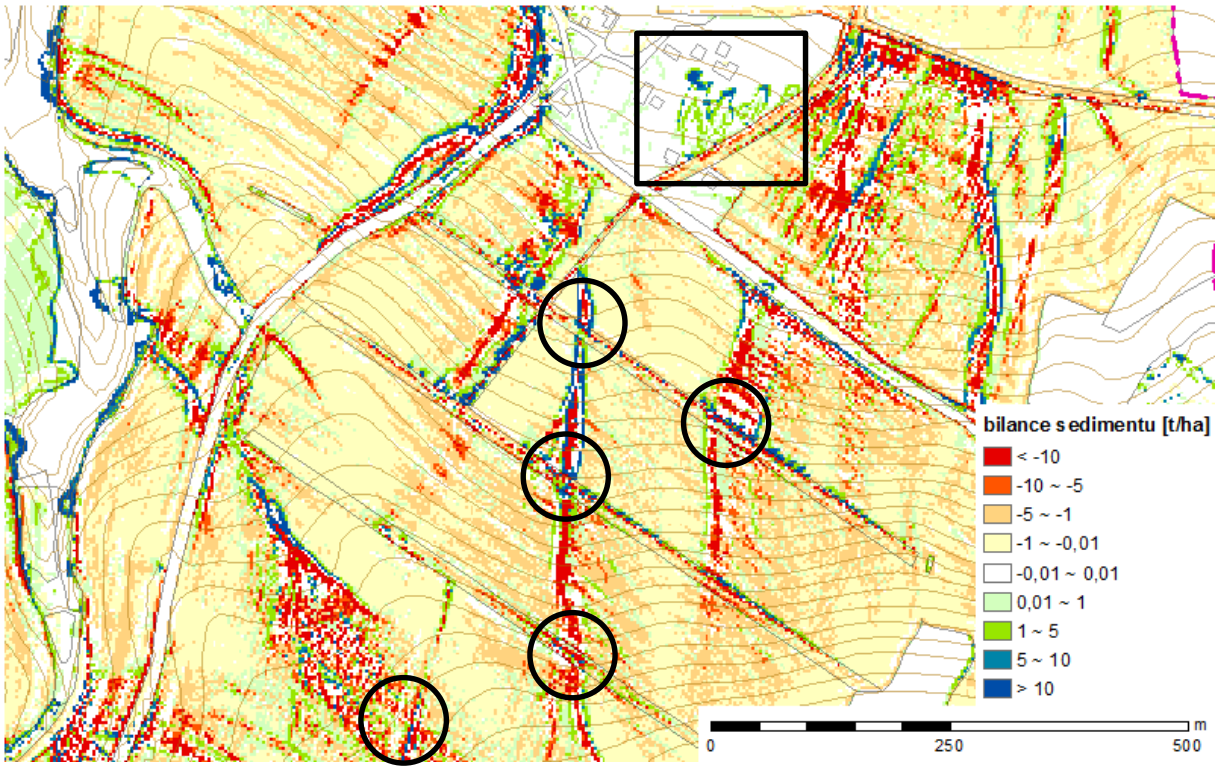
Pokud jsou prvky TPEO i koryta toků správně reprezentovány v DMT, lze v zájmových profilech generovat záznam průtoků použitelný pro dimenzování těchto prvků. Profily pro záznam průtoku jsou zadány jako rastrová vrstva s hodnotou buněk rovnou identifikátorům profilů (ve zbytku plochy „NoData“). Tyto buňky musí být umístěny do trasy soustředěného odtoku odpovídající směrování odtoku na DMT. Tuto vrstvu je možné získat z datových vrstev, které vygeneruje EROSION-3D při tvorbě datasetu reliéfu. Umístění dráhy soustředěného odtoku nemusí odpovídat definici vodních toků dle dostupných geodatabází, viz Obr. 15.

Po provedení výpočtu se mezi výslednými vrstvami uloží CSV soubor obsahující kumulované časové řady objemu vody a sedimentu proteklého definovanými profily (Tab. 4).

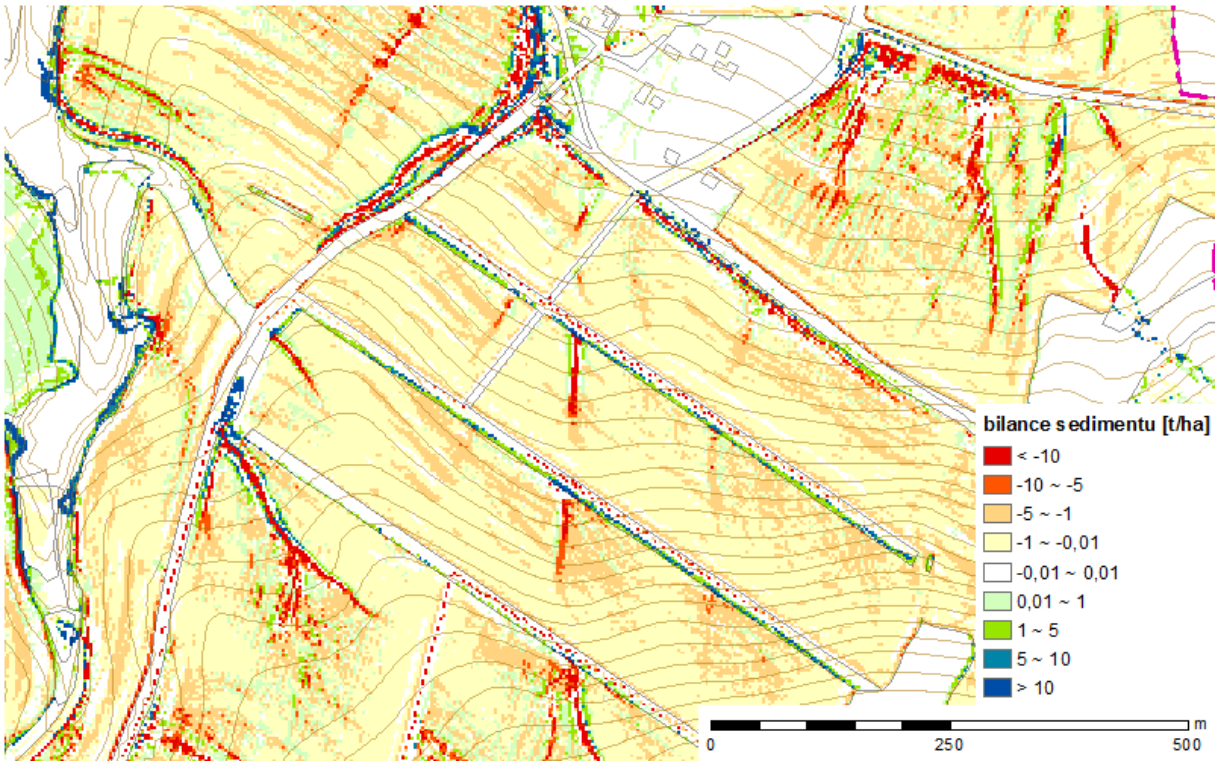
Tab. 4: Ukázka záznamu časového průběhu průtoku v měrném profilu

Date	Time	ID	Row	Col	Sedbudget	Runoff	Sedvol	Sedconc	Clay	Silt	Totero	Totdep	Netero	ChRunoff	ChSedvol	ChNetEro	ChClay	ChSilt
1.6.2011	14:00:00	2	56	762	0	0,09813	0	0	100	0	0	0	0	1892,149	93849,352	0,697	30642,561	47770,641
1.6.2011	14:05:00	2	56	762	0	0,134972	0	0	97	3	0	0	0	2252,952	95217,977	0,707	31103,227	48475,918
1.6.2011	14:10:00	2	56	762	0	0,156307	0	0	94	6	0	0	0	2460,248	95794,859	0,711	31296,705	48770,703
1.6.2011	14:15:00	2	56	762	0	0,172473	0	0	93	6	0	0	0	2616,911	96150,938	0,714	31414,197	48950,766
1.6.2011	14:20:00	2	56	762	0	0,182362	0	0	94	6	0	0	0	2712,059	96267,836	0,715	31450,092	49005,891
1.6.2011	14:25:00	2	56	762	0	0,192251	0	0	93	6	0	0	0	2807,362	96387,945	0,716	31487,096	49062,461
1.6.2011	14:30:00	2	56	762	0	0,200295	0	0	93	6	0	0	0	2884,7	96457,406	0,716	31507,32	49093,703

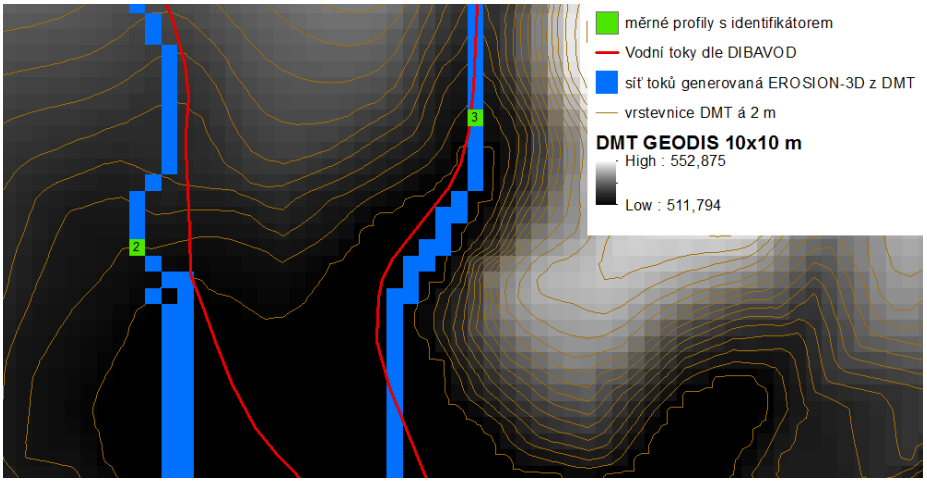
Pro získání průtoku (viz Tab. 5) je nejdříve nutné dopočíst z kumulovaných hodnot (sloupec „ChRunoff“) hodnoty pro jednotlivé časové kroky („Odtok [m3/m]“). Všechny hodnoty jsou vztaženy na metr šířky toku elementem a délku časového kroku srážky, pro získání průtokové řady je tedy dále potřeba vynásobit rozlišením použitého rastrového terénního modelu (v tomto případě 3 m) a vydělit délkou časového kroku (v tomto případě 300 s).



Obr. 13: Výsledek simulace na povrchu bez úprav DMT – voda vytéká z příkopů v místech křížení s údolnicemi.



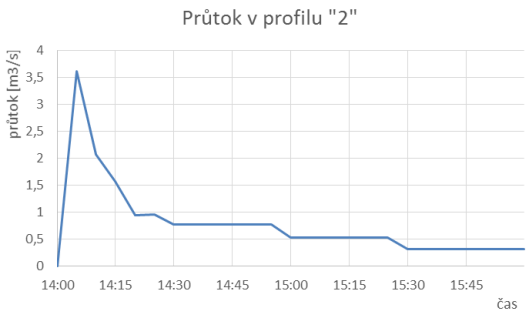
Obr. 14: Výsledek simulace po úpravě DMT – příkopy byly pro výpočet uměle zahloubeny a voda neškodně odtéká do uzávěrového profilu



Obr. 15: Umístění měrných profilů do drah soustředěného odtoku odvozených z DMT

Tab. 5: Ukázka zpracovaných hodnot do časového průběhu průtoku v řešeném profilu

Date	Time	ID	ChRunoff [m3/m]	Odtok [m3/m]	Průtok [m3/s]
1.6.2011	14:00:00	2	1892,1	0	0
1.6.2011	14:05:00	2	2253,0	360,8	3,6
1.6.2011	14:10:00	2	2460,2	207,3	2,1
1.6.2011	14:15:00	2	2616,9	156,7	1,6
1.6.2011	14:20:00	2	2712,1	95,1	1,0
1.6.2011	14:25:00	2	2807,4	95,3	1,0
1.6.2011	14:30:00	2	2884,7	77,3	0,8
1.6.2011	14:35:00	2	2962,1	77,4	0,8
1.6.2011	14:40:00	2	3039,6	77,5	0,8
1.6.2011	14:45:00	2	3117,2	77,6	0,8
1.6.2011	14:50:00	2	3194,8	77,6	0,8
1.6.2011	14:55:00	1	3272,4	77,7	0,8



Stejným postupem je možné dopočítat i průtok sedimentu a jeho jednotlivých frakcí.

