

# Využitie experimentálneho výskumu na náchylnosť vzniku erózie pôdy

Ing. Matúš Tomaščík

## Abstrakt

---

Vodná erózia pôdy patrí medzi najrozšírenejšie degradačné pôdne procesy na svete. Napriek rozsiahlemu výskumu, ktorým sa zaoberá veľké množstvo vedcov, vodná erózia pôdy má popredné miesto medzi globálnymi hrozbami a to predovšetkým pre jej veľmi komplikovaný proces. Vo väčšine prípadov sa vodná erózia pôdy simuluje pomocou matematických modelov, ktoré sa považujú za veľmi užitočné nástroje, pretože terénne merania vyžadujú veľa priestoru a času a v mnohých prípadoch ich nie je možné vôbec vykonávať. Teda kedy je vhodné použiť model skôr fyzikálny, kedy empirický a kedy zase model matematický, tak aby dosiahnuté výsledky zo simulácií vykazovali čo najväčšiu presnosť. Taktiež sa zameriam na dôležitosť vstupných parametrov, vstupujúcich do modelov a samozrejme na samotnú verifikáciu dosiahnutých výsledkov.

**Kľúčové slová:** vodná erózia pôdy, eróžno-transportný model, vstupné parametre, verifikácia

## Abstract

Soil water erosion is one of the most widespread and most damaging processes of degradation in the world. Although that extensive research on it is carried out by a large number of scientists all around the world, it still occupies a leading position among global threats. Because soil erosion is a complex and quite complicated process, small steps have to be undertaken in order to reach any relevant conclusions. In most cases, in order to simulate soil erosion processes, mathematical models are widely used that are considered useful and helpful tools since the measurement of the erosion of terrain consumes time and space and is impossible in many parts of the world. This paper will focus on the correct choice of the type of erosion model. When it is appropriate to use a more physical model, when an empirical model and when a mathematical model, so that they achieve the results of simulations show the greatest possible accuracy. They also focus on the importance of the input parameters entering the models and, of course, on the verification of the achieved results.

**Key words:** water soil erosion, erosion-transport model, input parameters, verification

## 1 Úvod

---

Nielen na Slovensku, ale aj celosvetovo aktuálne pozorujeme vo zvýšenej miere závažný problém, ktorý sa nazýva vodná erózia pôdy. Keďže každým rokom rastie svetová populácia a s ňou spojený väčší záber územia, pochopiteľne rastie aj dopyt po potravinách, s čím je spojený nárast intenzity využívania pôdy a s ňou spojená degradácia pôdy, ktorou sú postihnuté rozvojové, a dokonca už aj vnútrozemské rozvojové krajiny. To znamená, že nielen pôdy určené na poľnohospodárske využitie ale aj pôdy iného charakteru sa začínajú využívať práve pre poľnohospodárske účely. Takto využívaná pôda je potom viac náchylná na prejavy erózie či už vodnej alebo iných druhov erózie. Stanovenie odnosu sedimentov zapríčinený vodnou eróziou pôdy však nie je vôbec jednoduchý proces. Problematikou vodnej erózie a s ňou spojeným odnosom sedimentov sa zaoberajú odborníci nielen na Slovensku, ale aj vo svete. A je prakticky nemožné stanoviť a aplikovať na každý druh pôdy jednotný

postup ako postupovať pri jej ochrane, keďže do tejto problematiky vstupuje mnoho faktorov, ktoré sú pre každý druh pôdy, pôdny profil, iný reliéf, využitie inak charakteristické.

Cieľom tohto príspevku bolo poukázať na možnosti modelovania vodnej erózie pôdy pomocou rozličných typov modelov a taktiež využiť výsledky zo simulátora dažďa ako možnosť parametrizácie epizódneho fyzikálne-založeného modelu EROSION-2D. Získané hodnoty odnosu pôdy zo simulácii v laboratórnych a terénnych meraní slúžili pre analýzu a nastavenie vybraných pôdnych parametrov v modeli EROSION-2D. A po ich úprave boli následne prevzaté aj do modelu EROSION-3D.

## 2 Erózia pôdy

---

Erózia, alebo aj erózia pôdy je reliéfo-tvorný proces, ktorý je starší ako sedimentárnymi horninami tvorené pohoria. Slovo erózia má pôvod v latinčine a vzniklo odvodením zo slova „erodere“ čo v preklade znamená rozrušovať. V najširšom slova-zmysle môžeme proces erózie chápať ako rozrušovanie litosféry (čiže celého zemského povrchu), alebo aj ako rozrušovanie pedosféry (pôdy nachádzajúcej sa na samotnom povrchu litosféry).

Janeček a kol. (2008) uvádza, že v súčasnej dobe sa erózia definuje ako komplexný proces, zahrňujúci rozrušovanie pôdneho povrchu, transportom a sedimentáciou uvoľnených pôdnych častíc pôsobením vody, vetra, ľadu a iných takzvaných erózných činiteľov, medzi ktoré v neposlednom rade patrí aj človek.

### 2.1 Vodná erózia pôdy

Dopad vodnej erózie pôdy na prostredie v ktorom sa takáto forma erózie vyskytla má väčšinou nepriaznivé následky, ktoré častokrát nezostanú iba pri materiálnych škodách, ale môžu zapríčiniť aj straty na životoch. Dopad vodnej erózie pôdy na krajinu je predovšetkým z výdatných dažďov, ktoré zapríčinia rozrušenie pôdy, povrchový odtok, prúdenie vody v pôde, alebo iného faktora spôsobujúceho vodnú eróziu pôdy, dochádza k vymývaniu alebo transportu pôdnych častíc z pôdy. No nielen pôdnych častíc, ale aj častí vegetácie, toxických alebo inak znečistených látok, živín.

Toto všetko môže spôsobiť rôzne formy zosuvov pôdy, odtrhnutie svahov od nepriepustného podložia, stratu dobrej na živiny bohatej pôdy, zanesenie a znečistenie vodných tokov, zdrojov a nádrží, no a napríklad aj znehodnotenie plôch v dosahu prejavu vodnej erózie pôdy (pozemkov, ciest, hospodársky obrábaných území, atď.).

