

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

Ing. Katarzyna Drongová

**PROBLEMATIKA EROZNÍCH A ODTOKOVÝCH
PROCESŮ V DRAHÁCH SOUSTŘEDĚNÉHO
POVRCHOVÉHO ODTOKU**

**THE ISSUE OF EROSION AND RUNOFF PROCESSES
IN CONCENTRATED FLOW PATH**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Vědní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Školitel: doc. Ing. MIROSLAV DUMBROVSKÝ, CSc.

Oponenti:

.....

.....

Datum obhajoby:

Klíčová slova

hluboké efemérní rýhy, vodní eroze, dráhy soustředěného povrchového odtoku

Keywords

ephemeral gully, water erosion, concentrated flow path

Místo uložení práce

Knihovnické informační centrum, Fakulta stavební, Vysoké učení technické
v Brně, Veveří 331/95, Brno

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 STRUČNÝ SOUHRN STÁVAJÍCÍHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
2.1 Druhy vodní eroze	6
2.2 Hluboké efemérní rýhy	6
2.3 Výzkum efemérních rýh.....	9
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
4 METODICKÝ POSTUP A VÝSTUPY	12
4.1 Lokalizace hlubokých efemérních rýh	12
4.2 Metodika zaměření efemérních rýh.....	12
4.3 Popis parametrů a charakteristik vzorku zaměřených rýh.....	14
4.4 Statistická analýza dat.....	15
4.5 Ověření výstupů erozních modelů na základě přímého měření.....	22
4.6 Návrh metodiky pro predikci efemérních rýh.....	25
5 ZÁVĚR	30
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	33
7 PŘÍLOHY	35
7.1 Seznam publikovaných prací	35
7.2 Životopis.....	37
8 ABSTRACT	39

1 ÚVOD

Vlivem zvětšujícího se počtu přívalových srážek s vysokou intenzitou dochází v naší zemědělské krajině k nárůstu škod způsobených vodní erozí půdy. Zemědělská půda je, vzhledem k aktuální poptávce na trhu a současným trendům v zemědělství, častěji využívána pro pěstování širokořádkových plodin, které bez použití vhodných ochranných technologií neposkytují půdě dostatečnou ochranu.

Povrchový odtok působí jako hrozba jak pro konkrétní postižený půdní blok, tak i pro níže ležící zastavěné území, hydrografickou síť atd. Na půdních blocích dochází k odnosu úrodné svrchní vrstvy, která nenávratně mizí a často musí být nahrazována zvýšenou dávkou živin. Erodivaný půdní materiál spolu s povrchovým odtokem způsobuje škody v zastavěném území. Vodou transportované splaveniny často sedimentují v říční síti a vodních nádržích, čímž zmenšují jejich retenční kapacitu a působí problémy spojené s přebytkem živin.

Zákon č. 334/1992 Sb., o ochraně zemědělského půdního fondu nařizuje uživatelům půdy šetrné hospodaření. Pro získání plné výše přímých podpor ovšem zemědělci postačuje dodržování tzv. standardů GAEC. V případě hospodaření v souladu s těmito standardy dochází k částečnému omezení vodní eroze. Toto omezení bývá v současných podmínkách často nedostatečné. Nutností je individuální přístup ke každému ohroženému půdnímu bloku, jenž zajistí korektní návrh adekvátních protierozních opatření.

Jako podklad pro dimenzování protierozních opatření se v současné době používá univerzální rovnice USLE (Wischmeier a Smith, 1978), pomocí které je možné stanovit dlouhodobou průměrnou ztrátu půdy v ploše svahu (plošná eroze) v závislosti na šesti faktorech ovlivňujících hodnotu ztráty půdy. Takto provedená bilance ztráty půdy je však neúplná, neboť odhaduje pouze plošný smyv a není zde zahrnuta např. rýhová eroze.

V drahách soustředěného povrchového odtoku (dále také „DSO“) dochází vlivem výskytu vodní eroze ke vzniku tzv. hlubokých efemérních rýh, které nejsou zohledňovány v bilancích ztrát půdy prováděných dle nyní platných metodik (např. Janeček a kol. (2012)). Potřeba výzkumu hlubokých efemérních rýh a kvantifikace objemu transportovaného materiálu z rýhy vyplývá z faktu, že odnos půdy z efemérních rýh často představuje mnohem větší riziko vzniku škod než eroze plošná. Kromě ztráty způsobené odnosem půdy z rýhy, dochází k tzv. sekundární erozi, která vzniká v ploše půdního bloku s výskytem rýhy. Z širšího okolí rýhy je půda odebírána s cílem zaplnění vzniklé rýhy tak, aby bylo možné půdu v údolnici i nadále zemědělsky využívat.

2 STRUČNÝ SOUHRN STÁVAJÍCÍHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Vznik vodní eroze je obecně zahájen rozrušením povrchu vlivem dopadu dešťových kapek. V první fázi srážkoodtokového procesu má pro erozní proces význam kinetická energie vodních kapek dopadajících na půdu. Je příčinou rozbití půdních agregátů a tím i uvolnění půdních částic, jejich přemístění na krátkou vzdálenost rozstříknutím a zvýšení turbulence povrchového odtoku (Holý, 1978).

V případě, že jsou hydrologické ztráty v povodí (výpar, vsak, retence na povrchu půdy a rostlin) nižší než daná srážka, proces pokračuje nejprve plošným, následně soustředěným povrchovým odtokem. Ten bývá příčinou zahájení pohybu částic půdy. Povrchový odtok vody ze svahu podléhá principům zachování hmoty a zachování hybnosti. Vyplývá z nich rovnice kontinuity a rovnice pohybová (Holý a kol., 1982).

2.1 DRUHY VODNÍ EROZE

Dle Zachara (1982) lze vodní erozi způsobující odnos půdy ze zemědělsky využívaných ploch dělit podle mnoha kritérií, z nichž nejdůležitější pro tuto práci je rozdělení na plošnou a lineární, případně smíšenou erozi.

U plošné (mezirýhové) eroze dochází k rovnoměrnému odnosu půdy z konkrétní části svahu. Jedná se o dvoufázový proces, který se skládá z oddělení jednotlivých částic půdy od celkové půdní masy a jejich posun vlivem dopadu dešťových kapek na povrch půdy. Druhou fází je odnos uvolněných částic půdy vlivem povrchového odtoku (Zachar, 1982).

U lineární eroze hraje prvotní rozrušení půdních částic a jejich posun vlivem dopadu dešťových kapek na povrch půdy pouze podružnou roli. Nejdůležitějším erozním faktorem je soustředěný povrchový odtok vyvolaný srážkovou událostí. Transport oddělených půdních částic je následně taktéž realizován prouděním vody.

Laflen a kol. (1985) dělí lineární erozi na:

- rýhovou erozi;
- erozi v hlubokých efemérních rýhách;
- stržovou erozi.

Tato práce se zabývá výzkumem hlubokých efemérních rýh v podmínkách ČR, proto je v další kapitole popsán pouze tento typ lineární eroze.

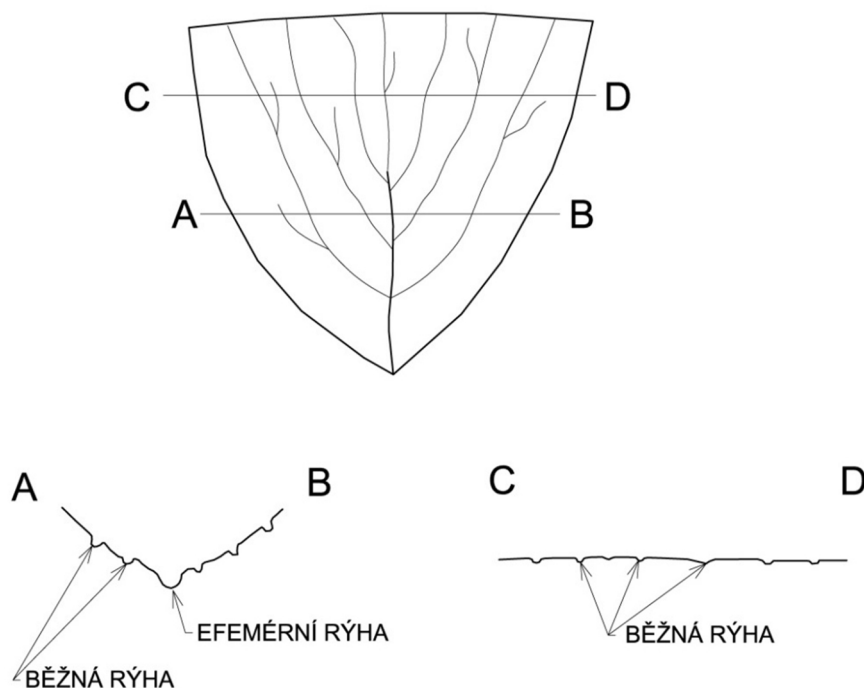
2.2 HLUBOKÉ EFEMÉRNÍ RÝHY

Hluboké efemérní rýhy jsou úkazy vyskytující se v přirozených či uměle vytvořených drahách soustředěného povrchového odtoku a během přívalových dešťů dočasně převádějí povrchový odtok. Objevují se tedy v místech, kde dochází

k soustředování povrchově odtékající vody. Může se jednat o přirozené údolnice, tzv. dráhy soustředěného povrchového odtoku (dále také „DSO“) nebo o místa podél jiných lineárních krajinných prvků, jako jsou hranice pozemků a rýhy vytvořené zemědělskou činností či podél polních cest.