6 SMODERP

6.1 Popis modelu

Fyzikálně odvozený model SMODERP je určen pro výpočet erozní ohroženosti a pro výpočet charakteristik povrchového odtoku na jednotlivých zemědělských pozemcích nebo na malých povodích. Jeho využití pro určování erozní ohroženosti a pro navrhování TPEO je doporučeno například v *DOS T 3.17 – Protierozní ochrana,* v *ČSN 75 4500 − Protierozní ochrana zemědělské půdy*, nebo v metodice *Ochrana zemědělské půdy před erozí* (Janeček a kol., 2012).

První měření vedoucí ke stanovení odtokových parametrů na sklopném hydraulickém žlabu provedl kolektiv katedry hydromeliorací Fakulty stavební ČVUT v Praze v roce 1984 (Holý, 1984). Při zvolených průtocích na různých sklonech a drsnosti povrchu byla měřena hloubka vody. Na základě těchto měření byl stanoven vztah pro výpočet průtoku na základě výšky hladiny. První verze modelu byla vyvinuta na ČVUT v roce 1989 (Holý a kol., 1989). Byla napsána v programovacím jazyku FORTRAN. Zahrnovala v sobě procesy ovlivňující povrchový odtok a erozi. Submodel pro výpočet přípustné délky byl od submodelu pro výpočet odtokových charakteristik zcela oddělen

a jednalo se spíše o dva nezávislé moduly. Časový krok modelu byl zvolen v délce 0,2 minuty.

V roce 1996 vznikla v programovacím jazyce Pascal verze s označením IV. I/11 – 96. V ní se podařilo odstranit několik základních nedostatků z předchozí verze, např. již bylo možné zpětně editovat dříve zadané pozemky. Také bylo možné ukládat a tisknout získané výpočty. Úpravy se však týkaly jen prostředí a vedly k usnadnění práce uživatele. Při této aktualizaci nedošlo k žádné úpravě vnitřních vztahů. V letech 1999 až 2009 vznikaly další modifikace modelu SMODERP v jazyce Visual Basic pro operační systémy Win95 až XP. Všechny tyto úpravy vedly ke zjednodušení a zrychlení práce. Postupně vzniklo celkem šest verzí modelu, které se částečně lišily vzhledem a dostupností obou submodelů. Úpravy se týkaly především uživatelského rozhraní, výpočtové části se změny týkaly jen minimálně. Poslední verze tohoto modelu zachovávající shodný koncept s označením 5.01 je volně ke stažení na stránce www.storm.fsv.cvut.cz/smoderp.

Od roku 2006 byla vytvářena nová verze modelu SMODERP, která zahrnuje nové poznatky. Tato verze modelu SMODERP s označením 10.01 byla naprogramována v programovacím jazyku *Visual FoxPro* a je rovněž ke stažení na stránce www.storm.fsv.cvut.cz/smoderp. Výstupy z modelu jsou soubory ve formátu *.xls. Zdrojový kód byl sestaven znovu a byly do něho implementovány nové poznatky s ohledem na kontinuitu a principy předchozí verze a na cílovou skupinu uživatelů. Vstupní parametry jsou shodné s předchozí verzí. Při odvozování a sestavování nového modelu bylo provedeno několik analýz (Kavka, 2011). Na jejich základě byly do nové verze zahrnuty následující změny:

- dočasné vypuštění výpočtu ztráty půdy,
- nově určené odtokové parametry pro jednotlivé kategorie půdních druhů podle Nováka (Němeček, 2001),
- možnost zadávat libovolně dlouhé, na vrstevnicích nezávislé části svahu,
- model pracuje v jednotlivých elementech, jejichž velikost je dána zvoleným charakterem řešeného profilu,
- určení přerušení svahu je řešeno v jednotlivých elementech.

Detailněji tyto změny popisuje ve své práci Kavka (2011). Tato verze programu je nadále laděna, aby byla pro uživatele přínosem. Obě verze programu (5.01 i 10.01) jsou včetně manuálů dostupné na stránkách http://storm.fsv.cvut.cz/smoderp/.

V současné době je na Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství ČVUT prototypově vyvíjena verze modelu pro povodí – SMODERP 2D, která bude uveřejněna na stránkách programu. Bude stát na stejných základech jako současná profilová verze programu, ale využití jejích výstupů umožní přesnější identifikaci erozně ohrožených míst a rozšíří možnosti navrhování protierozních opatření. Tato verze je sestavována v programovacím jazyce Python a využívá nástroje ArcGIS.

6.2 Vhodnost využití v rámci TPEO

Fyzikální model SMODERP byl a je primárně vyvíjen pro posuzování erozní ohroženosti a pro navrhování protierozních opatření v podmínkách České republiky. Vstupní parametry nutné pro výpočet pomocí modelu SMODERP jsou voleny s ohledem na jejich dostupnost. Snahou autorů je umožnit vlastníkům pozemků, projektantům, správním orgánům a dalším potenciálním zájemcům určit míru erozní ohroženosti a dimenzovat protierozní prvky. V případě technických protierozních opatření se jedná především o stanovení charakteristik povrchového odtoku (objem odtoku a maximální průtok). Při návrhu složitějších systémů záchytných odváděcích a svodných příkopů nebo průlehů a při posuzování nádrží (zejména suchých nádrží) je možno využít hydrogramů povrchového odtoku z jednotlivých pozemků. Kulminace v závěrovém profilu pak není stanovena z maximálních průtoků jednotlivých profilů, ale přesněji ze součtu hydrogramů.

6.3 Vstupní data

Vstupní data pro model byla volena s ohledem na jejich dostupnost v rámci České republiky. Je možné je rozdělit do následujících skupin:

- morfologie terénu,
- vlastnosti půdy,
- vegetace na konkrétních pozemcích,
- návrhové srážky.

6.3.1 Morfologie terénu

Model SMODERP je koncipován jako jednorozměrný model pro profilovou metodu. Jednotlivé řešené pozemky jsou nahrazeny charakteristickými profily, zvolenými na řešených půdních blocích nebo soustavách půdních bloků. Tyto profily mají být voleny tak, aby dostatečně reprezentovaly odtokové poměry v řešeném území. Neměly by tedy být vedeny v drahách soustředěného odtoku, neboť v nich dochází ke koncentraci odtoku, a proto takové profily nelze považovat jako průměrné pro řešený svah. Stejně tak by neměly být voleny profily na hřbetnicích, které jsou lokálními rozvodnicemi a také nereprezentují daný svah. Podle velikosti a konfigurace pozemku je třeba navrhnout na každém pozemku jeden či více charakteristických profilů.

Profily musí začínat na rozvodnici nebo v místě, kde dochází k přerušení povrchového odtoku (například navrženým technickým opatřením nebo stávající cestou atp.). Ukončeny musí být v místě, kde dochází k přerušení povrchového odtoku (silnice a cesty s funkčními odvodňovacími příkopy, vodoteče, intravilán, vodní plochy atp.). Model neřeší povrchový odtok, a tím ani erozní procesy, z lesních pozemků a intravilánu.

Záleží na uživateli, jakým způsobem a s jakou přesností získá návrhové profily. Konstrukce charakteristických profilů na pozemcích řešeného území je možná následujícím způsoby:

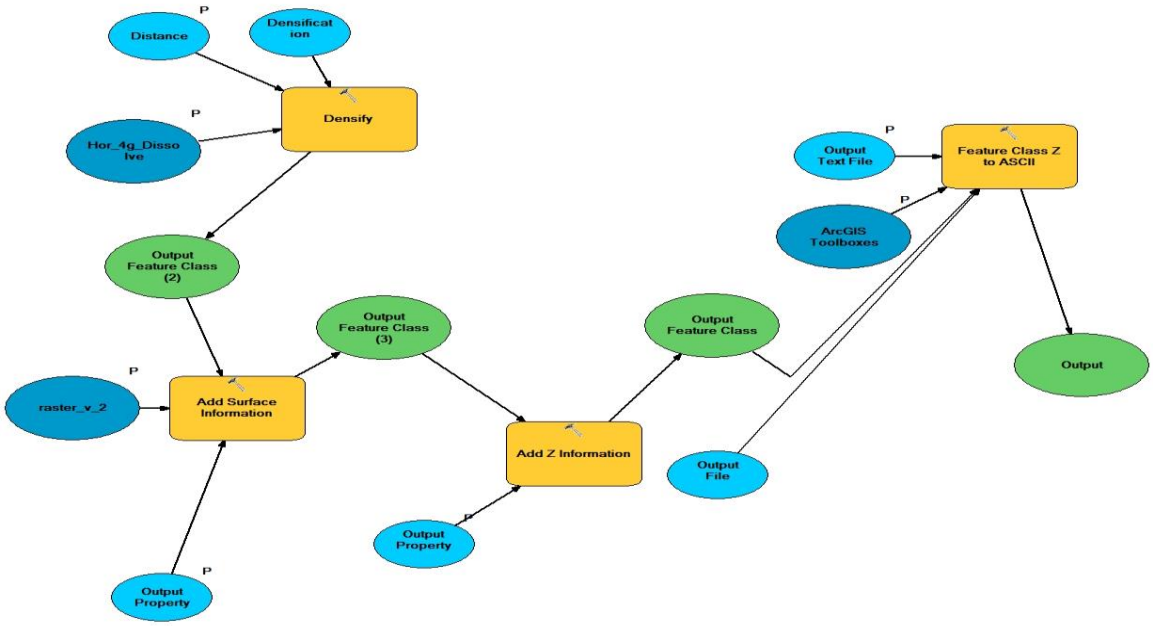
- manuálním odečtením vodorovných vzdáleností mezi vrstevnicemi v tištěných mapách ve zvolených trasách,
- odečtením vodorovných vzdáleností mezi vrstevnicemi na digitálních mapách (CAD/GIS software),
- automatickým generováním charakteristických dat s pomocí specializovaných GIS softwarů jako je například ArcGIS atp.

Zdroje dostupných výškopisných dat jsou stejné jako pro model EROSION-3D (viz kapitola 5.3.1). V případě profilového modelu SMODERP jak manuální, tak digitální odečítání profilů záleží na zkušenostech a znalostech uživatele modelu. V každém případě je účelné navržené trasy charakteristických profilů posoudit vizuálně v terénu. Znalost a zkušenost při návrhu odtokových drah určuje kvalitu tohoto základního důležitého vstupu.

Ručně jsou profily odečítány tak, že na mapě s vyznačenými vrstevnicemi jsou měřeny vodorovné vzdálenosti mezi jednotlivými vrstevnicemi po celé délce profilu. Při znalosti odlehlosti vrstevnic je pak možné vytvořit podélný řez charakteristickým profilem. Výhodou ručního získávání charakteristických profilů je jejich jednoduchost a přehlednost.

Odečítání vodorovných vzdáleností na digitálních mapách je pouze nahrazení výše popsaného postupu digitálním postupem. Vodorovné vzdálenosti mezi vrstevnicemi jsou odečítány nikoli ručně, ale nástroji příslušného software (Measure – ArcGIS, Dimenssion – ACAD atp.).