V súčasnosti máme stanovené všeobecné pravidlá, ktoré územia sa podľa sklonu svahu a typu pôdy umožňujú využívať na poľnohospodárske účely. V praxi sa však stretávame s rôznymi praktikami, a aj vplyvom kolektívizácie došlo k scelovaniu území, čo taktiež neprispelo k ochrane pôdy.

Jednou z možností zistiť ohrozenie územia vodnou eróziou, je pomocou fyzikálnych eróznopretransportných modelov, modelov vyššieho stupňa, kde sa dá prekonať mnoho nedostatkov, ktoré vykazujú modely empirické. Preto sa výsledky z takýchto modelov považujú za výsledky vyššej úrovne a dá sa s nimi podstatne lepšie pracovať. Následne dôležitým aspektom je protierózna ochrana a protierózne opatrenia

## 3 Modelovanie vodnej erózie

---

Modelovaniu, vývoju a aplikácií hydrologických modelov sa vedci venujú už veľmi dlhú dobu. Svedčia o tom dôkazy, podľa ktorých korene hydrologického modelovania sú už niekde v starovekom grécku. Najprv však šlo len o modely empirického charakteru, kde prioritou bolo napríklad zistiť príčinu tvorby povodní, alebo koľko vody im z územia odtečie, pritečie či koľko vody vedľa zadržať v

rôznych jednoduchých nádržiach. Postupom času a s množstvom nadobudnutých poznatkov sa však aj v tejto vednej disciplíne robili veľké pokroky.

## Využitie modelov pri protieróznej ochrane

Predovšetkým si treba uvedomiť závažnosť, mierku problému a následne zvoliť taký model, vďaka ktorému vieme s určitosťou dosiahnuť čo najrelevantnejšie výsledky. Rozdelenie modelov (Obr. 3.1) do kategórií uviedol v jednej zo svojich prác napríklad aj Kavka (2011).

	Řešení problematiky	Prostorové dělení	Epizodní/Kontinuální	Velikost území (km <sup>2</sup> )	Ztráta půdy	Transport půdy/látek	Objem odtoku	Maximální průtok	Použité metody
AGNPS	Empirický		K	G/R	A		N	N	RUSLE
EROSION 2D	Fyzikálně založený	P	E	R	A	A	A	N?	Vlastní odvození
EROSION 3D	Fyzikálně založený	P	E	R	A	A	A	N?	Vlastní odvození
WEPP	Fyzikálně založený	P	E/K	R/L	A	A	A	N	Kombinace
USLE/RUSLE	Empirický		K	G/R	A	N	N	N	Vlastní odvození
MUSLE	Empirický		E	R/L	A	N	N	N	USLE
WATEM/SEDEM	Empirický	P		G/R	A	A	N	N	RUSLE, poměr odnosu
DesQ/MaxQ	Kombinovaný přístup	C	E	L	N	N	A	A	CN Křivky, RUSLE
SMODERP	Fyzikálně založený	D	E	L	N	N	A	A	Vlastní odvození
SWAT	Fyzikálně založený	P	K	G/R	A	A	A	N	CREAMS, SCS, USLE, MUSLE

Obr. 3.1 – Rozdelenie erózných modelov podľa využitia (zdroj: Kavka, 2011). C – celistvý, D – delený, E – epizodný, G – globálny, K – kontinuálny, L – Lokálny, R – regionálny, A – áno, N – nie).

Pre návrh protieróznych opatrení na ochranu pozemkov alebo konkrétnych malých území a ich bezprostredného okolia potrebujeme vedieť ich návrhové hydrologické charakteristiky, ktoré by mali vychádzať z návrhových zrážok v prislúchajúcom stupni ochrany (Kavka, 2011).

Pri modelovaní v malých, lokálnych povodiach napríklad ak sa jedná o posudzovanie vplyvu agrotechnických či organizačných protieróznych opatrení používame skôr univerzálnu rovnicu straty pôdy USLE (Wischmeier, Smith, 1978), alebo napríklad aj matematický, fyzikálne založený erózný model EROSION-3D.

Modelovanie v strednej či veľkej mierke, teda v kontinuálnej a globálnej si taktiež vyžaduje použitie modelov na to stavaných. Podobne ako pri modelovaní v malých mierkach sa dá aj pri modelovaní v stredných mierkach využiť model EROSION-3D a pri modelovaní v globálnych mierkach zasa univerzálna rovnica straty pôdy USLE a to práve kvôli tomu, že je univerzálna.

Jedným z hlavným rozdielom medzi empirickými a fyzikálne založenými modelmi je vo veľkosti riešeného územia (empirické modely používame pre riešenie väčších území), taktiež v náročnosti požiadaviek na vstupné údaje, náročnosti použitia a v neposlednom rade aj v presnosti vypočítaných výsledkov. Keďže väčšina empirických modelov, ich použitie je nakalibrované pre konkrétnu oblasť, potom ich použitie pre iné oblasti je obmedzené. A keďže zanedbávajú heterogenitu prostredia, tak

výsledky v oblasti pre ktorú sú nakalibrované taktiež nie sú až tak presné ako keby sme použili fyzikálne založené modely.

Z toho vyplýva, že pokiaľ je to možné tak pre vyhodnotenie odnosu sedimentov, či eróznej činnosti používame skôr fyzikálne založené modely. No treba si uvedomiť, že náročnosť vstupných údajov a aj samotného používania takéhoto modelu je oproti empirickým modelom niekoľko násobne obťažnejšia.