V zahraničí se pro popis hlubokých efemérních rýh používá termín „*ephemeral gully*“ (Vandaele, 1996), který lze doslovně přeložit jako „efemérní (dočasné) strže“. Terminologicky má však v České republice pojem „strž“ poněkud jiný význam. Termín *efemérní* (dočasný, pomíjející, prchavý) je používán proto, že se jedná o dočasné rýhy, které jsou odstraňovány agrotechnickými postupy na konci období výskytu přívalových srážek a dochází k jejich znovuoobjevení na stejném místě v rámci dalšího období erozně nebezpečných dešťů (Laflen a kol., 1985).

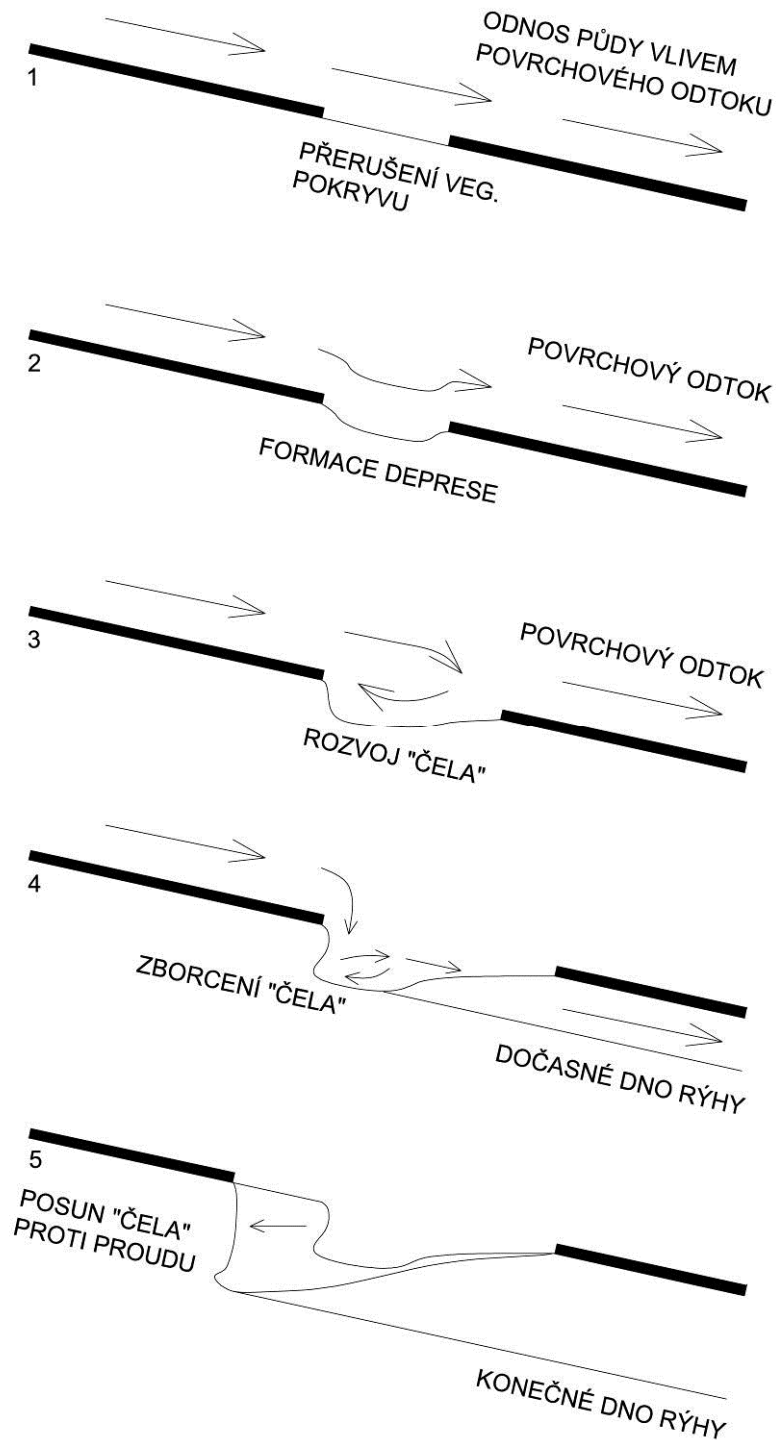
Tyto rýhy mají průřezovou plochu větší než 1 čtvereční stopa (0,093 m²) (Vandaele, 1996). Efemérní rýhy v DSO bývají obvykle větší než běžné rýhy a zároveň menší než permanentní strže. Rozdíl mezi běžnými rýhami a hlubokými efemérními rýhami dokumentuje Obr. 1. Běžné rýhy se na zemědělském pozemku objevují ve větším množství a jejich každoroční výskyt je velmi závislý na konkrétních použitých agrotechnických postupech. Oproti tomu efemérní rýhy se znovuoobjevují na stejných místech – v DSO.



Obr. 1: Znárodnění rozdílů mezi běžnými rýhami a efemérními rýhami (U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service, 1992)

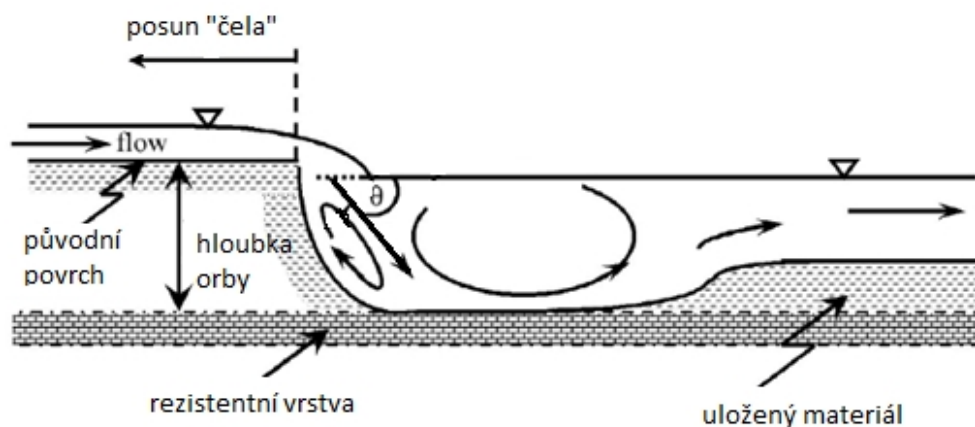
2.2.1 Tvorba a vznik efemérních rýh

Povrchový odtok na svahu probíhá nejprve plošně, postupně však dochází vlivem nerovností půdního povrchu ke koncentraci odtékající vody a plošný odtok se mění v odtok soustředěný (Holý a kol., 1982). Úplný proces vzniku a rozvoje efemérní rýhy tak, jak ho popsál Morgan (2005) je znázorněn na Obr. 2.



Obr. 2: Stádia iniciace rýhy (Morgan, 2005)

V případě soustředění povrchového odtoku se mohou vlivem proudění vody vytvářet (zprvu malé) deprese v místech s nedostatečným půdním pokryvem. Nastává koncentrace vody v těchto depresích a tím i jejich zvětšování. Eroze se začíná tvořit na počátku deprese, kde vznikají téměř svislé stěny („čela“) a projevuje se zde bystrinné proudění. V malé míře dochází k odnosu materiálu z plochy stěny. Mnohem významnějším zdrojem eroze je však dno deprese. Odnosem materiálu ze dna deprese dochází k prohlubování rýhy a „poddolování“ svislé stěny na začátku deprese, čímž dochází k oslabení její stability a finálně zborcení do depresního prostoru. Tím se svislé čelo posouvá dál proti proudu (Morgan, 2005), viz Obr. 3.



Obr. 3: Schéma tvorby svislých stěn v podélném profilu efemérní rýhy (Gordon, 2007)

Ve chvíli, kdy eroze dosáhne hloubky orby, tj. narazí na více rezistentní vrstvu půdy, redukuje se odnos materiálu ze dna rýhy. Dále dochází ke zvětšování šířky rýhy, a to v důsledku eroze bočních stěn rýhy (Morgan, 2005).