Jak v případě ručního, tak digitalizovaného odečítání vzdáleností mezi vrstevnicemi je jeho kvalita závislá na kvalitě mapového díla a také na zkušenosti uživatele s volbou charakteristických profilů. Získání odtokových drah pomocí GIS naopak vyžaduje uživatelskou znalost práce v určitém softwarovém prostředí a pořízení digitálních vstupů. Dále je uveden popis získání charakteristických profilů v prostředí ArcGIS pomocí nástroje Create Steepest Path (3D Analyst), který je součástí rozšiřujícího balíku 3D Analyst pro práci s prostorovými daty v ArcView. Tento nástroj pracuje s DMT a vytváří 3D Polylines, které sledují největší gradient po celou délku rastru, případně do bezodtokých míst. Lze také použít ruční vytvoření charakteristických řezů pomocí Interpolate Line, které nesledují přímo spádnici, ale uživatel je může vést zcela libovolně. Velkou výhodou 3D Polylines je možnost zobrazení podélného řezu a exportu například do aplikace Microsoft Excel nebo do textového souboru. Výsledné profily získané touto metodou je možné efektivně exportovat z prostředí ArcGIS do textového souboru a dále s nimi pracovat například v prostředí MS Excel. Při exportu je možno použít převedení grafické čáry na vrstvu Polyline (pomocí nástroje Convert Graphic To Features) a tu následně rovněž exportovat do textového souboru. Při exportu se jedná o automatizovaný postup skládající se z několika nástrojů (Densify, Add Surface Information, Add Z Information a Feature Class Z to ASCII) vytvořený v prostředí ArcINFO Model Builder. Schéma vytvořeného nástroje je patrné na Obr. 16.



Obr. 16: Schéma nástroje pro export charakteristických profilů v prostředí ModelBuilder (Esri – ArcGIS)

6.3.2 Půdní vlastnosti

Fyzikálních vlastností půdy patří k nejobtížněji stanovitelným vstupním podkladům do všech modelů. Lokální heterogenita půdy může způsobit značné rozdíly v chování půdy, a tím ovlivnit výsledky výpočtu. Půda svými vlastnostmi ovlivňuje povrchový odtok vlivem infiltrace a drsnosti. Při testování citlivosti modelu na kvalitu vstupů patří půdní vlastnosti vedle morfologie k nejcitlivějším vstupům. Model SMODERP pracuje s Philipovou rovnicí infiltrace. Jejími základními parametry jsou *nasycená hydraulická vodivost* ***K*** a *sorptivita* ***S***. Hodnotu *K* lze určit na základně polních zkoušek (např. dvouválcovou metodou). Sorptivita je těžko stanovitelnou veličinou, pro využití modelu k navrhování opatření jsou dostatečným podkladem průměrné hodnoty sorptivity při vlhkosti odpovídající polní vodní kapacitě. Ta byla pro potřeby programu stanovena jako doporučené hodnoty pro manuál modelu (Vrána a kol., 1996) pro jednotlivé půdní druhy v závislosti na snadněji určitelných parametrech (hydraulická vodivost a půdní druh). Příslušné hodnotě hydraulické vodivosti je v závislosti na půdním druhu přiřazena návrhová hodnota sorptivity při polní vodní kapacitě. V případě nepropustných půd, případně půd slévavých, je účelné provést výpočet pro $S = 0$, což znamená půdní profil plně nasycený vodou. Pomocí snižování hodnoty sorptivity *S* lze na pozemku simulovat vyšší počáteční nasycenost – tedy nepříznivé podmínky pro příchod erozní srážky, kdy tato přichází po předchozích srážkách a tedy do nasyceného půdního profilu.

Orientační průměrné hodnoty *K* (viz Tab. 6) pro jednotlivé půdní druhy uvádí Váška (2000).

Tab. 6: Orientační hodnoty hydraulické vodivosti – převzato z (Váška, 2000)

Klasifikace půd podle Nováka				
Obsah zrn I. kategorie [%]		Půdní druh	Hydrologická skupina	K [cm min^{-1}]
Od	Do			
0	10	Písčité	A	0,4965
10	20	Hlinitopísčité	A	0,2222
20	30	Písčitohlinité	B	0,0736
30	45	Hlinité	B	0,0208
45	60	Jílovitohlinité	C	0,0174
60	75	Jílovité	C	0,0042
75	100	Jíl	D	0,0003

Použití jakýchkoli manuálových hodnot je vhodné v případě, že nejsou k dispozici přesnější hodnoty půdních charakteristik (dostupné jsou například pouze půdní druhy), pochopitelně s vlivem na přesnost výsledků modelování. Pro správné použití modelu je nutné provést terénní měření a určit zrnitostní složení půdy a její hydraulickou vodivost. Množství odebraných vzorků je závislé na heterogenitě půd v řešené lokalitě. Při odběru vzorků se vždy jedná o bodovou informaci, u které se předpokládá její platnost v určitém okolí za podobných podmínek.

Mapové podklady pro určení půdního druhu

Jako doplněk pro terénní průzkum nebo pro návrh na úrovni studie je možné použít některou z půdních map dostupných v ČR. Základními zdroji o půdách v ČR jsou mapy BPEJ a KPP. Heterogenitu půd je možné odhadnout s využitím map BPEJ, tedy na základě půdních typů. Přímé určení půdních druhů je možné na základě map KPP. Dostupná je mapa KPP v měřítku 1 : 200 000. Postupně jsou aktualizovány půdní mapy v měřítku 1 : 50 000 a v měřítku 1 : 10 000. O dostupnosti mapových podkladů je možné se informovat přímo na VÚMOP, v. v. i., který je jejich tvůrcem a správcem.

6.3.3 Povrch a vegetace

Vegetační kryt pozemků významně ovlivňuje povrchový odtok a erozi. Vegetace přirozeně zvyšuje nakypření půdy, a tím i infiltraci. Zvýšením drsnosti díky rostlinám dochází ke snížení rychlosti povrchového odtoku. Vegetace také svým kořenovým systémem přirozeně zvyšuje soudržnost půdy a chrání její povrch před energií dopadajícího deště. Díky intercepci rostliny zachytí část srážky a snižují tak její celkový objem. Konkrétní vliv vegetačního krytu záleží na druhu plodiny, na způsobu setí, ale i na její fenofázi v době příčinné srážky.

Vliv vegetace je popsán pomocí parametru potenciální intercepce (***P_I***) a poměrné plochy listové (***P_{PL}***) pro konkrétní plodinu. P_I určuje celkové množství vody v mm, které je rostlina schopna zachytit na listech a stonku. P_{PL} je poměrnou hodnotou mezi plochou listů k ploše půdního povrchu, a určuje tedy množství vody, které je vegetace schopna zachytit oproti části srážky, která dopadne přímo na půdní povrch, čímž přímo

erozně působí. Doporučené průměrné hodnoty P_I a P_{PL} pro vybrané plodiny jsou uvedeny v manuálu k programu SMODERP (Vrána a kol., 1996). Parametry P_{PL} a P_I patří z hlediska citlivosti modelu mezi méně významné faktory.

Daleko významnější je vliv vegetace na proces povrchového odtoku. V modelu SMODERP je využita upravená rovnice kinematické vlny s využitím Manningova součinitele drsnosti pro povrchový odtok. Hodnoty součinitele drsnosti pro povrchový odtok pro jednotlivé plodiny jsou uvedeny v manuálu k programu.

Informaci o zemědělském využití jednotlivých pozemků je možno získat v rámci podrobného terénního průzkumu, případně od hospodařících farmářů. Informace od hospodařících subjektů je významná z toho důvodu, že na pozemcích zpravidla aplikují určité osevní postupy, které mohou být odlišné od stavu, který byl v době průzkumu. Návrh opatření by měl být proveden s ohledem na možné využití pozemků, nikoliv pouze na jeho aktuální stav – podle zadání a cíle konkrétního projektu.

6.3.4 Srážky

SMODERP je epizodní model pracující s jednotlivou srážkou konstantní nebo časově proměnné intenzity. V první řadě lze model využít pro posouzení reálného deště, kdy se do modelu zadá reálný déšť změřený například pomocí srážkoměru. Do modelu lze také zadávat libovolné vygenerované srážky. Je možné posuzovat dopad historické srážkové události atp.

V případě posouzení erozní ohroženosti pozemků, návrhu organizačních nebo technických protierozních opatření a jejich dimenzování, jsou voleny návrhové srážky s určitou dobou opakování. Volba doby opakování závisí na stupni ochrany řešeného území. Pro posouzení erozní ohroženosti zemědělských ploch je rozumné uvažovat návrhové deště s dobou opakování 2 roky, případně 5 let ve významných lokalitách. Pro vlastní dimenzování technických prvků pak volit dobu opakování spíše 5 let, výjimečně 10 let. V případě, že se jedná o významné lokality, jako jsou například pásma hygienické ochrany vodních zdrojů, lokality významné z hlediska ochrany přírody apod., lze použít návrhové srážky s dobou opakování až 10 let. Vyšší ochrana v extravilánu není ekonomicky zdůvodnitelná.

V případě, že je model využíván pro návrh ochrany intravilánu, kde se jedná o ochranu osob a jejich majetku, jsou většinou uvažovány návrhové deště o jeden stupeň vyšší. Většinou s dobou opakování 10, výjimečně 20 let. V ojedinělých případech, u významných objektů, lze uvažovat dobu opakování 50 let. Jakákoli zvýšená ochrana musí být zvážena i ekonomicky. Obecně je možno vycházet z doby opakování doporučené v Tab. 1.

V České republice jsou v zásadě k dispozici dva dostupné zdroje návrhových dešťů. Prvním zpracovaným dokumentem je použití hodnoty redukovaných srážek 24hodinových úhrnů. Čtyřiadvacetihodinové úhrny byly stanoveny pro 529 stanic bývalé ČSSR s dobou opakování 2, 10, 20, 50 a 100 let z řad měření pro roky 1901–

1980 (Šamaj a kol., 1983). Tyto hodnoty jsou v současné době aktualizovány v ČHMÚ na základě novějších ombrografických záznamů. Pro potřeby epizodního modelu je třeba tyto 24hodinové srážky redukovat na srážky kratší doby trvání. Redukcí srážek v ČR se zabývali Hrádek a Kovář (1994), kteří uvádí výpočet redukčního koeficientu pro převod jednodenního úhrnu deště na úhrn déšť kratší doby trvání v závislosti na době opakování a době trvání požadované srážky podle vztahu:

$$\Psi_t = a.t^{1-c}$$

Kde:

- a; 1-c koeficienty v závislosti na délce srážky a době opakování
- t délka trvání srážky

Alternativou je využití nástroje DES_RAIN (Vaššová, Kovář, 2011), který umožní stejný výpočet s automatickou podporou.

Tímto způsobem je možno určit celkový úhrn srážky dané doby opakování pro kratší doby trvání (od 10 minut výše).

Po získání celkového úhrnu návrhové srážky je problematické stanovit její časové rozdělení (srážka s konstantním rozdělením v čase, případně jiný tvar – trojúhelník, lichoběžník atp.).

Pro model SMODERP jsou také často používány srážky podle J. Trupla (Trupl, 1958). Trupl zde uvádí maximální intenzity srážkových úhrnů pro přívalové deště s dobou trvání 120 minut pro 98 míst v ČR s různou dobou opakování (2, 5, 10 a 20 let). Nevýhodou tohoto materiálu je jeho stáří přes padesát let a také, že se jedná o maximální úhrny o dané délce trvání a době opakování. Často jsou tyto úhrny interpretovány jako návrhová srážka. Hodnoty srážek udávané Truplem lze použít jako jeden možný scénář, ve kterém je maximální intenzity dosaženo v prvních pěti minutách, dále se hodnota intenzity snižuje. Návrhové deště podle Trupla jsou uvedeny v dokumentaci modelu. Druhá možná interpretace představuje vytvoření návrhové srážky zvoleného časového průběhu, ale s daným úhrnem, odpovídajícím době trvání.

Vnitřní rozdělení srážky má pro celkový výsledek zásadní význam, proto při využití modelu je v dokumentaci třeba uvést jaké rozdělení deště bylo při návrhu použito. Konstantní srážka po celou dobu srážky neodpovídá reálnému dešti. Čím je nárůst intenzity deště k její maximální hodnotě a následný pokles ostřejší a čím je maximální hodnota intenzity posunuta blíže ke konci srážky, tím je hodnota maximálního průtoku v profilu větší, protože je vyčerpán vliv vegetace a postupně je snižována infiltrační rychlost.