## 4 Výsledky práce

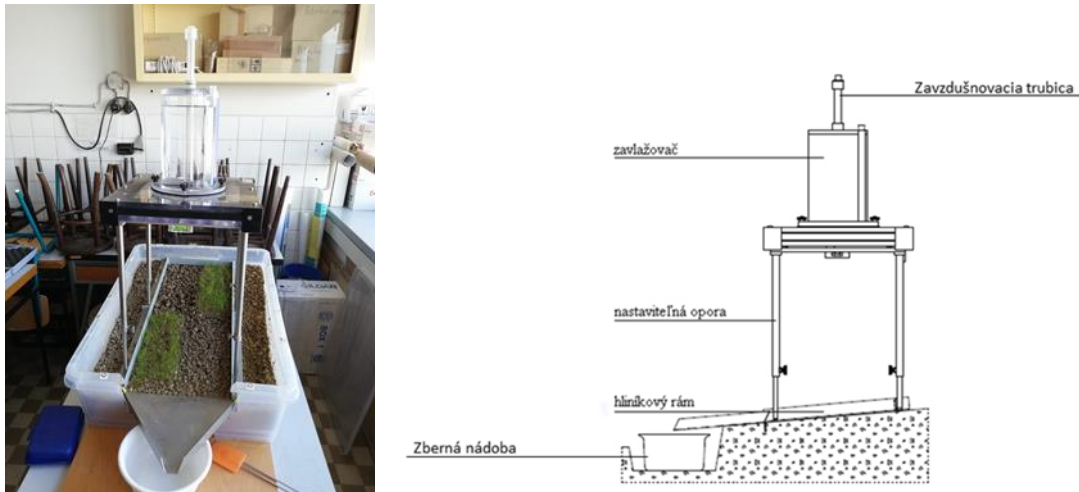
### Empirické modelovanie – univerzálna rovnica straty pôdy USLE

Medzi najrozšírenejšie spôsoby modelovania vodnej erózie pôdy patria práve empirické modely, rovnice ako je napríklad univerzálna rovnica straty pôdy USLE – Universal Soil Loss Equation (Wischmeier, Smith, 1978), ale aj jej modifikované verzie (napr. USPED, RUSLE) a iné (Obr. 3.1). Pomocou týchto empirických rovníc, modelov vieme stanoviť mieru vodnej erózie pôdy, ale aj napríklad rôzne protierózne opatrenia.

### Fyzikálne modelovanie – laboratórny experiment

V praxi sa často používajú na modelovanie vodnej erózie pôdy fyzikálne modely – konkrétne v tomto prípade fyzikálny model – malý simulátor dažďa od firmy Eijkelkamp (Obr. 4.1).

Malý, prenosný simulátor dažďa (fyzikálny model) vieme použiť rovnako v laboratórnych, ako aj v terénnych podmienkach, čo bude ukázané v nasledujúcej časti príspevku.



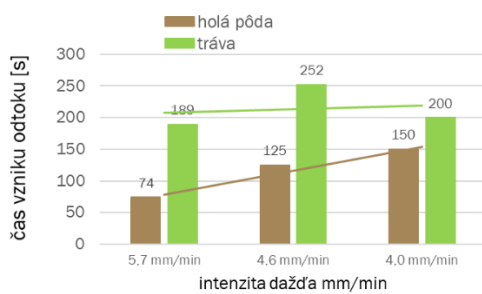
Obr. 4.1 – Dažďový simulátor od firmy Eijkelkamp.

Laboratórna časť, resp. využitie simulátora dažďa pri laboratórnych experimentoch, bola zameraná najprv na zisťovanie vplyvu sklonu svahu na povrchový odtok z pôdy a potom aj na vplyv intenzity dažďa na povrchový odtok z pôdy.

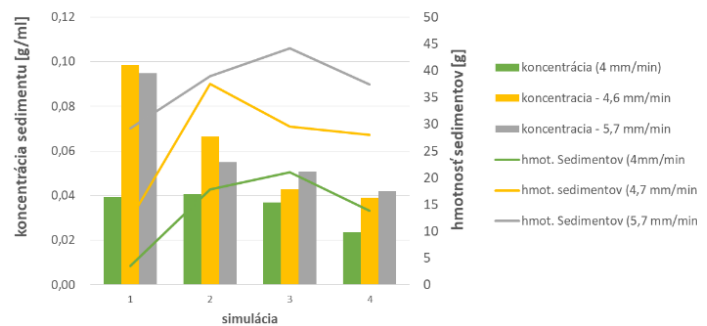
Pri týchto laboratórnych experimentoch bol pomocou simulátora dažďa vždy simulovaný 12-minútový prerušovaný dažď. Prerušovaný bol 3-krát, čiže boli vykonávané 4 série zadaždenia po 3 minúty v rámci jedného 12-minútového dažďa. Toto prerušovanie bolo vykonávané z dôvodu doplnenia potrebného objemu vody do zásobníka tohto simulátora, ktorý pojme len vymedzené množstvo vody.

Pri týchto prerušeníach boli vždy sledované a zaznamenávané dôležité parametre, ktoré slúžili ako prostriedky pre vyhodnotenie týchto experimentov. Konkrétne to bola vlhkosť pôdy pred aj po jednotlivých zadaždeniach a tiež jej nárast v rámci celého zadaždenia, množstvo (objem) zachytenej vody, množstvo (hmotnosť) zachyteného sedimentu, taktiež čas pri ktorom sa začal tvoriť samotný povrchový odtok z pôdy. Pri jednotlivých experimentoch bol sledovaný tento čas aj pri pôde ktorá mala z jednej polovice vegetačný pokryv. Tieto dáta boli tiež následné porovnávané a vyhodnocované (Obr. 4.2, Tab. 4.1). Na základe množstva zachyteného povrchového odtoku sme vedeli tiež stanoviť mieru infiltrácie, teda vsaku vody do pôdy.