2.3 VÝZKUM EFEMÉRNÍCH RÝH

2.3.1 Výzkum v zahraničí

Vandaele (1996), Casalí (2006), De Santisteban a kol. (2006) a další prováděli rozsáhlé výzkumy zabývající se přímým měřením objemu efemérních rýh, tzv. volumetrickou kvantifikací. Cílem výzkumů bylo především stanovit platné vztahy pro predikci výskytu a parametrů hlubokých efemérních rýh. Ověření platnosti nejdůležitějších z těchto vztahů v podmínkách České republiky bylo předmětem této práce a bude diskutováno níže.

Na základě přímého měření efemérních rýh vzniklo v zahraničí několik erozních modelů. Jsou založeny na myšlence, že pozice a velikost rýh je řízena tvorbou koncentrovaného odtoku, který je schopen za dané doby trvání a intenzity vytvořit erozi v příslušné DSO. V modelech je údaj o přispívající ploše často používán jako náhrada údaje o povrchovém odtoku, který není mnohdy znám. Předpokládá se, že

na povodích, kde dominuje Hortonův povrchový odtok, se odtok zvětšuje proporcionálně s plochou povodí (Vandaele, 1996). V zahraniční odborné literatuře jsou nejčastěji citovány modely EGEM, AnnAGNPS, příp. SHETRAN. Zatím nedošlo k ověření platnosti těchto modelů v podmínkách České republiky.

2.3.2 Výzkum v České republice

Pro potřeby Ministerstva zemědělství ČR byla provedená identifikace a zákres nestabilizovaných drah soustředěného odtoku vody z půdních bloků s kulturou orná půda na území celé České republiky v rámci projektu „Vymezení přispívajících ploch nad uzávěrovými profily erozně ohrožených drah odtoku na orné půdě pro potřeby Rámcové směrnice pro vodní politiku 2000/60/ES“ (Ekotoxa, 2011).

Identifikace a zákres nestabilizovaných drah soustředěného odtoku byly provedeny na základě vizuálního vyhodnocení erozních projevů viditelných na ortofotomapách a výpočtu akumulace odtoku vody z území. Bylo provedeno vymezení přispívajících ploch a jejich přiřazení k odpovídajícím drahám odtoku (Ekotoxa, 2011).

Bylo identifikováno přes 33 000 drah soustředěného povrchového odtoku o celkové délce téměř 12 000 km. Průměrně se na každém sedmém pozemku s kulturou orná půda vyskytuje potenciálně erozně ohrožená dráha soustředěného odtoku, každý pátý uživatel půdy má na některém ze svých pozemků potenciálně ohroženou DSO (Ekotoxa, 2011).

Uvedená studie sice lokalizuje erozně ohrožené DSO a podává k nim další doplňující informace (jejich délku, přispívající plochu, druh zaústění, případnou historickou stabilizaci), nezabývá se však bližším výzkumem vzniklých efemérních rýh a tedy ani jejich parametry (šířka, hloubka, objem odnosu půdy, příčinné faktory).

V ČR dosud nebyl proveden podrobný výzkum včetně terénního měření a neexistuje platná metodika pro volumetrickou kvantifikaci vodní eroze vznikající v drahách soustředěného povrchového odtoku, přičemž kvantifikace celkového odnosu půdy z povodí je základním předpokladem korektního návrhu protierozních a protipovodňových opatření v krajině.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce je zaměřena na popis zákonitostí vzniku a dalšího rozvoje hlubokých efemérních rýh vyskytujících se v zemědělské krajině v ČR. Konkrétní cíle disertační práce lze rozdělit do následujících bodů:

- lokalizace hlubokých efemérních rýh na blocích orné půdy;
- tvorba metodiky zaměření lokalizovaných efemérních rýh;
- popis parametrů a charakteristik statisticky významného vzorku zaměřených rýh;
- ověření výstupů erozních modelů na základě parametrů zaměřených efemérních rýh;
- tvorba metodiky pro predikci výskytu a predikci základních parametrů efemérních rýh.

V rámci lokalizace hlubokých efemérních rýh byla provedena analýza výstupů studie „*Vymezení přispívajících ploch nad uzávěrovými profily erozně ohrožených drah odtoku na orné půdě pro potřeby Rámcové směrnice pro vodní politiku 2000/60/ES*“. Na základě těchto výstupů byl proveden terénní průzkum vybraných lokalit a byly určeny rýhy pro zaměření.

Metodika zaměření efemérních rýh je cílena na popis komplexního postupu pro zaměření a automatizované vyhodnocení jednotlivých parametrů zaměřovaných efemérních rýh.

Ověření výstupů erozních modelů na základě parametrů zaměřených efemérních rýh bylo provedeno pro erozní modely EGEM, AnnAGNPS a SHETRAN. Výstupy modelování erozních procesů byly konfrontovány s naměřenými veličinami a byla vyhodnocena použitelnost těchto modelů pro analýzu eroze v hlubokých efemérních rýhách v ČR.

Součástí disertační práce je návrh metodiky pro predikci výskytu a predikci základních parametrů efemérních rýh. Metodický postup je založen na vyhodnocených závislostech mezi parametry rýh (délka, šířka, sklon, objem, aj.) a faktory zapříčiňujícími jejich vznik a rozvoj (morfologie terénu, půdní pokryv, kulminační průtok, aj.).

Výstupy metodiky pro predikci výskytu a predikci základních parametrů efemérních rýh je následně možné využít pro stanovení optimálních protierozních opatření (stabilizace drah soustředěného povrchového odtoku) v podmínkách ČR.

4 METODICKÝ POSTUP A VÝSTUPY

4.1 LOKALIZACE HLUBOKÝCH EFEMÉRNÍCH RÝH

S využitím studie „*Vymezení přispívajících ploch nad uzávěrovými profily erozně ohrožených drah odtoku na orné půdě pro potřeby Rámcové směrnice pro vodní politiku 2000/60/ES*“ (Ekotoxa, 2011) (dále jen „Studie MZe“) a na základě hydrologických analýz dostupných v prostředí ArcMap byl proveden rozsáhlý terénní průzkum, v rámci nějž bylo lokalizováno téměř 150 erozně ohrožených drah soustředěného odtoku. V době průzkumu byly projevy vodní eroze identifikovány u 25 z těchto drah. Ve zbylých případech nebyla eroze patrná, a to z důvodu absence přívalové srážky, která by zasáhla příslušný zemědělský pozemek v době, kdy je půda nejvíce náchylná k erozi a její pokryv (vegetace) neposkytuje dostatečnou ochranu.