6.4 Výstupy z modelu – ukázka

Výpočet v jednotlivých charakteristických profilech poskytuje dva typy výstupů. Prvním je výpočet erozní ohroženosti sloužící pro posouzení agrotechnických opatření (změna osevních postupů atp.) a pro umístění technických protierozních opatření. Z těchto důvodů model také umožňuje dávkové spouštění simulace s různými druhy plodin (od TTP po povrch bez vegetace). Model umožňuje ponechat určitým úsekům fixní vegetaci, což slouží například pro simulaci území s pásy TTP.

Základním výstupem z modelu SMODERP je soubor ve formátu *.xls, který obsahuje jeden list. Na něm jsou v přehledu uvedeny vstupní údaje (profil svahu, srážka, celková délka svahu atp.) a také vypočtená místa přerušení povrchového odtoku. V případě, že profil není erozně ohrožen, zůstanou pole s přerušeními prázdná. U každého přerušení jsou uvedeny:

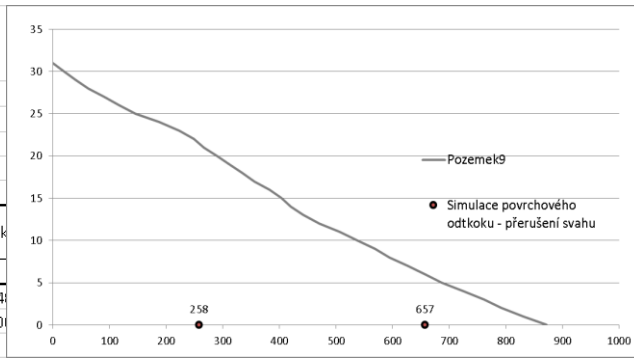
- vzdálenost od počátku svahu,
- vzdálenost mezi jednotlivými přerušeními,
- výška hladiny povrchového odtoku v místě přerušení,
- maximální průtok v místě přerušení, který slouží pro navrhování odváděcích prvků,
- objem odtoku za simulovanou srážku v místě přerušení, který slouží pro navrhování zasakovacích prvků.

Tyto číselné výsledky jsou doplněny o grafické znázornění formou podélného řezu charakteristickým profilem s vyznačenými místy přerušení odtoku. V případě spuštění výpočtu v dávce jsou na prvním listu přehledně všechny výsledky. Tomu odpovídá i grafické znázornění, viz následující Obr. 17.

Simulace povrchového odtkoku - přerušení svahu

Oblast	Bykovice_pole			
Svah	Pozemek9			
Šířka svahu	1 [m]	Typ svahu	Jednoduchý	
Srážková stanice	Česká Republika / Nová Ves (Kolín) / 10			

Vzádlenost od počátku	Vzdálenost přerušení	Maximální výška hladiny	max průtok	celkový odtok
[m]	[m]	[mm]	[l/s]	(l)
258	258	4.0	0.0	2544
657	399	4.7	0.0	4290

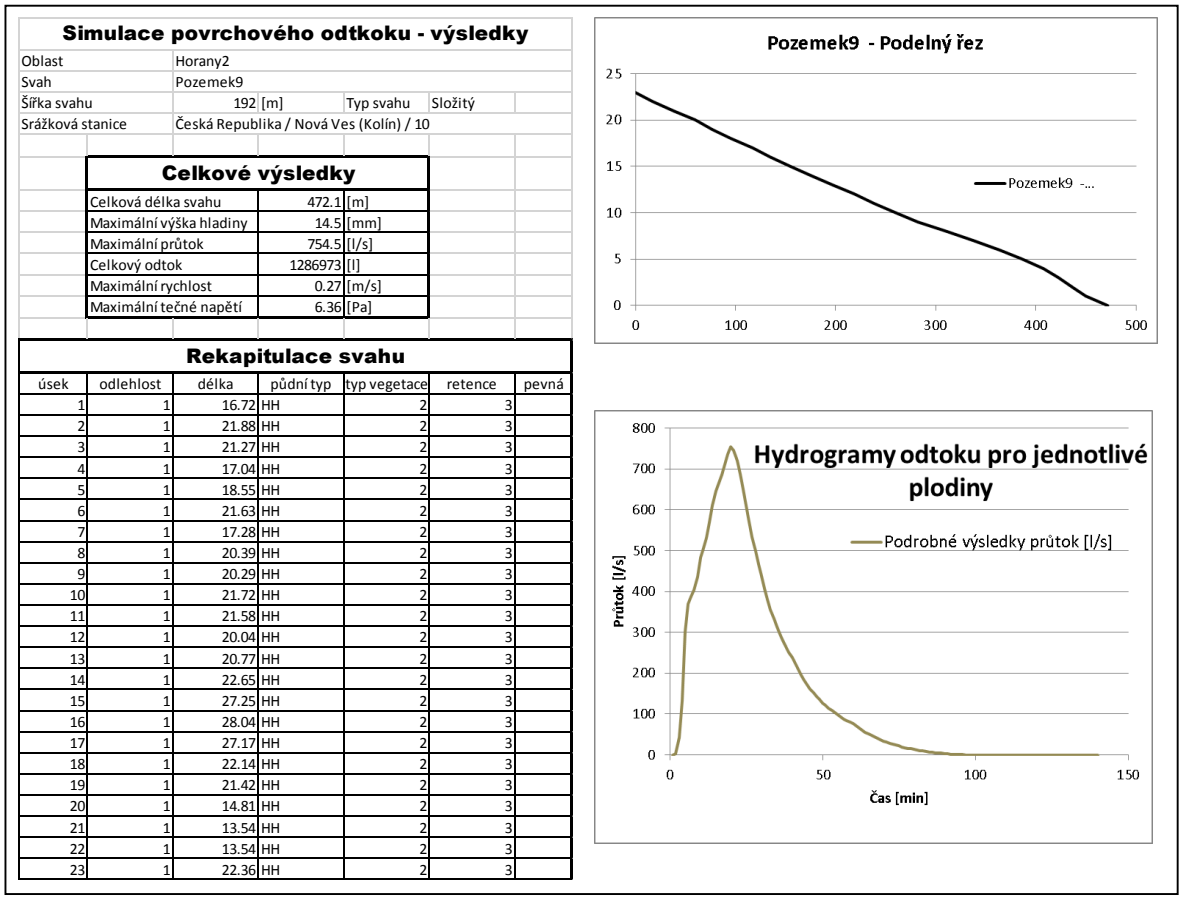


Obr. 17: Ukázka výstupů z modelu SMODERP 10 – celkové výsledky – přípustná délka svahu

Druhým typem výpočtu je stanovení celkových odtokových charakteristik v závěrovém profilu. V tomto typu výpočtu není posuzována erozní ohroženost a nejsou ani řešena překročení limitních rychlostí nebo tečných napětí. Ve výpočtu je uvažován stále plošný (tedy nesoustředěný) odtok i v případě, že jsou překročeny limitní hodnoty.

Výsledky jsou uloženy ve dvou listech výsledného *.xls souboru. Na prvním listu jsou uvedeny přehledové výsledky (viz Obr. 18):

- maximální výška hladiny,
- maximální průtok – pro navrhování ochranných prvků,
- celkový objem odtoku,
- maximální rychlost a tečné napětí – pro možnost porovnání s limitními hodnotami.



Simulace povrchového odtoku - výsledky

Oblast	Horany2		
Svah	Pozemek9		
Šířka svahu	192 [m]	Typ svahu	Složitý
Srážková stanice	Česká Republika / Nová Ves (Kolín) / 10		

Celkové výsledky

Celková délka svahu	472.1	[m]
Maximální výška hladiny	14.5	[mm]
Maximální průtok	754.5	[l/s]
Celkový odtok	1286973	[l]
Maximální rychlost	0.27	[m/s]
Maximální tečné napětí	6.36	[Pa]

Rekapitulace svahu

úsek	odlehlost	délka	půdní typ	typ vegetace	retence	pevná
1	1	16.72	HH	2	3	
2	1	21.88	HH	2	3	
3	1	21.27	HH	2	3	
4	1	17.04	HH	2	3	
5	1	18.55	HH	2	3	
6	1	21.63	HH	2	3	
7	1	17.28	HH	2	3	
8	1	20.39	HH	2	3	
9	1	20.29	HH	2	3	
10	1	21.72	HH	2	3	
11	1	21.58	HH	2	3	
12	1	20.04	HH	2	3	
13	1	20.77	HH	2	3	
14	1	22.65	HH	2	3	
15	1	27.25	HH	2	3	
16	1	28.04	HH	2	3	
17	1	27.17	HH	2	3	
18	1	22.14	HH	2	3	
19	1	21.42	HH	2	3	
20	1	14.81	HH	2	3	
21	1	13.54	HH	2	3	
22	1	13.54	HH	2	3	
23	1	22.36	HH	2	3	

Obr. 18: Ukázka výstupů z modelu SMODERP 10 – celkové výsledky – odtokové charakteristiky

Průběhy jednotlivých veličin během simulace jsou zobrazeny formou hydrogramů a dalších grafů. Na druhém listu jsou uvedeny průběhy veličin číselně v minutovém kroku.

I tento typ simulace je možné spouštět v dávce pro jednotlivé plodiny. Celkové výsledky jsou pak uvedeny na prvním listu souboru *.xls na dalších listech jsou uvedeny číselné průběhy veličin pro jednotlivé plodiny.

Podrobně jsou výsledky popsány v manuálu k programu SMODERP na stránkách www.storm.fsv.cvut.cz/smoderp.

6.5 Výhody a nevýhody

Model byl od počátku vyvíjen jako aplikační s cílem sloužit jako nástroj při posuzování erozní ohroženosti a pro navrhování protierozních opatření v prostředí České republiky. Mezi hlavní výhody tohoto modelu patří relativní jednoduchost získání vstupních dat prakticky bez potřeby dalších aplikací. Model podporuje i detailněji získané vstupy, například na základě novějších a podrobnějších digitálních modelů. Získání těchto podkladů není přímo součástí modelu SMODERP, ale lze je získat například v prostředí ArcGIS, GRASS atp., které jsou schopny pracovat s vektorovými a rastrovými podklady.

Další výhodou modelu SMODERP jsou výstupy, které model poskytuje. Pomocí tohoto jednoho nástroje jsou schopni uživatelé určit erozní ohroženost daného území a zároveň navrhnout účinná opatření, a to jak organizační opatření – vyřazení některých kultur, pásové obdělávání, včetně možné simulace návrhových scénářů (Kavka, 2011) – tak i technická opatření. Pro dimenzování technických opatření jsou z modelu dostupné základní potřebné parametry – maximální průtok a objem odtoku. Pro náročnější úlohy, kde je nutné uvažovat transformaci vody v korytech odváděcích příkopů nebo při složitých rozvětvených soustavách, je pak nutné využít odtokové hydrogramy a nelze pracovat pouze s hodnotami maximálních průtoků.