Na obrázkoch 4.2 a 4.3 sú výsledky z laboratórneho experimentu, kde sme na vzorke pôdy použili 12-minútový prerušovaný dážď v rôznych intenzitách (4,6 – 5,7 mm/min). Zadažďovacia plocha bola z polovice zatravnená a z polovice holá pôda. V prvom meraní (s intenzitou 5,5 mm/min) sa na holej pôde začal tvoriť povrchový odtok už 105 sekunde, kdežto na zatravnenej časti až v 210 sekunde. V druhom meraní bola zvýšená intenzita na 5,7 mm/min a taktiež ako aj pri prvom meraní sme dokázali, že povrchový odtok zo zatravnenej časti (189 sekúnd) sa začal neskôr a v menšom množstve ako povrchový odtok z holej pôdy (74 sekúnd). V treťom meraní sme nastavili intenzitu na 4,6 mm/min a aj v tomto rípade podobne ako pri prvých dvoch meraniach sa povrchový odtok zo zatravnenej časti začal tvoriť neskôr (252 sekúnd) ako povrchový odtok z holej pôdy (125 sekúnd), (podrobnejšie Tomaščík 2019).



Obr. 4.2 – Čas vzniku povrchového odtoku z holej pôdy (úhoru) a zo zatravnenej časti zo skúmanej pôdnej vzorky.



Obr. 4.3 – Hmotnostná koncentrácia sedimentu v nameranej vzorke množstva povrchového odtoku pri jednotlivých intenzitách.

Tab. 4.1 – 12-minútový prerušovaný dážď – porovnanie

Intenzita dažďa [mm/min]	Čas tvorby odtoku [s]	Objem povrchového odtoku [ml]	Hmotnosť sedimentov [g]
5,7	74 (*189)	2777	149,8
4,6	125 (*252)	2100	107,8
4,0	150 (*200)	1690	56,2

Pozn. \* zo zatravnenej časti svahu

Samotné výsledky z experimentálneho laboratórneho merania potvrdili a preukázali, že sklon, intenzita, počiatočná vlhkosť pôdy a aj vplyv vegetačného pokryvu, majú významný vplyv na množstvo povrchového odtoku z pôdy s čím je spojená aj infiltračná schopnosť pôdy a v neposlednom rade aj hmotnosť odneseného sedimentu (Danáčová a kol., 2016). Zatrávenie svahu napríklad v mestách alebo obciach nám môže pomôcť pri rôznych problémoch s vodnou eróziou alebo odtokom vody zo svahu. Pre prax je dôležité, aké množstvo vody otečie po povrchu z danej zrážky, teda aká je vsakovacia/infiltračná schopnosť povrchu pôdy.

Výsledky experimentu tiež potvrdili, že čím bola vyššia intenzita umelého prerušovaného dažďa, tým bol vyšší povrchový odtok, množstvo sedimentov a kratšia doba vzniku povrchového odtoku.

### **Fyzikálne modelovanie – terénne merania**

Experimenty s dažďovým simulátorom boli vykonané pri laboratórnych podmienkach, ale aj priamo v teréne. Danáčová a kol. (2017) simulovali umelý dážď v prostredí mestských lesov Bratislavy, pre lepšie pochopenie tvorby povrchového odtoku aj na lesných pôdach. Pretože z pohľadu vodného hospodárstva a hydrológie sa na les pozerá skôr ako na regulátor, ktorý limituje množstvo vody v krajine, kedy korene stromov, samotná pôda či opadanka podporujú infiltračnú schopnosť pôdy počas dažďa.

Taktiež boli merania vykonávané na západnom Slovensku v Myjavskej pahorkatine, presnejšie na svahu v katastri mesta Myjava – Turá Lúka. Simulácie sa vykonávali od roku 2017 do roku 2020. V rámci týchto rokov boli simulácie vykonávané vo viacerých ročných obdobiach za rôznych podmienok (počiatočná vlhkosť, sklony, plodiny (Obr. 4.4) (podrobnejšie vid' Hlavčová a kol. 2019). Ako aj pri terénnych simuláciách v prostredí Bratislavských mestských lesov, tak aj pri simuláciách na poľnohospodársky využívanom svahu na Myjave bol použitý malý dažďový simulátor od firmy Ejkelkamp. Tento malý simulátor dažďa vie vyprodukovať naozaj presné výsledky, no je dôležité uviesť, že pre ich presnosť a taktiež elimináciu chýb z merania je potrebné veľké množstvo simulácií. Zdá sa teda, že použitie tohto simulátora v laboratóriu tou lepšou možnosťou. Na druhej strane však je tiež fakt, že v laboratóriu síce vieme zamedziť neželaným vonkajším vplyvom ako je napríklad vietor, kolísajúca teplota alebo vlhkosť. No skúmať v laboratóriu neporušenú vzorku pôdy (v rámci možnosti), nie je vždy možné a preto treba byť s prezentáciou a použitím získaných výsledkov opatrný.





*Obr. 4.4 – Svah v katastri obce Turá Lúka, kde boli vykonávané terénne merania pomocou dažďového simulátora.*

Simulácie dažďovým simulátorom či už laboratórneho alebo terénneho charakteru vieme využiť nielen na priame stanovenie povrchového odtoku z pôdy, zachytenie erodovaného sedimentu, či sledovanie infiltračnej schopnosti pôdy. No po dôkladnom otestovaní variant môžu byť tiež vhodným podkladom pre odvodenie parametrov do hydrologických modelov tvorby a formovania odtoku na svahu, ako aj pre ich validáciu (Danáčová a kol., 2016).

### **Matematické modelovanie pomocou fyzikálne-založených erózných modelov EROSION-2D a EROSION-3D**

V roku 1991 na Katedre Geografie Univerzity Freie v Berlíne bol vyvinutý teoretický koncept, ktorý je aplikovaný v EROSION-2D modeli. Pomocou fyzikálne založeného modelu EROSION-2D, simulujeme eróziu pôdy vyvolanú zrážkovou udalosťou bez obmedzenia na svahoch rôznych dĺžok. V roku 1995 bol práve na základe konceptu EROSION-2D koncipovaný EROSION-3D model, ktorý koncipoval v roku 2006 Michael von Werner.