4.2 METODIKA ZAMĚŘENÍ EFEMÉRNÍCH RÝH

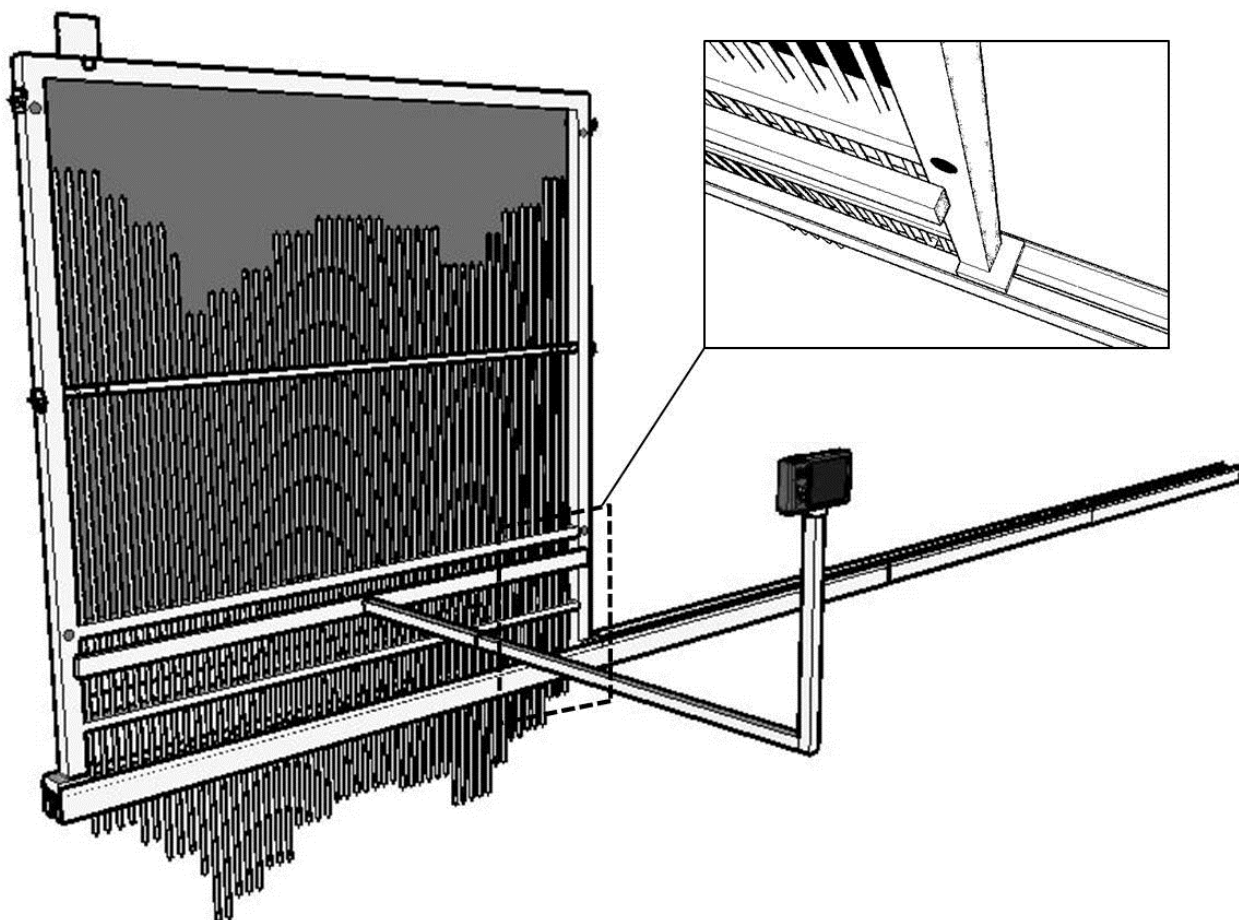
Aby mohla být posuzována škodlivost efemérních rýh, je nutné znát parametry vybraného homogenního vzorku rýh, tj. jejich délku a především jejich objem. Před samotným měřením byla vypracována metodika pro volumetrickou kvantifikaci rýh. Popis kvantifikace se objevuje v řadě zahraničních odborných publikací (např. De Santisteban a kol. (2006) nebo Casalí a kol. (2006)). Autoři popisovali pouze dva přístupy: měření příčných profilů rýhy pomocí měřičského pásma nebo pomocí mechanického zařízení obsahujícího sadu jehel schopných kopírovat terén a tím vyznačit příčný profil měřené rýhy. Z plochy příčných profilů je poté usuzováno na celkový objem rýhy. V rámci vývoje výše uvedené metodiky byly posuzovány i jiné metody pro zaměření rýhy, které by umožňovaly spojitě zaměření celé rýhy a odstranily tím nejistotu způsobenou bodovým měřením příčných profilů. Jako jedno z možných řešení se nabízelo použití lidarů pro pozemní nebo letecké snímkování. Obě metody však byly na základě předchozích terénních průzkumů vyhodnoceny jako nevhodné, a to především vzhledem ke stavu rýh na konci vegetačního období, kdy je měření prováděno. V této době bývá erozí postižený povrch, především v dolní části rýhy, pokryt vegetací, která brání přesnému zaměření.

Na základě výše uvedených úvah bylo rozhodnuto o vývoji mechanického zařízení pro zaměřování příčných profilů rýh. Zařízení bylo navrženo a je dále vyvíjeno na Ústavu vodního hospodářství krajiny FAST, VUT v Brně. Tzv. erodoměr umožňuje pomocí kovových jehlic umístěných v rámu zaměření příčných profilů povrchu půdy. Pro zaměření průběhu terénu ve vybraném zaměřovaném příčném profilu je erodoměr posouván v délkově regulovatelném nosném profilu.

Erodoměr se skládá z hliníkového rámu a souboru sta jehlic, které jsou v rámu umístěny v konstantních vzdálenostech. Po spuštění horní lišty, která je pro přenos

mostu aretovaná u profilu v horní části rámu, jehly okopírují terén. Tento stav je fotograficky zdokumentován za účelem následného vyhodnocení.

V dolní části rámu je umístěn profil pro ukotvení speciálně upraveného stativu s fixní délkou. Na tento stativ je po ustavení erodoměru připevněn fotoaparát. Stativ zajišťuje, že jsou snímky pořizovány ze stále stejné vzdálenosti a polohy vůči erodoměru. Následující obrázek je nákresem erodoměru ve stavu probíhajícího měření (Pavlík, Sobotková, Dumbrovský, Drongová, Uhrová, 2013).



Obr. 4: Nákreš erodoměru (Pavlík, Sobotková, Dumbrovský, Drongová, Uhrová, 2013)

V případě, že konkrétní příčný profil má šířku větší než 1 m, je provedeno více kladů mostu tak, že je tento posouván po nosném profilu, který je délkově regulovatelný. Maximální délka nosného profilu je 4 m. V rámci každého kladu mostu je pořízená fotografie jehel (Drongová, 2013).

Vzdálenosti jednotlivých příčných profilů jsou voleny v závislosti na délce zaměřované rýhy a subjektivním vyhodnocení proměnlivosti příčného profilu rýhy po její délce. Vzhledem k morfologii identifikovaných rýh byly profily zaměřovány po vzdálenostech 10, 20 nebo 30 m. Z fotografií jednotlivých kladů mostu jsou

pomocí softwaru, který určí polohu konců všech jehel, vyhodnoceny tvary příčných profilů a jejich plocha.

Pro výpočet objemu rýhy z ploch jednotlivých příčných profilů byl použit následující vztah:

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{A_{i-1} + A_i}{2} l, \quad (4.1)$$

kde:

- V celkový objem erozní rýhy [m³];
- A_i plocha příčného profilu rýhy [m²];
- A_{i-1} plocha předcházejícího příčného profilu rýhy [m²];
- l vzdálenost mezi jednotlivými příčnými profily [m].

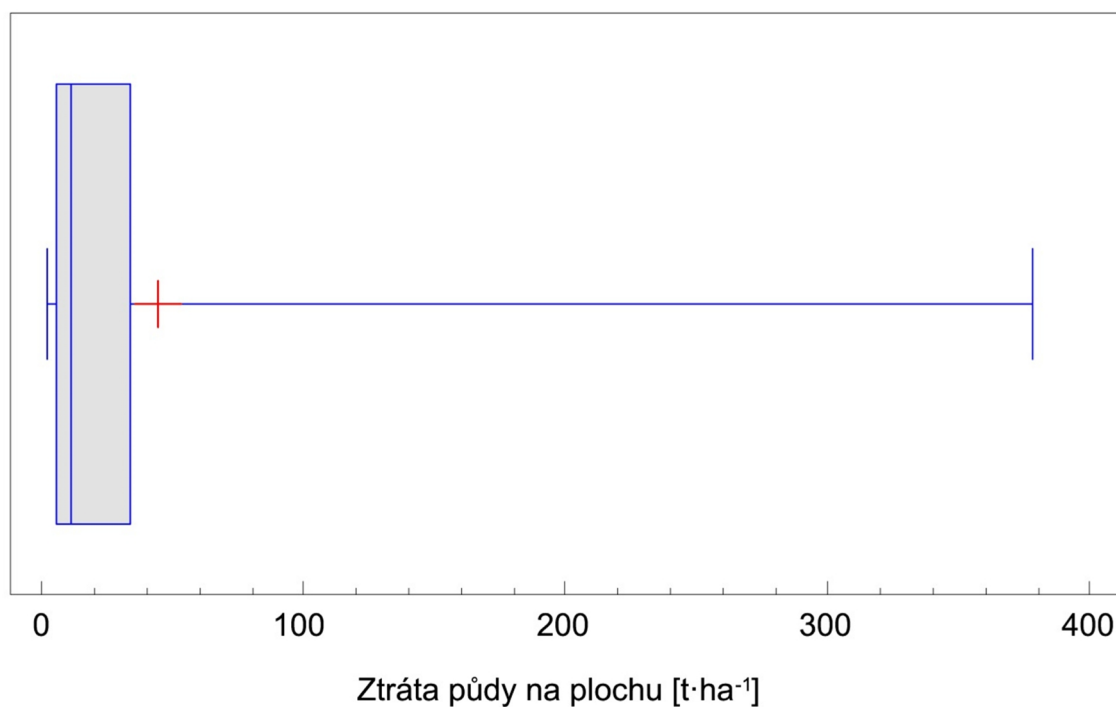
4.3 POPIS PARAMETRŮ A CHARAKTERISTIK VZORKU ZAMĚŘENÝCH RÝH

Pomocí erodoměru došlo během let 2009 až 2012 k zaměření 25 hlubokých efemérních rýh v krajích Olomouckém, Moravskoslezském, Jihomoravském a Vysočina. Níže jsou uvedeny základní statistické charakteristiky vzorku identifikovaných rýh. Délka měřených rýh se pohybovala od 35 m do 1151 m.