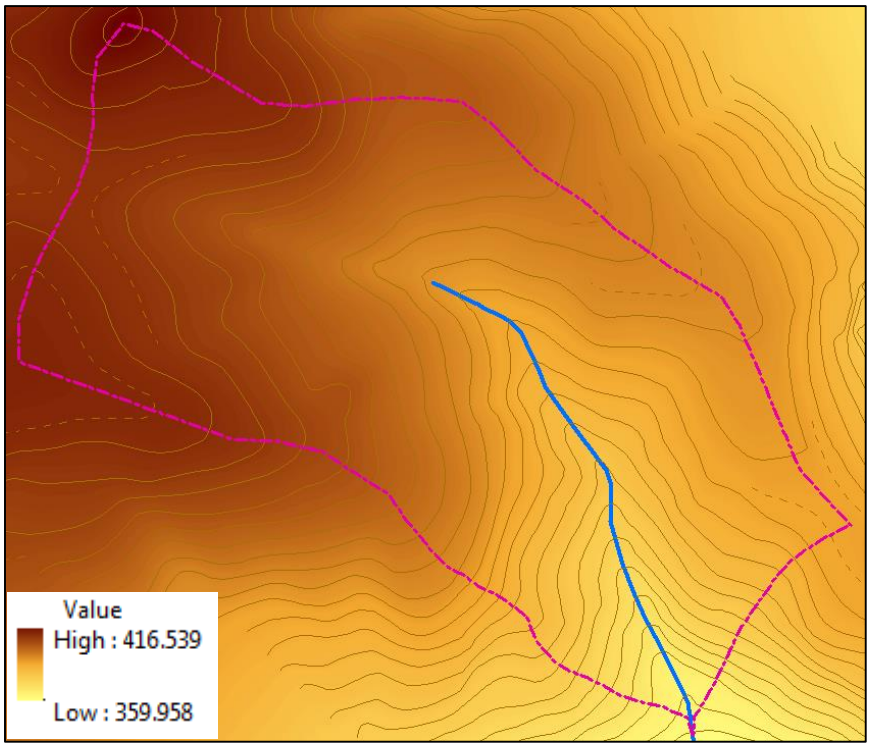
Mezi hlavní nevýhody modelu patří nutnost volby většího počtu charakteristických profilů, přičemž je na zpracovateli projektu, kolik charakteristických profilů si zvolí, a dále nutnost vlastního podrobného pedologického průzkumu k doplnění mapových podkladů.

6.6 Příklady použití

Příklad použití modelu pro navrhování konkrétního technického protierozního prvku (příkop, průleh) je uveden v metodice “Navrhování technických protierozních opatření“ (Kadlec a kol., 2013), kde je také uveden zjednodušený příklad získání podkladů pro navrhování suchých nádrží a poldrů. Hlavním přínosem při navrhování soustavy prvků z většího množství pozemků je možnost pracovat přímo s odtokovými hydrogramy, ze kterých je následně možné určovat kulminační průtoky v zájmových profilech především svodných příkopů.

První zde uvedený příklad popisuje detailní výpočet na morfologicky relativně členitém terénu. DMT s vyznačeným vodním tokem a vrstevnicemi je uveden na Obr. 19. V rámci příkladu je také posuzován vliv vnitřního rozložení srážky na výsledný hydrogramu odtoku v závěrovém profilu.

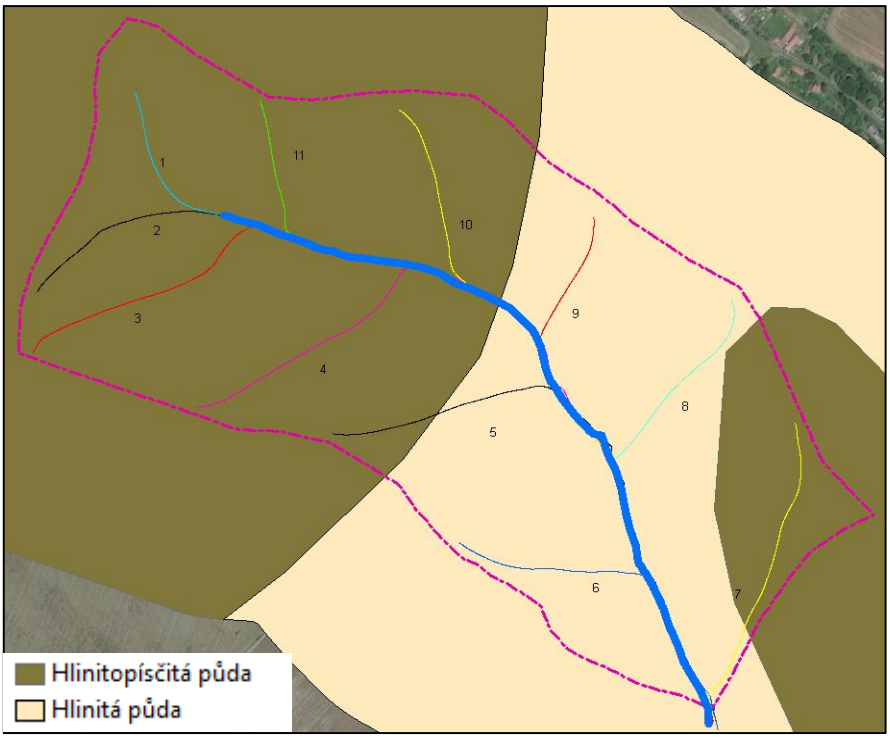
Zvolené charakteristické profily jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 20). Jednotlivé profily byly vytvořeny na základě DMT a z prostředí *ArcGIS* vyexportovány do *MS Excel*.



Obr. 19: DMT s vyznačenou hranicí řešeného území se stálou vodotečí

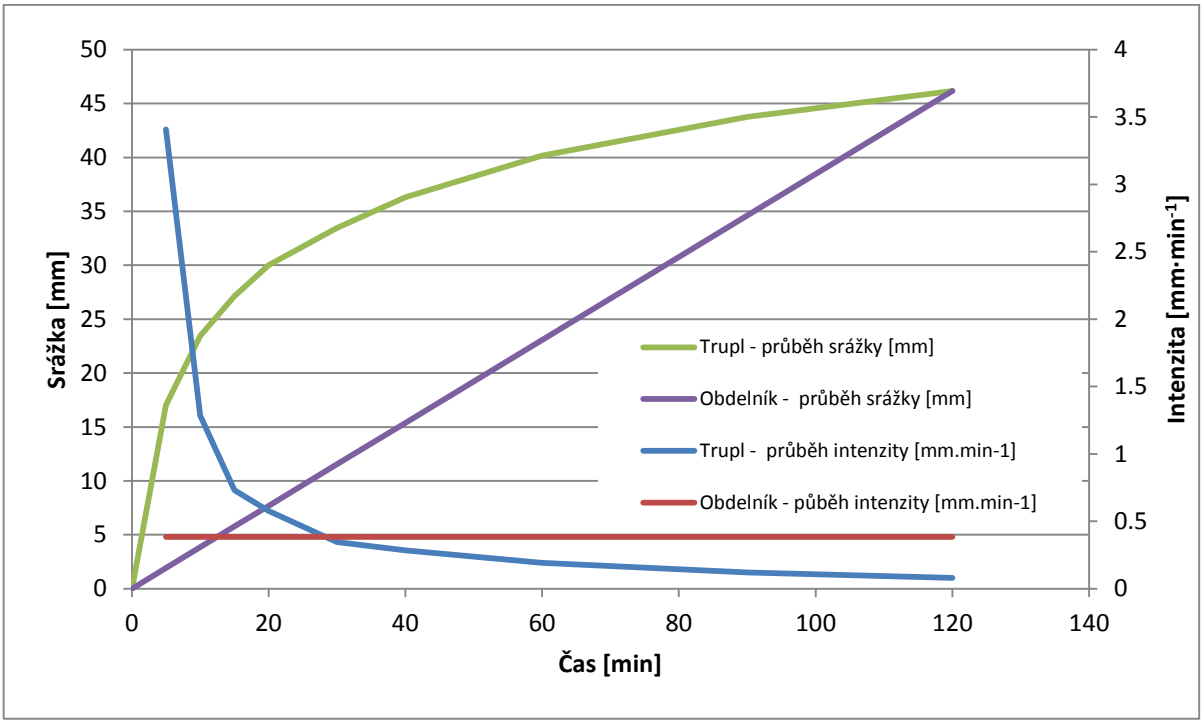
Obr. 20: Umístění jednotlivých profilů a dráha soustředění odtoku

Na základě map KPP bylo zjištěno, že se jedná půdní typy kambizem a luvizem. Z hlediska půdního druhu se jedná o půdy hlinitopísčité a písčité. Plošné rozložení půdních druhů je patrné z Obr. 21.



Obr. 21: Rozdělení půdních druhů podle mapy KPP

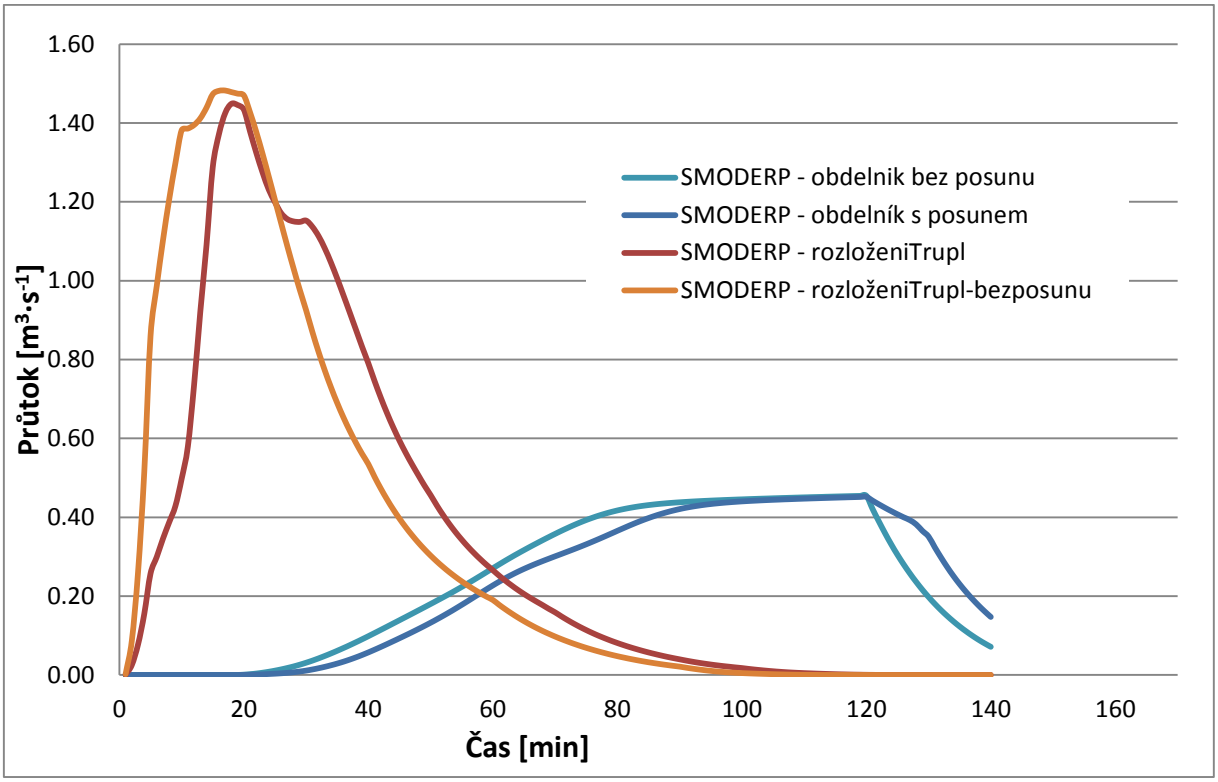
Výpočet byl proveden se dvěma návrhovými srážkami se shodnou dobou trvání a celkovým úhrnem, ale různým časovým průběhem. Byla zvolena 120minutová srážka s celkovým úhrnem 46,16 mm. Úhrn odpovídá zredukované 24hodinové návrhové srážce s dobou opakování deset let (Šamaj a kol., 1983) pro odpovídající stanici. Srážky se liší časovým rozložením (detailněji popsáno v kapitole 6.3.4). V prvním případě byla uvažována srážka s rovnoměrnou intenzitou po celou dobu trvání. V druhém případě byl použit průběh intenzity odpovídající časovému rozložení maximálních srážkových intenzit podle Trupla (1958) pro povodí Labe (viz Obr. 22).



Obr. 22: Porovnání srážky s konstantním průběhem srážky a s Truplovým rozdělením.

Pro porovnání vlivu charakteristik koryta (příkopu) na tvar hydrogramu bylo provedeno podrobné testování na části řešeného území. Pro výpočet vlivu charakteristik koryta a doby doběhu bylo zvoleno horní dílčí podpovodí zahrnující profily 1, 2, 3, 4 a 11. Hodnoty průtoků a objemů odtoku byly vypočteny pro obě srážky ve dvou scénářích. Nejprve jako prostý součet hodnot kulminací bez uvažované doby doběhu a ve druhém případě s uvažovaným vlivem rychlosti a časovým posunem v korytě. Tvar koryta, drsnost, sklon a další vstupy pro výpočet rychlosti proudění v korytě toku byly stanoveny na základě terénního průzkumu. Rozdíly mezi jednotlivými výsledky znázorňuje Obr. 23.