Pri EROSION-2D je parametrom reliéfu pozdĺžny profil, čiže simuláciu erózie pôdy a povrchového odtoku môže reprezentovať svah rozdelený na homogénne úseky. Pri EROSION-3D modeli to je zase plocha daného povodia, ktorá je delená pravidelnou štvorcovou sieťou. Hlavným rozdielom medzi týmito dvoma modelmi je teda priestorová interpretácia, k čomu nám napovedajú už samotné názvy modelov zakončené označením 2D a 3D. Oba modely boli koncipované pre podmienky v strednej Európe a taktiež majú rovnaký teoretický základ. Oba fyzikálne založené modely EROSION-2D/3D sú vhodné pre získanie relevantných výsledkov pre špecificky zadané úlohy a požadovanú presnosť výsledkov.

Model EROSION-2D/EROSION-3D nie je náročný na počet vstupných údajov, ale obťažnosť získavania niektorých pôdných parametrov je náročná. Jednou z možností je priamo použiť katalóg parametrov (Tab. 4.2 je ukážka časti katalógu pre daný typ pôdy). Alebo možnosť, ktorú sme sa pokúsili v využiť, je kalibrácia vybraných pôdných parametrov na základe výsledkov zo simulátora dažďa, priamo pre dané udalosti a ich následná verifikácia.

*Tab. 4.2 – Rozsah špecifických vstupných parametrov modelu EROSION-2D/3D podľa katalógu parametrov, pre pôdny typ nachádzajúci sa v skúmanom území.*

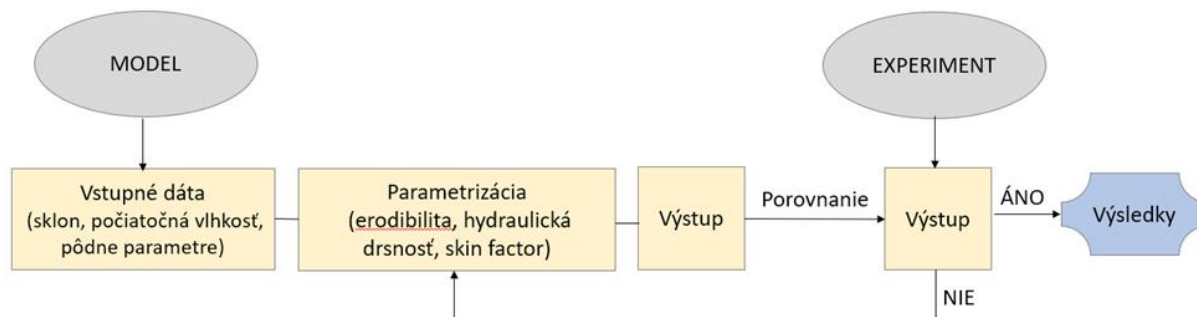
Objemová hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]	Podiel org. uhlíka [%]	Erózna odolnosť (erodibilita) [kg.m.s <sup>-2</sup> ]	Drsnosť (podľa Manninga) [s.m <sup>-1/3</sup> ]	Skin factor [-]	Počiatočná vlhkosť [%]	Pokryv pôdy [%]
920 - 1960	0,8 – 1,9	0,00005 – 0,01	0,006 – 0,900	0,02 - 60	6 - 60	0 - 100

Medzi parametre pôdy, ktoré vstupujú do modelov patrí: objemová hmotnosť (kg/m<sup>3</sup>), obsah organického uhlíka (%), pokrytie povrchu pôdy (%), počiatočná vlhkosť pôdy (%), erózna odolnosť pôdy (erodibilita) (N/m<sup>2</sup>), obsah pôdných častíc (hm. %), opravný koeficient ovplyvňujúci infiltráciu (stav povrchu) (-)

Počiatočné parametre pre prvé simulácie na jednotlivých svahoch bolo nastavené podľa nameraných hodnôt pri zadaďovacom pokuse (sklon, zrážka, stav povrchu, počiatočná vlhkosť pôdy). Ostatné pôdne charakteristiky sa nastavili podľa tabuľkových hodnôt z katalógu parametrov (objemová hmotnosť, erodibilita, obsah organického uhlíka v pôde, drsnosť povrchu a obsah pôdných častíc). Všetky tieto vstupné parametre sa zadali do modelu a spustila sa simulácia. Ak sa výsledné hodnoty sedimentu vypočítaného pomocou EROSION-2D nerovnali hodnotám sedimentu zachyteného zo zadaďovacích pokusov, potom sa pristúpilo ku manuálnej kalibrácii.



Konkrétne boli nastavované hodnoty najprv pre erodibilitu, potom pre hydraulickú drsnosť a nakoniec pre opravný koeficient. Dôvodom výberu bolo, že tieto charakteristiky sú pomerne ťažko merateľné parametre a opravný faktor slúži k zahrnutiu rôznych vplyvov na infiltračnú schopnosť povrchu pôdy (či už vplyvom makropórov, napučaniu ílov a iné). Jednoduchá schéma postupu kalibrácie vybraných pôdných parametrov je na Obr. 4.5.



Obr. 4.5 – schéma postupu kalibrácie.

Modelovaním v eróznom fyzikálne založenom modeli EROSION-3D sme sa demonštroval zase vplyv plodiny v záujmovom území. Parametre získané, upravené a analyzované v EROSION-2D sme preniesli aj do EROSION-3D a to pre stav pôdy bez plodiny a s vybranou plodinou. Na simuláciách bolo ukázané aký je hrozba tvorby povrchového odtoku, odnosu sedimentu a celkovej erózie pôdy. Použitie rozlíšenie DMR bolo s gridom 10x10m. Ako parameter zrážok boli použité návrhové zrážky z klimatologickej stanice Myjava z obdobia 1995-2009. Škálovacou technikou boli spracované údaje za teplý polrok. Išlo o tabuľkové úhrny dažďa s trvaním 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240 a 1440 minút pre dobu opakovania 2, 5, 10, 20, 50 a 100 rokov.