Tab. 1: Základní statistické parametry vzorků průměrných rozměrů rýhy

Statistické parametry	Parametry souboru průměrných rozměrů rýhy			
	Délka [m]	Šířka [m]	Hloubka [m]	Objem [m ³]
Průměr	259.6	2.4	0.2	67.9
Směrodatná odchylka	271.7	1.2	0.1	87.8
Minimum	35.0	0.8	0.1	2.6
Maximum	1151.0	5.8	0.4	331.0
Rozptyl	1116.0	5.0	0.3	328.4

Pro představu o závažnosti problému byla zaměřená ztráta půdy přepočtena na přispívající plochu rýhy a bylo zjištěno, že průměrně tato ztráta dosahuje téměř 50 t·ha⁻¹, přičemž maximální přípustný smyv (u hlubokých půd) je stanoven na 10 t·ha⁻¹·rok⁻¹. Tento limit je navíc často dosažen či překročen vlivem mezirýhové (plošné) vodní eroze. Graf 1 znázorňuje vzorek ztráty půdy přepočtené na přispívající plochu rýhy. Ve vybarveném obdélníku je označen medián a interkvartilové rozpětí (25-75 %), další horizontální čáry označují minimální a maximální hodnotu ve vzorku. Zvýrazněný křížek značí střední hodnotu.



Graf 1: Krabicový graf – analýza vzorku měřených ztrát půdy přepočtených na přispívající plochu rýhy

4.4 STATISTICKÁ ANALÝZA DAT

Pomocí moderních metod matematické pravděpodobnosti a statistiky byly provedeny jednorozměrné a vícerozměrné regresní analýzy zkoumající vazby mezi vypočtenými či zaměřenými charakteristikami efemérních rýh a faktory mohoucími mít vliv na vývoj rýh. Na základě výsledků těchto analýz byly vytvořeny regresní modely reprezentující závislost hlavních charakteristik rýh (délka, objem) na ostatních vybraných charakteristikách a byly diskutovány statisticky významné a nevýznamné vazby.

4.4.1 Regresní model z dat „Studie MZe“

Vzorek rýh ze „Studie MZe“ je velmi početný a na jeho základě bylo možné sestavit kvalitní regresní model popisující závislost délky rýhy na skupině 10 nezávisle proměnných, které byly v rámci „Studie MZe“ zkoumány.

Vzhledem k tomu, že některé z nezávisle proměnných mají velmi malý vliv na celek a tudíž jsou nevýznamné, bylo přistoupeno k provedení tzv. krokové regrese (stepwise regression), která umožňuje mezi více nezávislými proměnnými identifikovat ty, které co možná nejlépe vysvětlují zkoumanou závislou veličinu. Byl vybrán tzv. typ "backward" (vzad), kdy jsou postupně po jedné z modelu vyřazovány ty proměnné, které nejsou významné.

Upravený regresní model má pak tvar:

$$Y = 192.111 - 127.913 \cdot X_5 + 482.38 \cdot X_8 - 429.667 \cdot X_9 + 2369.19 \cdot X_{10} \quad (4.2)$$

kde:

Y délka rýhy [m];

X_5 až X_{10} ... nezávisle proměnné – viz Tab. 2 [jednotky viz Tab. 2].

P-hodnota uvedeného regresního modelu je nižší než 0.05 a jedná se o statisticky významný vztah mezi proměnnými při 95.0% spolehlivosti. Data mají přibližně normální rozdělení.

Koeficient determinace R^2 je 0.748 tzn., že model popisuje 74.8% variability Y . Průměrná absolutní chyba odhadu (MAE) je 100.38 m.

Ze vztahu 4.2 je viditelná významnost jednotlivých nezávisle proměnných. Největší vliv na délku rýhy má proměnná X_{10} , tj. velikost přispívající plochy DSO. Významnost jednotlivých proměnných je uvedena v Tab. 2.

Tab. 2: Popis nezávisle proměnných z regresní rovnice (4.2)

Označení nez. proměnné	Význam nezávisle proměnné	Jednotky	Koeficient β	Významnost nez. proměnné [%]
X_5	Váž. průměr hodnoty 1. čísla kódu BPEJ v přisp. ploše DSO (příslušnost ke klimat. regionu)	[-]	127.91	3.8
X_8	Váž. průměr hydrologické skupiny půd vyskytujících se v přisp. ploše DSO	[-]	482.38	14.1
X_9	Váž. průměr čísla CN v přispívající ploše DSO	[-]	429.67	12.6
X_{10}	Velikost přisp. plochy DSO	[ha]	2369.19	69.5

4.4.2 Regresní model – data z přímého měření

Závislost délky rýhy na jiných faktorech – jednorozměrná regresní analýza

V případě měřených rýh bylo k dispozici větší množství nezávisle proměnných než u vzorku ze „Studie MZe“. V rámci přípravy jednorozměrné regresní analýzy byla sestavena množina 32 nezávisle proměnných, které byly podrobeny výzkumu jejich korelace s délkou měřených rýh (závisle proměnnou). Tab. 3 obsahuje seznam nejvlivnějších nezávisle proměnných včetně typu použité regrese a výsledného koeficientu determinace (R^2) jako ukazatele síly lineární (příp. mocinné) závislosti.

Tab. 3: Seznam nejlivnějších nezávisle proměnných seřazených podle velikosti koeficientu determinace

Jednoduchá regrese - závislost délky na jiných faktorech		
Nezávisle proměnná	Typ regrese	R^2
Objem rýhy	mocninný	0.842
Plocha rýhy	mocninný	0.665
Q_{100}	lineární	0.496
CN	lineární	0.430

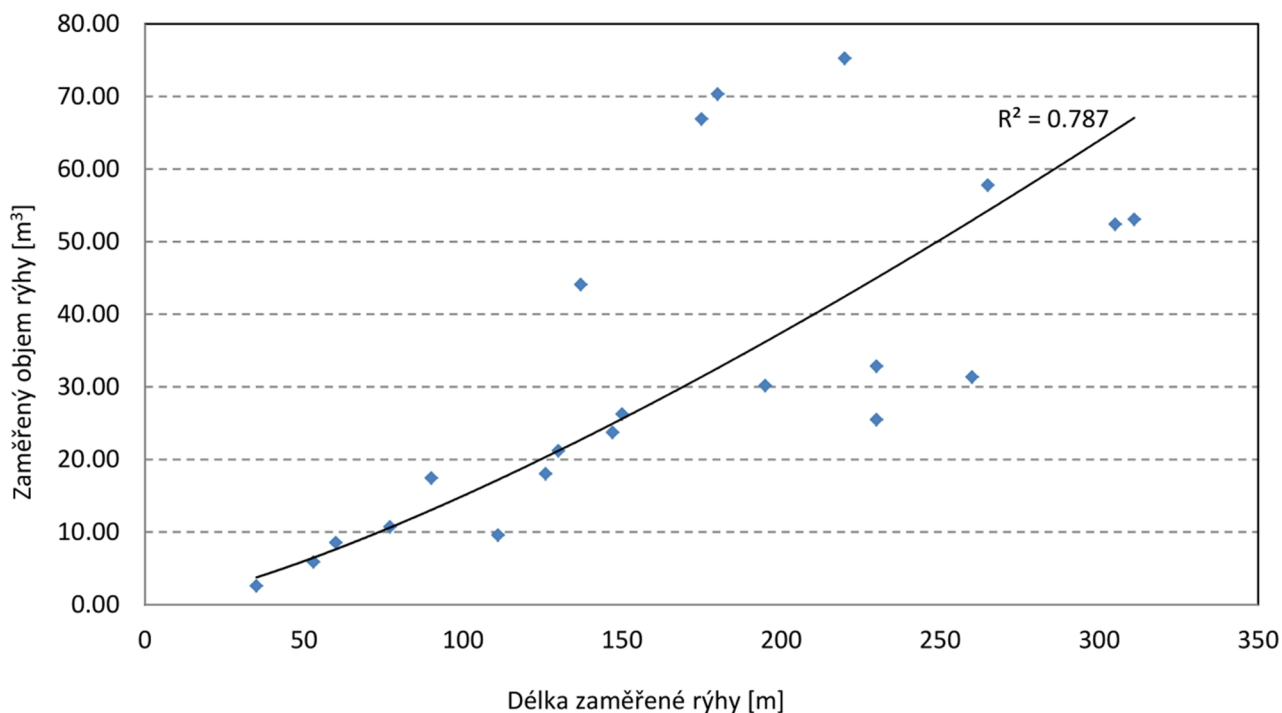
Nejtěsnější vztah byl prokázán mezi délkou rýhy a jejím vypočteným objemem. Byl zvolen mocninný typ regrese s koeficientem determinace rovným 0.842.