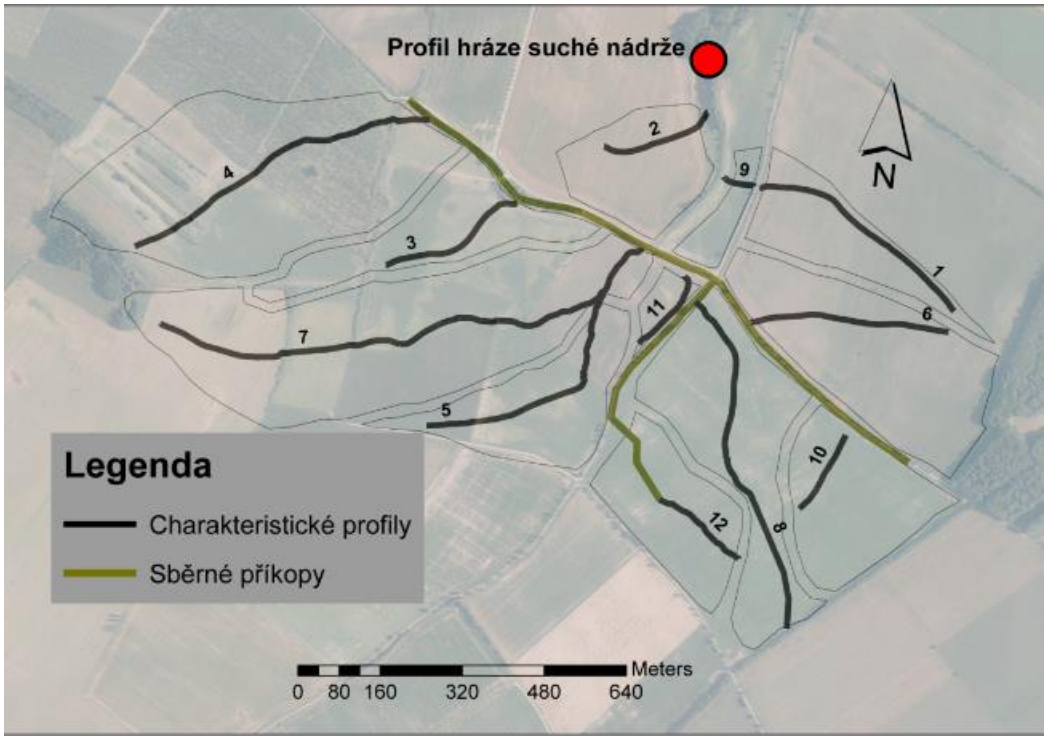
Z Obr. 23 je patrné, že není významný rozdíl v maximálních hodnotách průtoku mezi výpočtem s uvažovanou dobou doběhu a bez ní. Liší ale svým průběhem. Zcela zásadní je ale rozdíl v průtocích způsobený odlišným časovým průběhem příčinné srážky.



Obr. 23: Porovnání hydrogramů pro různá rozložení návrhových srážek s a bez zahrnutí doby doběhu

Stanovování návrhové srážky pro epizodní matematické simulační modely je obecným problémem jejich aplikace a bylo diskutováno na několika místech této Metodiky. V každém případě tato problematika přesahuje rámec prezentované publikace. Z celkových výsledků je patrné, že se výsledky v objemech odtoku mezi použitými metodami významně neliší, zatímco rozdíl v návrhových průtocích je zcela zásadní. Vzhledem k tomu, že ČSN 751400 *Hydrologické údaje povrchových vod* připouští odchylku měřených hodnot průtoků od předpovídaných pro malá povodí až 60 %, byla by i takto vysoká odchylka v rámci této tolerance. Nicméně řešení otázky správného definování časového průběhu návrhové srážky pro epizodní fyzikálně založené matematické modely přesahuje rámec této metodiky.

Druhým příkladem poukazujícím na vliv možného využití výsledků z modelu při navrhování složitějších soustav je stanovení hydrogramu přítoku vody do suché nádrže. Modelem SMODERP byly určeny odtokové parametry dvanácti charakteristických profilů, svádějících vodu do povodí k profilu hráze suché nádrže, (viz Obr. 24). Byl stanoven časový průběh povodňové vlny a objemy odtoku pro návrhové deště s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let.

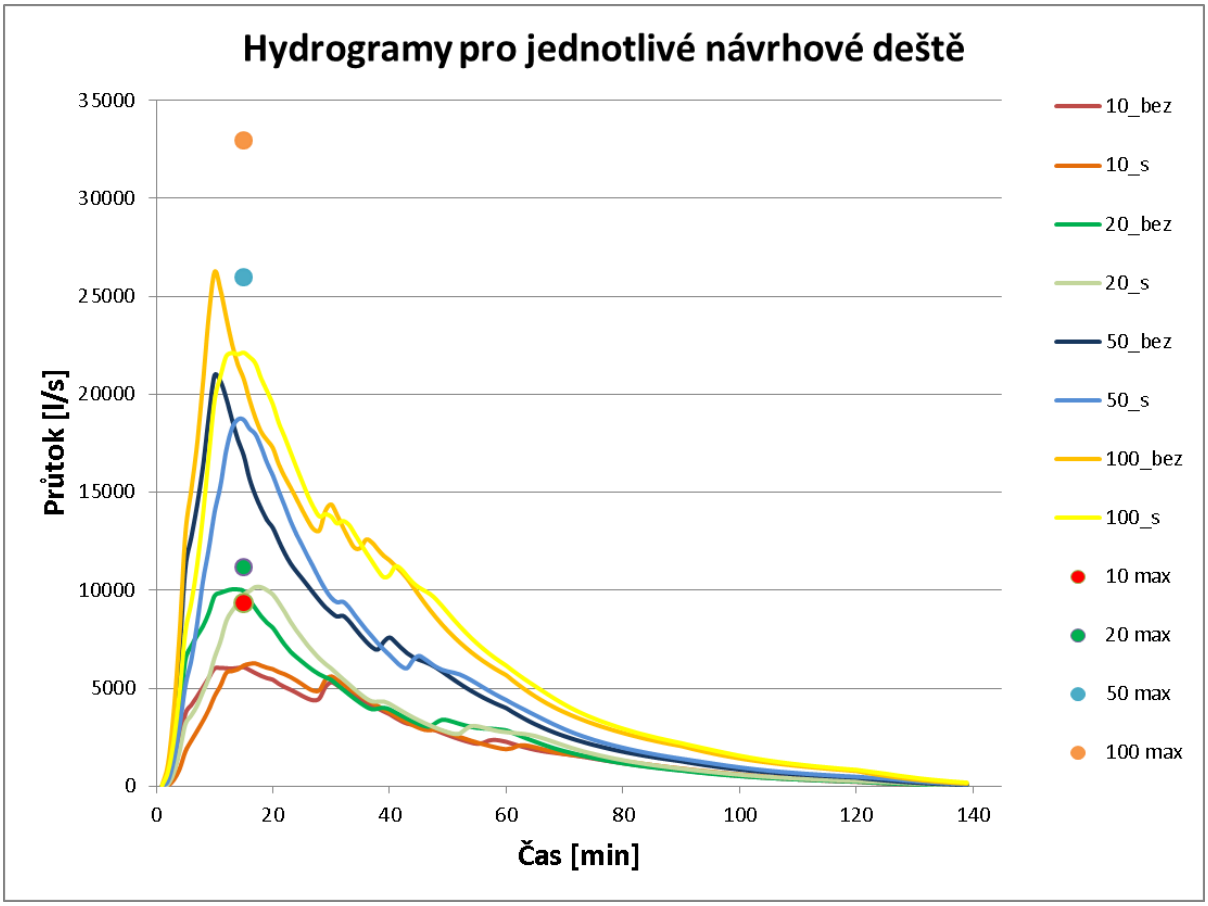


Obr. 24: Charakteristické profily a sběrné příkopy směřující do profilu nádrže (podkladové ortofoto WMS - ČÚZK).

Kulminační průtok a hydrogram v profilu hráze pro jednotlivé doby opakování byly stanoveny třemi různými metodami:

- **varianta A** – prosté sčítání maximálních kulminačních průtoků, tedy bez ohledu, kdy kulminace nastala,
- **varianta B** – součet hodnot jednotlivých hydrogramů odtoku (hodnoty průtoku v daných časových okamžicích) z jednotlivých charakteristických profilů, bez ovlivnění zpoždění v odváděcích příkopech,
- **varianta C** – zahrnutí posunu doby odtoku v odváděcích prvcích. Je tedy zahrnut vliv zdržení v příkopech (posun řešen po jednotlivých úsecích).

Rozdíly mezi kulminačními průtoky určenými dle variant A, B a C jsou znázorněny na Obr. 25. Bodové hodnoty zobrazují součet maximálních hodnot průtoků jednotlivých profilů (varianta A), hydrogramy označené „bez“ znázorňují součet jednotlivých hydrogramů bez uvažované doby zdržení v síti odváděních příkopů (varianta B) a hydrogramy označeny „s“ znázorňují vliv posunu kulminace vlivem zdržení v jednotlivých odváděcích prvcích (varianta C). V Tab. 7 jsou uvedeny maximální průtoky a objemy odtoku pro varianty A, B, C. Časový posun kulminace po jednotlivých úsecích příkopů díky době zdržení a rychlosti proudění v příkopech byl řešen s předpokladem ustáleného rovnoměrného proudění s využitím Chézyho rovnice.



Obr. 25: Výsledné hydrogramy v profilu nádrže pro návrhové srážky s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Bodové hodnoty zobrazují součet maximálních hodnot průtoků jednotlivých profilů, hydrogramy označené „bez“ znázorňují součet jednotlivých hydrogramů bez uvažované doby zdržení v síti odváděních příkopů a hydrogramy označeny „s“ znázorňují vliv posunu kulminace vlivem zdržení v jednotlivých odváděcích prvcích

Tab. 7: Hodnoty kulminačních průtoků a objemů odtoku v profilu suché nádrže pro řešené varianty A, B, C

Varianta	Q_{20}	V_{20}	Q_{50}	V_{50}	Q_{100}	V_{100}
	($m^3\ s^{-1}$)	(m^3)	($m^3\ s^{-1}$)	(m^3)	($m^3\ s^{-1}$)	(m^3)
A	11,2	18 112	26,0	50 365	32,9	60 989
B	10,0		21,0		26,2	
C	10,1		18,7		22,1	

Je nepochybné, že varianta A znamená nejjednodušší (ale současně nejméně přesný způsob) určení kulminačního průtoku. Maximální kulminační průtoky jsou například získatelné i jinými metodami. Naproti tomu varianta C je výpočtově nejsložitější způsob určení kulminačního průtoku v profilu suché nádrže.

Pro získání výsledné hodnoty kulminace v uzávěrovém profilu je zcela zásadní způsob, jak jsou navzájem sčítány výsledné hodnoty odtoku pro jednotlivé charakteristické profily. Význam vzájemného posunu hydrogramů roste v závislosti na velikosti řešeného povodí a délce odváděcích příkopů.

6.7 Celkové zhodnocení

Model SMODERP umožňuje snadné a rychlé navrhování protierozních, především technických, opatření. Model umožňuje určit jak polohu případných technických protierozních opatření, tak i efektivní získání návrhových hodnot pro dimenzování odváděcích prvků (příkopy, průlehy). Kromě polohy jednotlivých prvků model také umožňuje získat hydrogramy odtoku, které pak mohou sloužit jako podklad pro navrhování složitějších soustav odváděcích prvků.

Současná verze modelu SMODERP funguje na principu profilového přístupu – 1D. Zásadní úskalí všech profilových metod je v nutnosti volby charakteristických profilů, které nemusejí dostatečně věrně popisovat řešené území. Proto je vyvíjena 2D varianta modelu SMODERP, která je v současné době v testovacím režimu. Tato varianta modelu bude určena především pro morfologicky komplexnější území.