Čo sa týka zadažďovacích experimentov, samotných dažďov, či už v laboratóriu alebo v teréne, tak prevažne boli zadažďovania „spúšťané“ ako 12-minútové prerušované dažde (4x3 minúty s 10-minútovým prerušením, čiže s celkovým trvaním udalosti 42 minút). Pri terénnych experimentoch bol však používaný aj iný spôsob zadažďovania a to konkrétne 10-minútový neprerušovaný dážď (čiže 1x10 minút bez potreby prerušenia). Tento typ zadažďovania sa použil práve z dôvodu pokusu bližšieho priblíženia sa skutočným vonkajším podmienkam prevládajúcim v príslušnom ročnom období.

### EROSION-2D – výsledky

V nasledujúcich tabuľkách a grafoch je zobrazený postup kalibrácie (Tab. 4.3), postup verifikácie a taktiež tabelárne (Tab. 4.4) a graficky (Obr. 4.6) zobrazené výsledky verifikácie zo simulácií v eróznom modeli EROSION-2D.

Tab. 4.3 – Súhrn zo simulácií zrážok v EROSION-2D (prepočítané na plochu 1m<sup>2</sup>), umelé zrážky s trvaním 10 minút (bez prerušenia - pre prvé dva dažde), umelé zrážky s trvaním 12 minút (4 samostatné zrážky – druhé dva dažde).

Experiment Č.	Schéma	Počiatočná vlhkosť [%]	Erozna odolnosť (erodibilita) [kg.m.s <sup>-2</sup> ]	Drsnosť (podľa Manninga) [s.m <sup>-1/3</sup> ]	Skin factor [-]	Množstvo sedimentu (EROSION-2D) [kg/m]	Množstvo sedimentu (terénne meranie) [kg/m]
1	A)	37,4	0,0008	0,015	1	0,8809	0,0240
	B)	37,4	0,0008	6,5	1	0,0238	
	C)	37,4	0,028	0,015	1	0,0239	
	D)	37,4	0,0008	0,015	25,5	0,0243	
	E)	37,4	0,0055	0,25	0,9	0,0243	
2	A)	38,6	0,0008	0,015	1	0,9291	0,0142
	B)	38,6	0,0008	10	1	0,0194	
	C)	38,6	0,053	0,015	1	0,0143	
	D)	38,6	0,0008	0,015	30,09	0,0143	
	E)	38,6	0,00695	0,45	0,9	0,0143	
3	A)	25,9	0,0008	0,015	1	1,4064	0,5800
	B)	25,9	0,0008	0,068	1	0,5715	
	C)	25,9	0,00198	0,015	1	0,5685	
	D)	25,9	0,0008	0,015	7,1	0,5690	
	E)	25,9	0,00065	0,1	0,9	0,5733	
4	A)	20,5	0,0008	0,015	1	0,9214	0,3933
	B)	20,5	0,0008	0,06	1	0,4034	
	C)	20,5	0,00182	0,015	1	0,4051	
	D)	20,5	0,0008	0,015	2,65	0,4021	
	E)	20,5	0,001	0,045	0,9	0,3990	

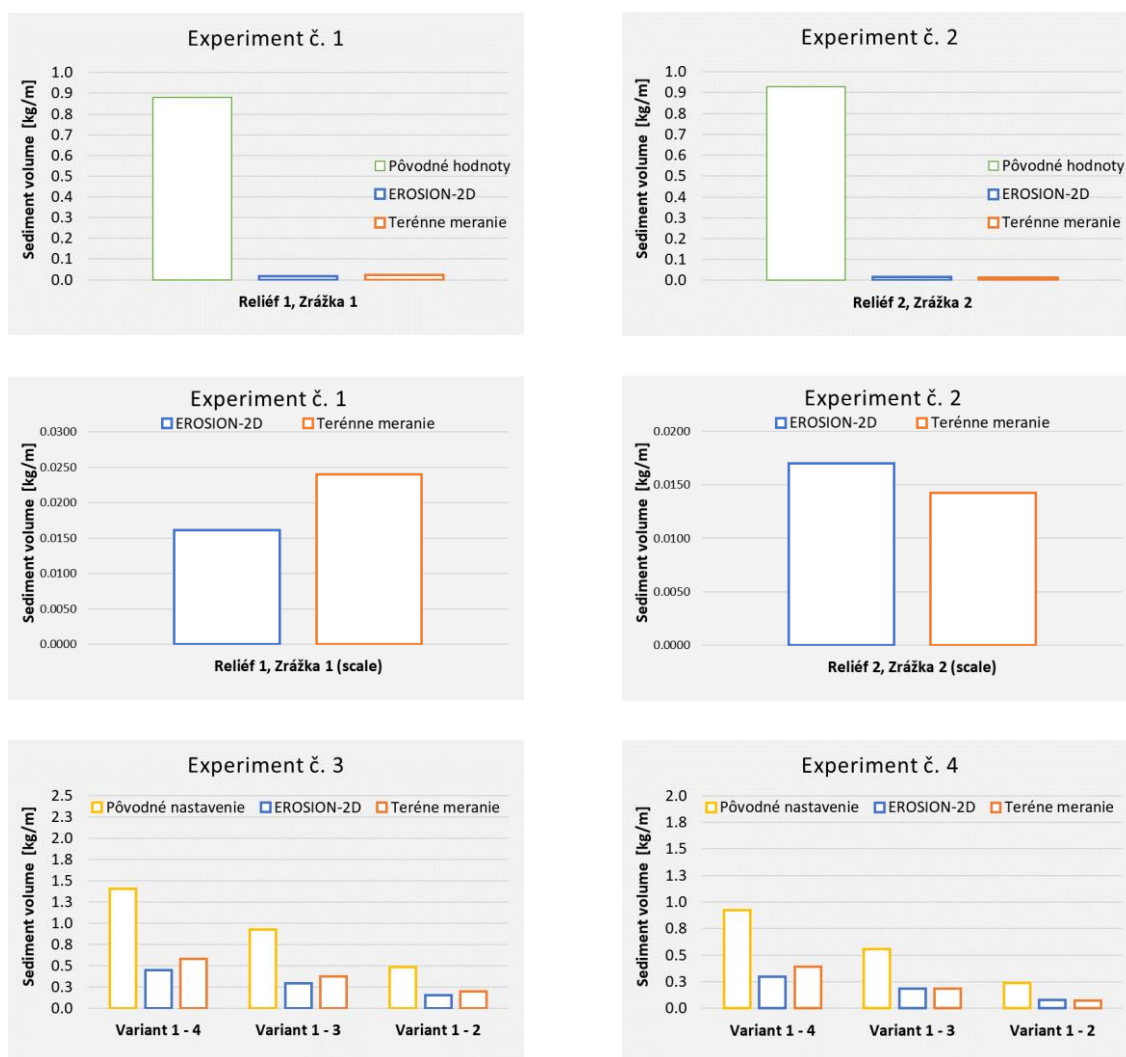
\* Objemová hmotnosť 1500 [kg/m<sup>3</sup>], podiel org. uhlíka 1,5 [%], pokryv pôdy 0-80 [%].