Ze „Studie MZe“ vyplývá statisticky významná závislost délky rýhy na průměrném čísle odtokových křivek CN v ploše sběrného povodí rýhy. Tato závislost byla potvrzena i v rámci testování měřených rýh pomocí jednoduchých regresí (viz Tab. 3). Koeficient determinace má hodnotu 0.430. V případě početnějšího vzorku rýh by byl pravděpodobně vyšší. Byla prokázána i závislost délky na kulminačním průtoku způsobeným deštěm s dobou opakování $N=100$ let (při IPS 2), což bylo možné předpokládat, jelikož čísla CN jsou používána k výpočtu hodnoty kulminačního průtoku.

Na vzorku měřených rýh nebyla jasně prokázána závislost mezi délkou rýhy a velikostí její přispívající plochy. Tento závěr se neshoduje s výsledky „Studie MZe“ (Ekotoxa, 2011), a to zřejmě z důvodu méně četného vzorku měřených rýh.

Závislost objemu rýhy na jiných faktorech

Capra (2009) uvádí, že existuje silný vztah mezi zaměřeným objemem rýhy a její délkou. Nejlépe jej vystihuje mocninný typ regresní funkce, což se potvrdilo i u námi měřených DSO. Vzhledem k přítomnosti odlehlých bodů byla závislost testována pro výběr měřených rýh kratších než 350 m (viz Graf 2).



Graf 2: Závislost délky rýhy na jejím objemu – jen rýhy měřené erodoměrem a kratší než 350 m

Pro měřené DSO kratší jak 350 m má regresní vztah tento tvar:

$$V = 0.342L^{1.3208}, \quad (4.3)$$

kde:

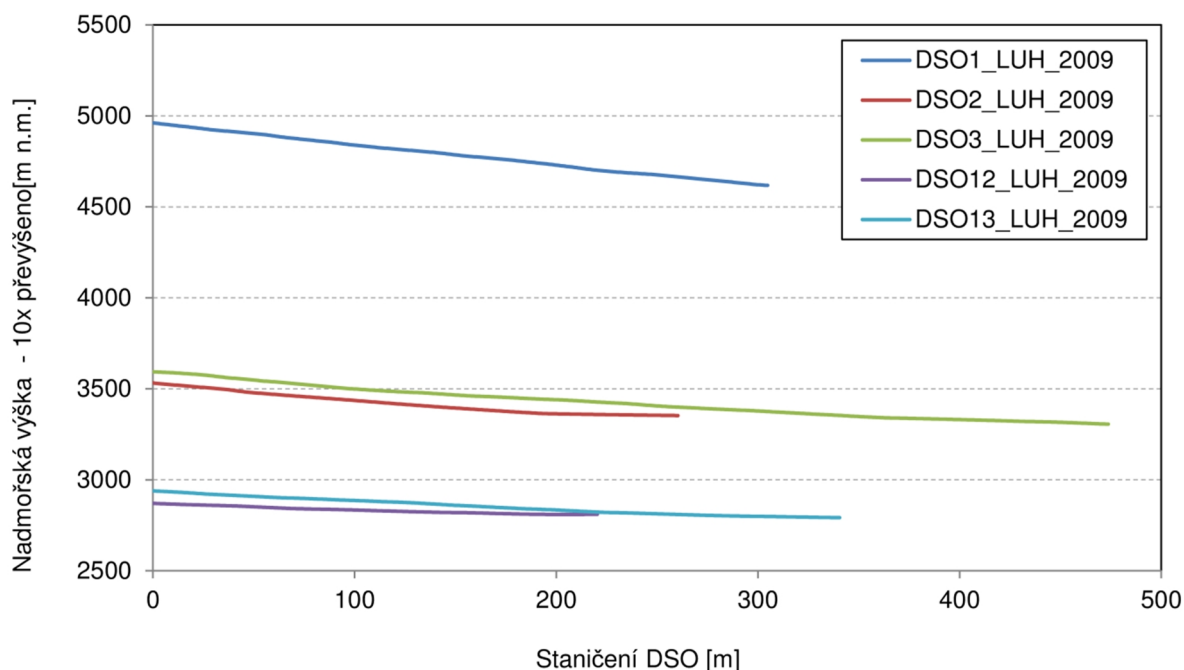
- L..... délka rýhy [m];
- V objem rýhy [m³].

V případě označení parametrů dle Capry je pro námi měřené rýhy parametr $a = 0.0342$ a parametr $b = 1.3208$ (Drongová a Sobotková, 2013).

Vandaeleho kritický sklon svahu

Jedním z cílů této práce je ověření platnosti Vandaelem popsaného vztahu pro určení kritického sklonu DSO, při jehož překročení dochází dle Vandaeleho k tvorbě rýhy. V příspěvku Vandaele (1996) uvádí, že přispívající plocha je určena nad místem údolnice s maximálním sklonem svahu, kde dochází k lokálnímu zvětšení rychlosti povrchového odtoku a následnému tlumení energie vlivem snížení podélného sklonu.

V případě měřených rýh ale nebyly v podélném profilu zjištěny výraznější změny sklonu svahu a proto nemohl být jasně určen bod v podélném profilu původního terénu, od kterého započal rozvoj rýhy. Graf 3 demonstruje na příkladu rýh měřených v roce 2009 homogenitu podélného sklonu (v 10x převýšeném měřítku). Tuto homogenitu vykazovaly téměř všechny měřené rýhy.



Graf 3: Převýšený podélný profil původního terénu v místech DSO měřených rýh v roce 2009

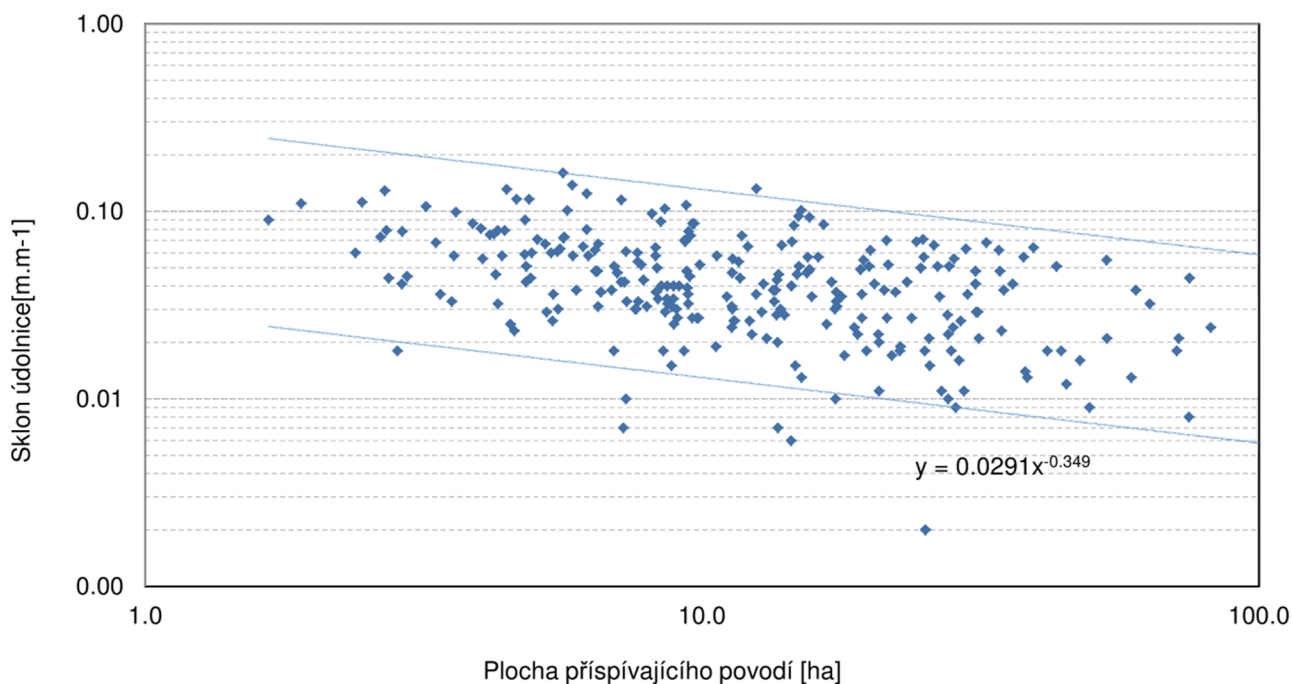
Vzhledem ke každoroční zemědělské činnosti, která způsobuje změny podélného sklonu terénu v DSO a také vzhledem ke zjištěným tvarům podélných profilů terénu bylo rozhodnuto o modifikaci metodiky určení kritického sklonu svahu pro účely této práce.

Do vztahu byla zahrnuta celková přispívající plocha rýhy a průměrný sklon původního terénu v délce měřených rýh. Grafy byly vyneseny, stejně jako v příspěvku Vandaeleho (1996), v logaritmickém měřítku.