III. Srovnání „novosti postupů“

Předkládaná metodika je zcela nová a nemá ve své podobě v ČR ani sousedních zemích obdoby. Novost spočívá v tom, že byly soustředěny informace nikoliv charakteru výzkumného, ale ryze aplikačního do podoby, která by umožnila významným způsobem zkvalitnit práci projektantů a správců území nasazením metod a nástrojů, které jsou zřetelně na kvalitativně vyšší úrovni oproti metodám v současnosti používaným.

Hlavní odlišností od dříve publikovaných výzkumných zpráv je právě orientace na koncového uživatele. V metodice jsou potlačeny teoretické kapitoly a pozornost je soustředěna na praktickou aplikovatelnost nástrojů – na vhodnost úloh, kde je aplikace efektivní, na vhodná a dostupná vstupní data i na způsoby interpretace výsledků.

Metodika nedokázala vyřešit všechny problémy, se kterými se bude případný uživatel muset vypořádat – především nedostatek dat, umožňujících epizodní přístup, který je v případě dimenzování prvků TPEO nezbytný, nicméně chybí pro něj jak kvalitní návrhové vstupní data, tak i stanovení přípustných mezí odtoku a ztráty půdy.

Dosud byly podobné informace k dispozici jen částečně a to v povšechné podobě v citovaných metodikách Ochrana zemědělské půdy před erozí (Janeček a kol., 2007 a 2012) a v celé řadě výzkumných zpráv. Informace však nebyl podány ani soustředěny tak, aby je praktický uživatel – projektant – mohl efektivně využít.

IV. Popis uplatnění Certifikované metodiky

Metodika byla koncipována tak, aby se stala praktickou příručkou projektanta, která by mu měla poskytnout dostatek informací k tomu, aby mohl využít ve svých návrzích moderních matematických simulačních nástrojů a prostředků. Snahou autorů je, aby v ní, projektant nalezl všechny nezbytné informace pro efektivní nasazení těchto nástrojů a metod od správné volby nástroje pro danou úlohu, přes využití vhodných vstupních dat až po správnou interpretaci výsledků a výstupů. To vše doplněno praktickými ukázkami. Důraz byl kladen na praktičnost s minimem teoretických vstupů. Na druhou stranu, metodika si neklade za cíl suplovat uživatelskou dokumentaci jednotlivých modelů a autor bude pro řešení detailních otázek odkazován na patřičná místa přímo v dokumentaci.

Předpokládá se, že příručka bude vydána v tištěné i elektronické podobě a touto cestou bude šířena mezi praktické projektanty, na Pozemkové úřady, do státní správy i samosprávy, i do vzdělávací sféry. Její propagace bude prováděna na WWW stránkách autorských pracovišť, na stránkách poskytovatele (MZe ČR), Ústředního Pozemkového Úřadu ÚPÚ, případně dalších zainteresovaných organizací a profesních svazů, jako je například ČKAIT, ČSKI a v neposlední řadě při příležitosti cílených seminářů, workshopů a na tematicky blízkých konferencích.

V. Ekonomické aspekty

Prezentovaná metodika je zaměřena na aplikaci moderních výpočetních metod pro navrhování opatření proti vodní erozi v krajině. Do nákladů na zavedení doporučovaných postupů tak nelze počítat náklady na realizaci popisovaných TPEO, ale pouze na zavedení nových postupů a informací.

Zde lze kvalifikovaně prohlásit, že se zavedením a praktickým využíváním prezentované Metodiky žádné náklady nejsou spojené. Metodika nevyžaduje pro své zavedení žádné významné investice. Potenciálně nelze vyloučit pořízení nového hardwaru, nutnost zvyšování kvalifikace, či přijímání nových pracovníků. Jedná se ale o ojedinělé případy, které nelze paušálně finančně ohodnotit a kvantifikovat.

Díky systemizaci dat a informací tak metodika umožňuje alternativní využití kvalitativně vyšších postupů pro široký okruh uživatelů, čímž může zefektivnit vlastní proces navrhování a projektování a usnadnit práci jak projektantům, tak i orgánům, činným v legislativním procesu s tím spojeným, orgánům státní správy a samosprávy i správcům území, vodních toků a dalších složek krajiny.

Stejně tak v podstatě nelze reálně vyčíslit benefit pro uživatele. Ten je možno kvantifikovat jako úsporu času a tím zvýšení efektivity při navrhování a dimenzování nebo posuzování prvků TPEO. Ale není možné tuto úsporu reálně finančně ohodnotit.

Podobně, je možné s jistotou prohlásit, že díky systemizaci informací, jejich utřídění a vyhodnocení zkušeností z inventarizace všech realizovaných TPEO na území ČR poskytuje Metodika kvalitnější podklady a návody. Ty umožní navrhování lepších, efektivnějších a účinnějších prvků TPEO a jejich systémů, což v konečném důsledku bude mít výsledek ve snížení nákladů na realizaci TPEO a zvýšení jejich účinnosti. To se opět projeví v ochraně půdy a vody jako základních zdrojů a v ochraně krajinného prostoru. Všechny tyto benefity jsou sice nesporné, ale v podstatě mimoekonomické a pokus o kvantifikaci jejich finančního přínosu by hraničil se šarlatánstvím.

VI. Seznam použité související literatury

- AG Boden, 1994: *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 4. vydání, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologishe Landesämter, Hannover, Bundes Republik Deutschland. 392 s.
- ČSN 75 4500 Protierozní ochrana zemědělské půdy.
- DOS T 3.17 Protierozní ochrana. Informační centrum ČKAIT, Praha.
- Dostál T., Krása J., Vrána K., Kavka P., Devátý J., 2011: *Optimalizace postupu navrhování technických protierozních opatření*. Dílčí zpráva řešení projektu NAZV č. QI91C008 za ČVUT v Praze.
- Dostál T., Krása J., Vrána K., Kavka P., Devátý J., Janotová B., 2012: *Optimalizace postupu navrhování technických protierozních opatření*. Dílčí zpráva řešení projektu NAZV č. QI91C008 za ČVUT v Praze.
- Flanagan D. C., Nearing M. A. (eds.) 1995: *USDA-Water Erosion Prediction Project: Technical documentation*. NSERL Report No. 10: National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN, USA.
- Holý M., 1984: *Vztahy mezi povrchovým odtokem a transportem živin v povodí vodárenských nádrží*. Dílčí zpráva výzkumného úkolu VI-4-15/01-03/. Praha.
- Holý M., Váška J., Vrána K., 1989: SMODERP – simulační model povrchového odtoku a erozního procesu. *Vodní hospodářství* 10, řada A, Praha.
- Hrádek F., Kovář P., 1994: Výpočet náhradních intenzit přívalových dešťů. *Vodní hospodářství* 11, s. 49–53, ISSN 1211-0760.
- Janeček M. a kol., 1972: *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Metodika zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe, ÚVTIZ, Praha,
- Janeček M. a kol., 1983: *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Metodika zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe, ÚVTIZ, Praha
- Janeček M. a kol., 1992: *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Metodika zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe, ÚVTIZ, Praha.
- Janeček M. a kol., 2007: *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Autorizovaná metodika, VÚMOP, v. v. i., Praha..
- Janeček M. a kol., 2012: *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Autorizovaná metodika FŽP ČZU, Praha.
- Kadlec V., Dostál T., Vrána K., Kavka P., Krása J., Devátý J., Podhrázská J., Pochop M., Kulířová P., Heřmanovská D., Novotný I., Papaj V.., 2014: *Navrhování technických protierozních opatření*. Certifikovaná metodika, VÚMOP, v. v. i., Praha.
- Kavka P., 2011: *Kalibrace a validace matematického modelu SMODERP*. Doktorská dizertační práce, ČVUT v Praze.

- Kovář P., Vaššová D., 2010: Modelling surface runoff to mitigate harmfull impact of soil erosion. *Proceedings of HydroPredict IAHS Conference Prague*, s. 26–27.
- Krása J., 2010: *Empirické modely vodní eroze v ČR – nástroje, data, možnosti a rizika výpočtů*. Habilitační práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- Němeček J., 2001: *Taxonomický klasifikační systém půd České Republiky*. ČZU, Praha.
- Michael A., Schmidt J., Schmidt W. A., 1996: *EROSION 2D/3D, Parameter Catalog Application (2D)*. Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- Mishra S. K., Singh V. P., 2003: *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. ISBN 1-4020-1132-6.
- Mitasova H., Mitas L., Brown W. M., Johnston D. M., 1998: *Multidimensional soil erosion/deposition modeling and visualization using GIS*. Geographic Modeling and Systems Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, for U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories, Final report 1993–1998, Urbana, Illinois.
- Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., Porter J. P., 1991: RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). *Journal of Soil and Water Conservation* 46 (1), s. 30–33.
- Schmidt J., von Werner M., Michael A., 1996: *EROSION-2D/3D: Ein Computermodell zu Simulation der Bodenerosion durch Wasser*. Dresden/Freiberg, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft/Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 240 S. (vergriffen)
- Šamaj F., Valovič J., Brázdil R., 1983: *Denné úhrny zrážok s mimoriadnou vydatnosťou v ČSSR v období 1901–1980*. Sbor. prác SHMÚ, Alfa, Bratislava.
- Trupl J., 1958: *Intensity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy*. Práce a studie č. 97. Praha, VÚV Praha.
- Váška J., 2000: *DOST Hydromeliorace*. ČKAIT, ISBN 80−86426−01−7.
- Vaššová D., Kovář P., 2011: *Program DES_RAIN – uživatelská dokumentace, příručka*. FŽP ČZU, Praha, <http://fzp.czu.cz/vyzkum/programs/des_rain/>
- von Werner M., 2006: *Erosion-3D User manual, Ver. 3.1.1*. GEOGNOSTICS a. g., Berlin.
- Vrána K., Váška J., Dostál T., 1996: *SMODERP – uživatelský manuál*.
- Vrána K., Kavka P., Dostál T., 2011: *Simulační model povrchového odtoku a erozních procesů 5.01*. Dokumentace softwaru, FSv ČVUT v Praze.
- Wischmeier W. H., Smith D. D., 1965: *Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland east Rocky Mountains*. Agricultural Handbook 282, Agric. Research Service, US Department of Agriculture.

Internetové odkazy:

- http://storm.fsv.cvut.cz/smoderp/
- http://fzp.czu.cz/vyzkum/programs/des_rain/
- http://geo.kuleuven.be/geography/modelling/
- http://geoportal.vumop.cz
- http://www.hydrocad.net
- http://www.geognostics.de

VII. Seznam publikací, které předcházely metodice

Praktická aplikace matematických simulačních modelů je poměrně novou disciplínou, takže před sestavením této metodiky podobně orientovaná souhrnná ubikace v podmínkách ČR ani Evropy nebyla k dispozici. Aplikace matematických simulačních modelů jak v ČR, tak v ostatních srovnatelných zemích spadá spíše do oblasti vědy a výzkumu, případně testování. Tam, kde má aplikace modelů jistou tradici, orientuje se tato na praktické využití jediného nástroje – v USA RUSLE, v Sasku (SRN) model EROSION 3D, apod.

Souhrnná publikace, doporučující, resp. diskutující možnosti a přinášející praktické rady a návody pro využití matematických modelů průřezem napříč měřítky dosud neexistovala. Určité do jisté míry porovnatelné informace, zdaleka ale nedosahující podrobnosti a komplexnosti uvedené v této Metodice přinášely pro podmínky ČR snad jen metodiky Ochrana zemědělské půdy před erozí, kde jsou všechny diskutované metody a nástroje alespoň krátce představeny.