Vstupné parametre pre verifikáciu terénneho merania:

- Skupina 1 (dažde 1,2) - erodibilita 0,0062 [kg.m.s<sup>-2</sup>], drsnosť 0,4 [s.m<sup>-1/3</sup>], pokryv pôdy 55 [%], skin factor 0,9 [-]
- Skupina 2 (dažde 3,4) - erodibilita 0,001 [kg.m.s<sup>-2</sup>], drsnosť 0,073 [s.m<sup>-1/3</sup>], pokryv pôdy 8 [%], Skin factor 0,9 [-]

Tab. 4.4 – Výsledky verifikácie

Exp. Č.	Variant	Celkový čas [min]	Počiatočná vlhkosť [%]	Skupina 1 Množstvo sedimentu [kg/m]	Skupina 2 Množstvo sedimentu [kg/m]	Množ. Sed. (terénne meranie) [kg/m]
1	1	10	37,4	0,0161	-	0,0240
2	1	10	38,6	0,0170	-	0,0142
3	1 - 4	12	25,9	-	0,450	0,580
	1 - 3	9	25,9	-	0,298	0,374
	1 - 2	6	25,9	-	0,158	0,199
4	1 - 4	12	13,2	-	0,299	0,393
	1 - 3	9	13,2	-	0,183	0,187
	1 - 2	6	13,2	-	0,079	0,073



Obr. 4.6 – Objem sedimentu pomocou EROSION-2D modelu a zrážkového simulátora.

### EROSION-3D – výsledky

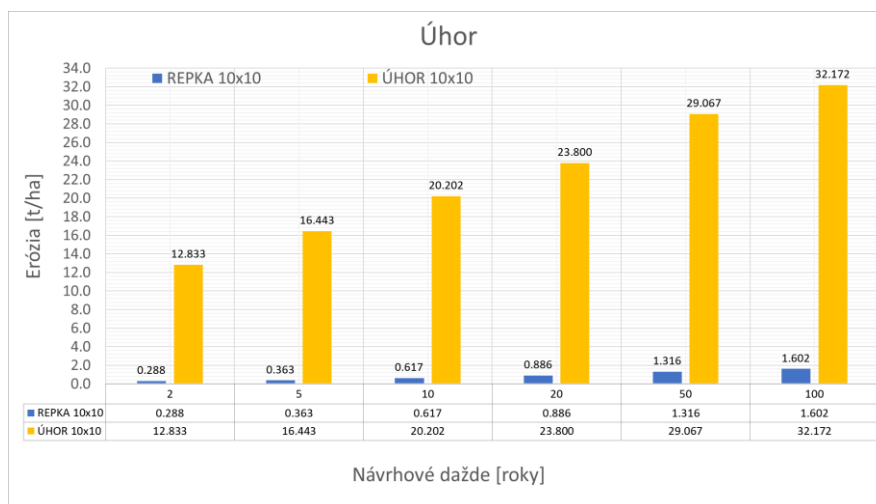
Parametre a výsledky, ktoré sa nakalibrovali a verifikovali v eróznom modeli EROSION-2D sa následne spolu s katalógovými parametrami preniesli aj do EROSION-3D pre stav pôdy s plodinou a bez plodiny.

Tab. 4.5 zobrazuje číselné výsledky, ktoré boli dosiahnuté pri simuláciách v eróznom modeli EROSION-3D vždy pre typ pôdneho pokryvu a pre príslušnú dobu opakovania dažďa (v rokoch).

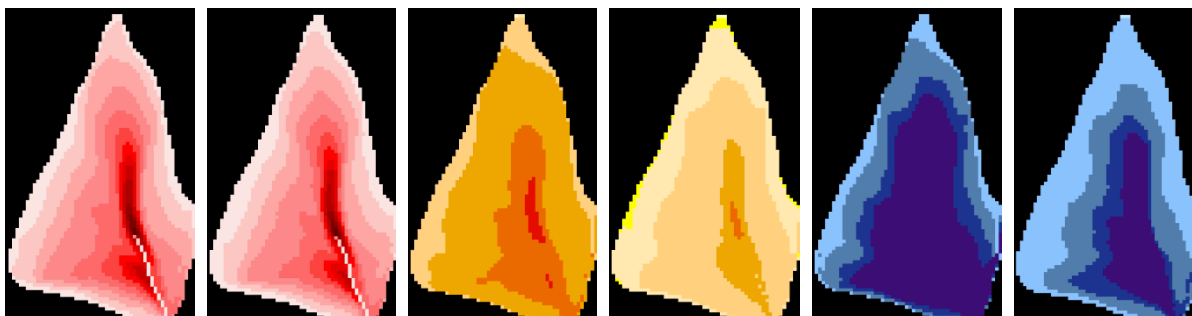
Tab. 4.5 – Tabuľka výsledkov zo simulácií v EROSION-3D.