Další změnou oproti postupu Vandaeleho bylo určení spodního prahu. Vandaele získal tuto hranici prostým spojením spodních bodů. Tento postup ovšem odporuje statisticky korektní metodice tvorby dolní obálky. V souboru se totiž mohou vyskytovat extrémní hodnoty, které v logaritmickém měřítku sice vizuálně neruší, ale mohou zásadním způsobem měnit parametry rovnice dolního prahu. Proto došlo k další odchylce od postupu uvedeného Vandaelem. Pro soubor byl vytvořen 95 % interval spolehlivosti a došlo k určení rovnice jeho dolní části.

Pro vzorek dat erozně ohrožených DSO byl koeficient a stanoven na 0.0291, což je hodnota pohybující se v intervalu zjištěného pro rýhy měřené v Evropě.

Koeficient $-b$, který je dle autora závislý na vlastnostech srážek, pokryvu a půdních charakteristikách, byl roven hodnotě -0.349, což je opět hodnota z autorem uváděného intervalu.



Graf 4: Znáznornění 95% intervalu spolehlivosti pro data erozně ohrožených DSO – „Studie MZe“

Stejně byl vyhodnocen i vzorek měřených rýh. Díky menšímu počtu prvků ve vzorku měl dolní interval spolehlivosti poněkud jiný tvar, který bylo obtížné uspokojivě aproximovat křivkou, ze které by bylo možné získat rovnici spodního prahu. Vzhledem k malému počtu prvků ve vzorku byl za průkaznější prohlášen vztah popsáný výše.

Zde prezentovaná pozměněná metodika může být aplikovatelná v praxi pro získání kritické hodnoty velikosti přispívající plochy nebo kritického sklonu svahu.

Vícerozměrná regrese

Vztah mezi měřenou délkou rýhy jako závisle proměnnou a množinou 32 nezávisle proměnných byl testován pomocí vícerozměrné lineární regrese. Vzhledem k tomu, že cílem bylo získat co nejjednodušší model použitelný k predikci délky rýhy, bylo přistoupeno k provedení tzv. krokové regrese (stepwise regression), která umožňuje mezi více nezávislými proměnnými identifikovat ty, které co možná nejlépe vysvětlují zkoumanou závislou veličinu.

Upravený regresní model má pak tvar:

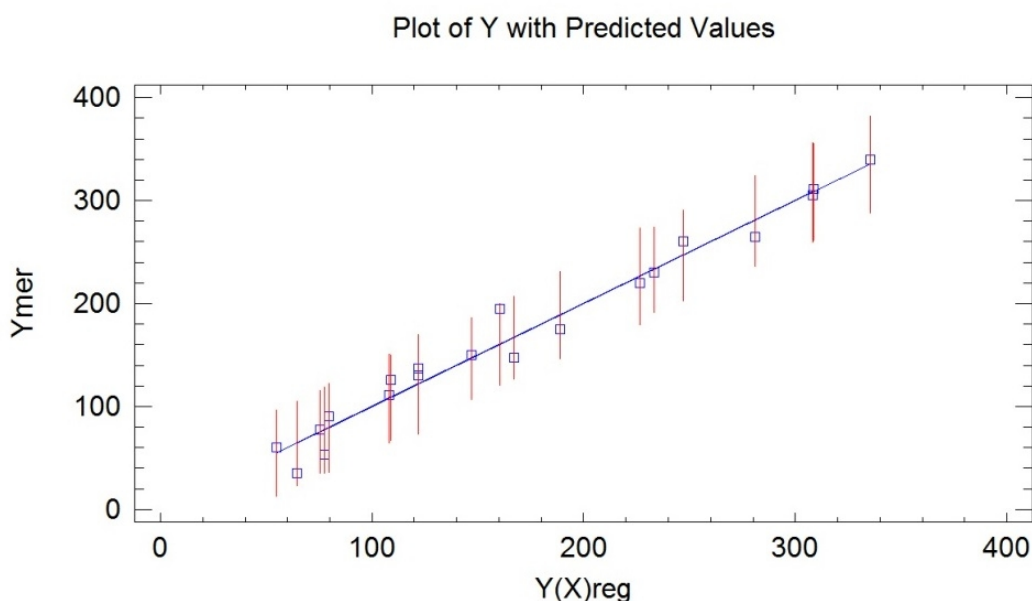
$$Y = 74.809 + 140.385 \cdot X_{13} - 111.094 \cdot X_{16} + 318.452 \cdot X_{18} + 36.793 \cdot X_{19} - 116.190 \cdot X_{20}, \quad (4.4)$$

kde:

Y délka rýhy [m];

X_{13} až X_{20} .. nezávisle proměnné – viz Tab. 4 [jednotky viz Tab. 4].

P-hodnota uvedeného regresního modelu je nižší než 0.05, jedná se o statisticky významný vztah mezi proměnnými při 95.0% spolehlivosti. Koeficient determinace R^2 je 0.972 tzn., že model popisuje 97.2% variability Y . Průměrná absolutní chyba odhadu (MAE) je 11.69 m.



Graf 5: Porovnání měřené délky rýh s jejím odhadem pomocí regresní funkce se znázorněním 95% intervalů spolehlivosti odhadu $Y(X)$.

Ze vztahu 4.4 nebo z Tab. 4 je viditelná významnost jednotlivých nezávisle proměnných.

Tab. 4: Popis nezávisle proměnných z regresní rovnice 4.4

Označení nez. proměnné	Význam nez. proměnné	Jednotky	Koeficient β	Významnost nez. proměnné [%]
X_{13}	CN	[-]	140.39	19.4
X_{16}	Q_{\max} vyvolaný deštěm s max. úhrnem ve veget. období	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	111.09	15.4
X_{18}	Plocha rýhy	$[m^2]$	318.45	44.1
X_{19}	Plocha sběrného povodí	[ha]	36.79	5.1
X_{20}	Omočený obvod	[m]	116.19	16.1

Délka rýhy dle vztahu 4.4 koreluje se svou půdorysnou plochou. Vliv má také plocha sběrného povodí rýhy. Tento závěr vzešel i z analýzy dat ze „Studie MZe“. U testování měřených rýh jednorozměrnou regresí nebyla závislost prokázána a projevila se až při vícerozměrné regresi. Velikost čísla odtokových křivek CN má také vliv na délku rýhy, což se projevilo i v analýzách dat ze „Studie MZe“ (Ekotoxa, 2011).

Vliv na délku rýhy má i kulminační průtok způsobený srážkou s maximálním denním úhrnem za vegetační období (Q_{max}). Pro jeho výpočet byla použita metoda čísel odtokových křivek CN (U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service, 1989), kde jsou jako vstupy používány údaje o půdě, morfologii povodí i velikosti úhrnu srážky.

Výše uvedený regresní model (viz vztah 4.4) zahrnuje jak proměnné, které je možné získat bez přímého měření již vytvořené rýhy, tak i některé průměrné hodnoty parametrů rýhy. Pro predikci délky rýhy je tedy nevhodný. Dalším krokem proto bylo provedení vícerozměrné regrese bez použití parametrů rýhy jako nezávisle proměnných. Nebyla ale nalezena statisticky významná závislost kombinace několika proměnných. Jako nejlepší se ukázala korelace délky rýhy s kulminačním průtokem způsobeným deštěm s dobou opakování $N=100$ let:

$$L = 472.530 \cdot Q_{100} + 94.785 \quad (4.5)$$

kde:

L délka rýhy [m];

Q_{100} kulminační průtok způsobený deštěm s dobou opakování $N=100$ let (při IPS 2) [$m^3 \cdot s^{-1}$].

Vztah 4.5 je možné použít pro odhad délky rýhy. Koeficient determinace je roven 0.496, proto je nutné uvažovat s větší odchylkou vypočtené délky a tuto hodnotu považovat za orientační.

4.5 OVĚŘENÍ VÝSTUPŮ EROZNÍCH MODELŮ NA ZÁKLADĚ PŘÍMÉHO MĚŘENÍ

Jedním z dílčích cílů této práce bylo porovnání měřených výsledků s hodnotami predikovanými pomocí erozních modelů. V následujících podkapitolách je uveden popis výsledků a vyvozených závěrů o použitelnosti jednotlivých modelů pro predikci hlubokých efemérních rýh v ČR.

4.5.1 Model EGEM

Model EGEM (Ephemeral gully erosion model) byl vyvinut Ministerstvem zemědělství Spojených států amerických (U.S. Department of Agriculture - USDA).

Predikční program EGEM byl testován v rámci několika výzkumů. Modelem bylo simulováno mnoho reálně naměřených rýh v jižním Španělsku, jižním

Portugalsku, severní Belgii a na Sicílii. Podle Gordona a kol. je aplikace výsledků EGEMu pro reálné využití v praxi obtížná. Jako klíčový vstupní parametr totiž slouží délka rýhy, která, při nesprávném odhadu, může vést ke zcestným výsledkům simulace. Existuje silná korelace mezi zadávanou délkou efemérní rýhy a modelem vypočteným objemem oderodované půdy. Zatímco různé topografické ukazatele je možné použít k relativně přesné lokalizaci potencionální rýhy, neexistuje dostatečně přesná metoda pro určení délky dané rýhy (Gordon, 2007).