V rámci řešení projektu publikoval řešitelský kolektiv následující publikace, z nich pak vycházel při finálním zpracování Metodiky:

- Janeček, M. - Kadlec, V. - Kovář, P. - Dostál, T. - Krása, J. - et al.: *Způsoby navrhování technických protierozních opatření - dílčí zpráva*. [Výzkumná zpráva]. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2009. 1. 100 s.
- Krása, J.: Soil erosion modelling in the Czech Republic. [Nepublikovaná přednáška]. BOKU Vienna. 2009-11-12.
- Dostál, T.: Mapa technických protierozních opatření v povodí Kouby. [Specializovaná mapa s odborným obsahem (do RIV)]. 2010.
- Dostál, T. - Dvořáková, T. - Krása, J. - Vrána, K. - Kadlec, V. - et al.: Technická protierozní opatření - inventarizace, funkce a způsoby navrhování. In *Konference Krajinné inženýrství 2010*. Pardubice: Česká společnost krajinných inženýrů - ČSSI, 2010, s. 151-157. ISBN 978-80-903258-9-0.
- Dostál, T.: Soil erosion and sediment transpor assessment. [Unpublished Lecture]. TU Bergakademie Freiberg. 2011-05-04.
- Dostál, T. - Krása, J. - Devátý, J.: Application of GIS based tools for soil erosion control measures in large areas. In *Innovative Strategies and Policies for Soil Conservation - 6th internartional congress of ESSC*. Athens: National Agricultural Research Foundation, 2011, p. 32. ISBN 978-960-88296-9-5.
- Dostál, T. - Krása, J. - Devátý, J. - Kavka, P.: Testování datových zdrojů a výpočetních metod pro posouzení erozní ohroženosti a navrhování technických protierozních opatření v různých měřítcích. In *Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství*. Brno: nadace Partnerství, o.p.s., 2011, s. 50-59. ISBN 978-80-7375-590-4.
- Dostál, T. (poř.) - Krása, J. (poř.) - Vokurka, A. (poř.) - Koudelka, P. (poř.): Navrhování technických protierozních opatření. [Pořádání workshopu]. 2011.

- Dostál, T. - Krása, J. - Vrána, K. - Kavka, P. - Devátý, J.: *Optimalizace postupu navrhování technických protierozních opatření*. [Výzkumná zpráva]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2011. 3. 145 s.
- Kavka, P. - Dostál, T.: Testování využitelnosti nástrojů GIS pro tvorbu charakteristických profilů jako podkladu pro modely srážko-odtokových vztahů a erozních procesů. In *Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství*. Brno: nadace Partnerství, o.p.s., 2011, s. od: 1-do: 2. ISBN 978-80-7375-590-4.
- Krása, J. - Dostál, T.: Metody navrhování protierozních opatření pro různá měřítka území. In *Navrhování technických protierozních opatření*. Pardubice: Česká společnost krajinných inženýrů - ČSSI, 2011, s. 1-10.
- Dostál, T.: GIS assisted assessment of soil erosion hazard. [Unpublished Lecture]. TU Bergakademie Freiberg. 2012-06-23.
- Dostál, T. - Krása, J.: Nový pohled na definici přípustné ztráty půdy. In *Konference krajinné inženýrství 2012*. Praha: Česká společnost krajinných inženýrů - ČSKI, 2012, s. 164-169. ISBN 978-80-87384-03-9.
- Dostál, T. - Krása, J. - Vrána, K. - Kavka, P. - Devátý, J. - et al.: *Optimalizace postupu navrhování technických protierozních opatření*. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného hospodářství, 2012. 4. 92 s.
- Janeček, M. - Kovář, P. - Kubátová, E. - Kudrnáčová, M. - Procházková, E. - et al.: Ochrana zemědělské půdy před erozí. [Uplatněná certifikovaná metodika (do RIV)]. 2012.
- Kavka, P.: Využití modelu SMODERP pro navrhování TPEO. In *Voda a krajina 2012*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2012, s. 127-134. ISBN 978-80-01-05107-8.
- Kavka, P. - Vrána, K. - Dostál, T.: Predikce erozního ohrožení a návrh protierozních opatření v modelu SMODERP. In *IX. International Scientific Conference FCE TUKE*. Košice: Technical University of Kosice, 2012, . ISBN 978-80-553-0904-0.
- Kavka, P. - Vrána, K. - Dostál, T.: Soil erosion model SMODERP. In *Geophysical Research Abstracts, Volume 14, (Memory stick)*. Katlenburg-Lindau: Copernicus GmbH, 2012, p. 1. ISSN 1607-7962.
- Krása, J. - Janotová, B. - Bauer, M. - Dostál, T.: Zdroje splavenin v povodí vodních útvarů stojatých vod, možnosti jejich kvantifikace a návrhu ochranných opatření. In *Vodní toky 2012*. Kostelec nad Černými Lesy: Lesnická práce, 2012, díl 1, s. 162-167. ISBN 978-80-7458-029-1.
- Zumr, D. - Dostál, T. - David, V. - Devátý, J. - Koudelka, P. - et al.: Sediment and nutrient transport as a reaction to heavy rainfalls on small agricultural catchment. In *9th International Symposium on Ecohydraulics 2012 Proceedings*. Vienna: Universität für Bodenkultur Wien, 2012, . ISBN 978-3-200-02862-3.
- Zumr, D. - Dostál, T. - Devátý, J. - Krása, J.: Retenční kapacita a srážko odtokové vztahy na zemědělsky využívaném povodí. In *Vodní toky 2012*. Kostelec nad Černými Lesy: Lesnická práce, 2012, díl 1, s. 174-178. ISBN 978-80-7458-029-1.

- Kavka, P. - Devátý, J. - Bauer, M. - Dostál, T. - Krása, J.: Soil erosion modeling in Czech Republic - computer models in various scales. *13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2013, Conference Proceedings*. 2013, p. 669-676. ISSN 1314-2704.
- Dostál T., Devátý J.: Application of E3D model in the CR to design technical soil erosion control measures; *workshop Moeglikeiten modellgestutzter Bodenerosionsermittlung – Anwendung des Modells EROSION 3D*; 13. – 15.3.2013. BGR Berlin; vyzvaná přednáška; 2013
- Dostal T., Devaty J.: Modeling of technical soil-erosion control measures and its impact on soil erosion off-site effects within urban areas; In *European Geoscience Union General Assembly 2013*. 2013
- Devátý, J. - Dostál, T.: Modelování technických protierozních opatření a jejich vlivu na off-site efekty erozní události v intravilánu obce. In Symposium GIS Ostrava 2013 - Geoinformatika pro společnost. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, ISSN 1213-239X.ISBN 978-80-248-2951-7.
- Devátý, J.: Optimalizace postupu navrhování technických protierozních opatřen. In Vodohospodářské fórum 2013 - sborník abstraktů. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013, ISBN 978-80-01-05247-1.

Seznam obrázků a grafů

Obr. 26: Rozdíl v podrobnosti modelů DMR 5G a DTM GEODIS vyjádřený na vrstvě sklonů (nezachycená údolnice křížem pozemku).
Obr. 27: Nezachycené údolnice a nezachycené hrázky na nedostatečně podrobném modelu DTM GEODIS, porovnání s DMR 4G a DMR 5G
Obr. 28: Artefakty vznikající při nesprávné interpolaci DMT z vrstevnic.
Obr. 29: Artefakty ve výškopisném modelu DTM GEODIS (rozlišení 10 m)
Obr. 30: Rozdílná hustota a členitost výškopisného podkladu DMR 5G v rámci jednoho půdního bloku
Obr. 31: Projevy směru obdělávání pozemků ve výškopisu DMR 5G
Obr. 32: Rozdíly mezi údolnicemi dané lokality v závislosti na algoritmu směrování odtoku
Obr. 33: Porovnání celkové výměry ZPF a míry zornění v modelových povodích Bradavy, Pilníkovského potoka a oblasti Hořan u Kutné Hory.
Obr. 34: Počty potřebných TPEO přerušujících povrchový odtok dle výpočtu metodou USLE-GIS v jednotlivých povodích.
Obr. 35: Porovnání neupraveného DMR 5G a výsledku simulace v EROSION-3D v rozlišení 3 x 3 m na kterém je patrné „přetékání“ příkopu způsobené zaplněním bezodtokých míst na návodní straně propustků
Obr. 36: Ukázka časového průběhu srážky dobou opakování 10 let a s dobou trvání 120 minut
Obr. 37: Porovnání různých způsobů simulace záchytných a svodných prvků TPEO. Vlevo je vždy uvedena mapa definice ploch, vpravo pak výsledek simulace pomocí EROSION-3D. Legenda je společná pro všechny ukázky
Obr. 38: Výsledek simulace na povrchu bez úprav DMT – voda vytéká z příkopů v místech křížení s údolnicemi.
Obr. 39: Výsledek simulace po úpravě DMT – příkopy byly pro výpočet uměle zahloubeny a voda neškodně odtéká do uzávěrového profilu
Obr. 40: Umístění měrných profilů do drah soustředěného odtoku odvozených z DMT
Obr. 41: Schéma nástroje pro export charakteristických profilů v prostředí ModelBuilder (Esri – ArcGIS)
Obr. 42: Ukázka výstupů z modelu SMODERP 10 – celkové výsledky – přípustná délka svahu
Obr. 43: Ukázka výstupů z modelu SMODERP 10 – celkové výsledky – odtokové charakteristiky
Obr. 44: DMT s vyznačenou hranicí řešeného území se stálou vodotečí
Obr. 45: Umístění jednotlivých profilů a dráha soustředění odtoku
Obr. 46: Rozdělení půdních druhů podle mapy KPP
Obr. 47: Porovnání srážky s konstantním průběhem srážky a s Truplovým rozdělením.
Obr. 48: Porovnání hydrogramů pro různá rozložení návrhových srážek s a bez zahrnutí doby doběhu
Obr. 49: Charakteristické profily a sběrné příkopy směřující do profilu nádrže (podkladové ortofoto WMS - ČÚZK).
Obr. 50: Výsledné hydrogramy v profilu nádrže pro návrhové srážky s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Bodové hodnoty zobrazují součet maximálních hodnot průtoků jednotlivých profilů, hydrogramy označené „bez“ znázorňují součet jednotlivých hydrogramů bez uvažované doby zdržení v síti odváděních příkopů a hydrogramy označeny „s“ znázorňují vliv posunu kulminace vlivem zdržení v jednotlivých odváděcích prvcích

Seznam Tabulek

Tab. 8: Doporučené zabezpečenosti pro dimenzování základních typů TPEO
Tab. 9: Základní charakteristiky testovacích oblastí a výsledky modelování a analýz
Tab. 10: Hranice zrnitostních tříd používaných v metodice KA4 (AG Boden, 1994)
Tab. 11: Ukázka záznamu časového průběhu průtoku v měrném profilu
Tab. 12: Ukázka zpracovaných hodnot do časového průběhu průtoku v řešeném profilu
Tab. 13: Orientační hodnoty hydraulické vodivosti – převzato z (Váška, 2000)
Tab. 14: Hodnoty kulminačních průtoků a objemů odtoku v profilu suché nádrže pro řešené varianty A, B, C

Seznam použitých symbolů

- A — jednotková zdrojová plocha na vstupu do buňky (m^2 na bm)
- b — sklon buňky (rad)
- C — faktor ochranného účinku vegetace (USLE)
- DMR — Digitální model reliéfu České republiky
- DMT — digitální model terénu
- G_P — přípustná ztráta půdy,
- K — faktor erodovatelnosti půdy (USLE)
- K — nasycená hydraulický vodivost
- L_P — přípustný L faktor univerzální rovnice,
- LS(x,y) — faktor LS pro daný pixel o souřadnicích x, y,
- m — kalibrační parametr (obvykle 0,6),
- n — kalibrační parametr (obvykle 1,3),
- P — faktor technických protierozních opatření (USLE)
- R — faktor erozní účinnosti deště (USLE)
- S — Sorptivita
- t — délka trvání srážky
- TPEO — technická protierozní opatření
- USLE — Univerzální rovnice ztráty půdy
- ZABAGED — Základní báze geografických dat
- Ψt — redukční koeficient pro stanovení návrhové srážky požadované doby trvání z jednodenního srážkového úhrnu