Roky	Plodina	Objemová hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]	Podiel organického uhlíka [%]	Počiatková vlhkosť [%]	Erózna odolnosť (erodibilita) [kg.m.s <sup>-2</sup> ]	Drsnosť (podľa Manninga) [s.m <sup>-1/3</sup> ]	Opravný koeficient [-]	Pokryv pôdy [%]	Množstvo odneseného sedimentu [kg/m] (prepočítané na 1m <sup>2</sup> )	Net. EROSION [t/ha]
2	Úhor	1800	1,15	35	0,000916	0,0248	0,9	0	51,07	12,833
	Repka	1500	1,5	35	0,0057	0,052	1	45	1,14	0,288
5	Úhor	1800	1,15	35	0,000916	0,0248	0,9	0	65,43	16,443
	Repka	1500	1,5	35	0,0057	0,052	1	45	1,45	0,363
10	Úhor	1800	1,15	35	0,000916	0,0248	0,9	0	80,39	20,202
	Repka	1500	1,5	35	0,0057	0,052	1	45	2,45	0,617
20	Úhor	1800	1,15	35	0,000916	0,0248	0,9	0	94,71	23,800
	Repka	1500	1,5	35	0,0057	0,052	1	45	3,52	0,886
50	Úhor	1800	1,15	35	0,000916	0,0248	0,9	0	115,67	29,067
	Repka	1500	1,5	35	0,0057	0,052	1	45	5,24	1,316
100	Úhor	1800	1,15	35	0,000916	0,0248	0,9	0	1280,26	32,172
	Repka	1500	1,5	35	0,0057	0,052	1	45	6,38	1,602

Obr. 4.7 a 4.8 zobrazujú grafický výstup pre číselné výsledky (Tab. 4.5) zo simulácií v eróznom modeli EROSION-3D. Na Obr. 4.8 sú zobrazené porovnania skúmaného povodia (pre stav pôdy bez a s plodinou) len pre dobu opakovania dažďa 5 rokov.



Obr. 4.7 – Grafické znázornenie miery erózie pri použití repky olejnej ako plodiny s protieróznou schopnosťou a holej pôdy (úhora).



Obr. 4.8 – Graf. výstup z modelu EROSION-3D – (z ľava) miera erózie, odnos sedimentu, povrchový odtok pri úhore a repke olejnej s DMR 10x10m, pri (vybranej) návrhovej 5-ročnej dobe opakovania.

## 5 Záver a diskusia

Simuláciami vo fyzikálne založenom eróznom modeli EROSION-2D bolo preukázané, že pôdne parametre vstupujúce do tohto modelu veľmi citlivo reagujú na eróžno-transportné procesy. Preto je vhodné, aby sa im venovala zvýšená pozornosť (pri ich výbere a nastavení) pre získanie spoľahlivých výsledkov pre danú zrážkovú epizódu, vzhľadom na typ a stav pôdy, územia. V rámci príspevku bol zvolený kombinovaný spôsob, teda výber parametrov z katalógu parametrov, ako aj jeho získanie z laboratórnych a terénnych meraní, ktoré boli porovnávané. Výsledky porovnania boli vo všeobecnosti uspokojivé, ale pre podrobnú analýzu je potrebné väčšie množstvo údajov a podrobnejšia štatistika.

Z výsledkov fyzikálne založenom eróznom modeli EROSION-3D sa dospelo k záverom, že veľmi veľký vplyv na presnosť dosiahnutých výsledkov má aj rozlíšenie digitálneho modelu reliéfu. Potvrďilo sa, že pre veľké územia sa neodporúča používať pre tento model veľmi presné rozlíšenie DEM, vzhľadom na dĺžku výpočtového kroku, náročnosť výpočtovej techniky ako aj samotný výpočet procesov. A podarilo sa taktiež preukázať vplyv použitia plodiny s protieróznymi schopnosťami na množstvo odneseného sedimentu.

Vodná erózia pôdy je celosvetovo veľmi závažný problém degradácie pôdy so stúpajúcim trendom. Kalibráciou parametrov vstupujúcich do erózných modelov ako sú EROSION-2D/3D zvyšujeme svoje šance v „boji“ proti vodnej erózií pôdy, kedy vieme dopredu bezpečne stanoviť mieru erózie a následne navrhnúť vhodné protierózne opatrenia, aby škody nevznikali nie len na životoch a majetku, ale aby tieto škody boli v dostatočnej miere minimalizované.

## Použitá literatúra

---

Danáčová M., Valent P., Výleta R., Hlavčová, K.: The effects of rainfall on surface runoff and soil erosion from forest areas. In SGEM 2017. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Volume 17. Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems : conference proceedings. Vienna, Austria, 27 - 29 November 2017. 1. vyd. Sofia : STEF 92 Technology, 2017, S. 641-648. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-27-0. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85063084077 ; DOI: 10.5593/sgem2017H/33/S14.080.

Danáčová M., Ďurigová M., Maliariková M., Hlavčová K.: Experimentálne merania vzniku povrchového odtoku pomocou simulátora dažďa v laboratórnych podmienkach, Acta Hydrologica Slovaca, Ročník 17, č. 2, 2016, 252 – 259, Bratislava

Hlavčová K., Danáčová M., Kohnová S., Szolgay J., Valent P., Výleta R.: Estimating the effectiveness of crop management on reducing flood risk and sediment transport on hilly agricultural land – A Myjava case study, Slovakia. Catena 172 (2019) 678–690, Bratislava

Janeček M.: Základy erodologie, Česká zemědělská univerzita, 2008, Praha.

Kavka P.: Kalibrace a validace modelu SMODERP: dizertačná práca. Praha : České vysoké učení technické v Praze 2011. s. 128.

Tomaščík M.: Experimentálne meranie tvorby povrchového odtoku, bakalárska práca, 2019, Bratislava, s. 64

Wischmeier W. H. - Smith D. D.: Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning. Science and Education Administration, U.S. Dept. of Agriculture 1978, s. 67.