Nachtergaele (1999) se zabýval testováním modelu EGEM na 46 reálných efemérních rýhách v intenzivně zemědělsky využívaném území na jihu Španělska a dalších 40 rýhách nalezených jak na zemědělsky využívaných pozemcích, tak i na nekultivovaných plochách v jižním Portugalsku. Byl nalezen velmi dobrý vztah mezi modelem predikovaným a měřeným objemem rýh ($R^2 = 0.880$). Vztah mezi měřenou a predikovanou plochou příčného profilu rýhy nebyl významný ($R^2=0.270$).

Ověření použitelnosti modelu v podmínkách ČR

Byla zaznamenána značná rozkolísanost výsledků výpočtů. Výsledky dané modelem EGEM střídavě podhodnocovaly i nadhodnocovaly měřené údaje, a to až trojnásobně. Nebylo možné konstatovat, že by měřené hodnoty byly v korelaci s hodnotami vypočtenými pomocí EGEMu.

Dalším problémem byl fakt, že některé z rýh nebylo vůbec možné programem ověřit, a to z důvodu modelem daných limitů pro velikost jednotlivých vstupů, např. velikosti přispívající plochy nebo délky údolnice.

I přes to, že program používá pro určení odtoku metodu čísel odtokových křivek CN, v případech, kdy byl maximální denní úhrn srážky za vegetační období menší než 60 mm, nedošlo dle modelu k iniciaci povrchového odtoku a tím pádem ani ke vzniku eroze. S tímto problémem souvisí i skutečnost, že program používá pro výpočet několik koeficientů, jejichž velikost závisí na regionu USA. Například pro určení intenzity srážky ze zadaného úhrnu model používá přepočtení dle klimatických regionů USA. Tento koeficient má, na rozdíl od jiných, velký vliv na výsledek.

4.5.2 Model AnnAGNPS

Software AnnAGNPS je autory prezentován jako vylepšená verze EGEMu, proto bylo předpokládáno, že problémy zjištěné ve výše popsaném modelu EGEM zde budou uspokojivě vyřešeny. K programu je navíc volně dostupná velmi podrobná dokumentace a další podpůrné soubory včetně cvičné sady dat.

Během přípravy dat pro testování bylo zjištěno, že software má mnohem větší nároky na vstupní data a jejich úpravu do programem požadovaných formátů.

Autoři zahraničních výzkumů uvádějí, že při testování modelu v USA bylo dosaženo převážně dobrých výsledků. V Evropě zatím mnoho testů

neproběhlo, jedním z mála je výzkum provedený ve Španělsku Chahorem a kol. (2012). Autoři popisují, že byly získány špatné výsledky při simulaci měřených efemérních rýh.

Vzhledem k faktu, že během přípravy dat do tohoto modelu bylo nalezeno několik podobností mezi modelem EGEM a AnnAGNSP, bylo od testování v tomto modelu upuštěno. Podobně jako v modelu EGEM, jsou i zde používány některé koeficienty závislé na klimatických podmínkách jednotlivých regionů USA.

4.5.3 Model SHETRAN

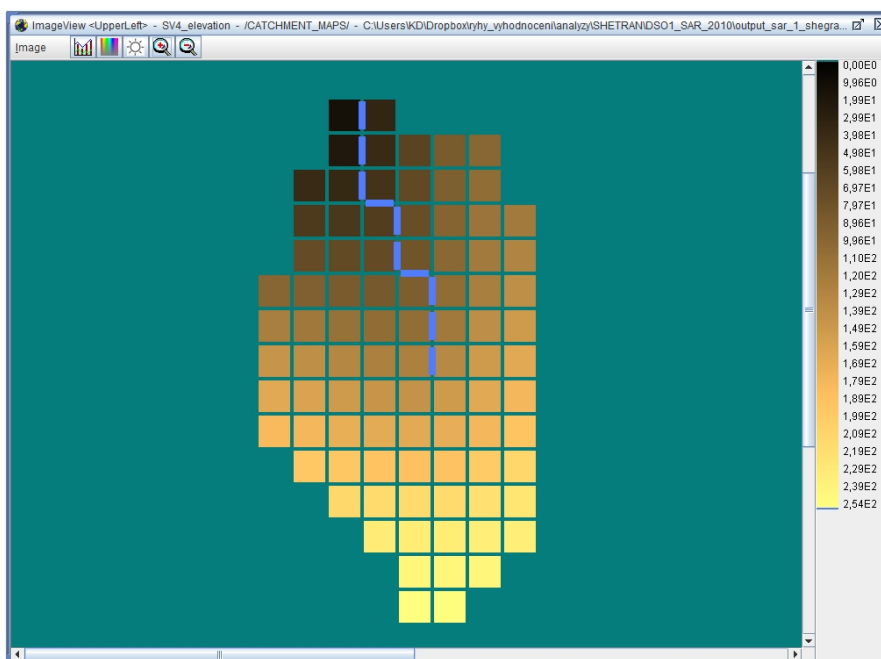
Posledním z testovaných byl model SHETRAN. Model vychází z produktu SHE (Système Hydrologique Européen), který byl vyvinut v rámci spolupráce dánského Hydraulického institutu, britského Hydrologického ústavu a francouzské společnosti SOGREAH. SHETRAN (název je odvozen od SHE-Transport) vznikl na fakultě stavební univerzity v Newcastle upon Tyne. SHETRAN je vytvořen pro modelování odtoku vody, transportu půdního materiálu a transportu nerozpuštěných látek v povodí.

Ověření použitelnosti modelu v podmínkách ČR

V rámci této práce byly vytvořeny programem požadované vstupní soubory a byly simulovány předmětné srážkoodtokové události, které nastaly v měřených lokalitách v letech, kdy byly rýhy měřeny.

Během testování modelu bylo zjištěno, že v případě zadání jednotlivého dešťového úhrnu, nedochází k transformaci srážky na odtok. Bylo nutné zadat delší srážkovou řadu, tj. v tomto případě celé vegetační období roku, ve kterém byla rýha měřena. V takovém případě byly danými srážkami vyvolané kulminační průtoky v závěrných profilech rýh vypočtené SHETRANEM odhadnuty velmi uspokojivě v případě, že jako referenční byly brány průtoky počítané metodou CN. V technické dokumentaci k programu je přitom uvedeno, že model počítá charakteristiky odtoku jinou metodou než CN, a to odhadem každé hydrologické ztráty v povodí zvlášť.

Jedním z výstupů modelu je grafická lokalizace dráhy soustředěného odtoku, která je v modelu schematicky tvořena vždy na hranicích výpočetních buněk (viz Obr. 5). Bylo zjištěno, že výpočet a následné vykreslení délky soustředěného povrchového odtoku v rámci zadaného povodí odpovídalo realitě. Model prováděl uspokojivou transformaci srážky na odtok. Jako problematický se může jevit limit počtu buněk. Čím je povodí plošně rozsáhlejší, tím musí být velikost výpočetní buňky větší, s čímž souvisí přesnost lokalizace dráhy soustředěného odtoku.



Obr. 5: Schematizace povodí a prostorová lokalizace soustředěného povrchového odtoku v modelu SHETRAN

Dále byl testován modul odhadující objem odnosu půdního materiálu z drah soustředěného povrchového odtoku. Při výpočtu bylo zjištěno, že ani u jedné z testovaných rýh program nezaznamenal odnos materiálu z prostoru dráhy soustředěného odtoku. Dle výpočtů nebylo překročeno limitní smykové napětí způsobené povrchovým odtokem, a tedy nedošlo k oddělení a transportu půdního materiálu. Model se proto jeví jako málo citlivý pro výpočet eroze v drahách měřených rýh.

4.6 NÁVRH METODIKY PRO PREDIKCI EFEMÉRNÍCH RÝH

Vzhledem k uvedeným závěrům z testování vybraných erozních modelů, které se jeví jako nepoužitelné v našich podmínkách, bylo rozhodnuto o vytvoření vlastní metodiky pro predikci výskytu a predikci základních parametrů efemérních rýh.

4.6.1 Predikce lokalizace rýhy a odhad délky rýhy

Pro lokalizaci potenciální efemérní rýhy a také pro odhad délky rýhy, která bude vstupním parametrem pro predikci objemu rýhy, byly uvažovány 3 možné přístupy:

- s použitím hydrologických nástrojů dostupných v prostředí ArcMap;
- na základě vymezení DSO provedeného ve „Studii MZE“;
- s použitím regresních vztahů.

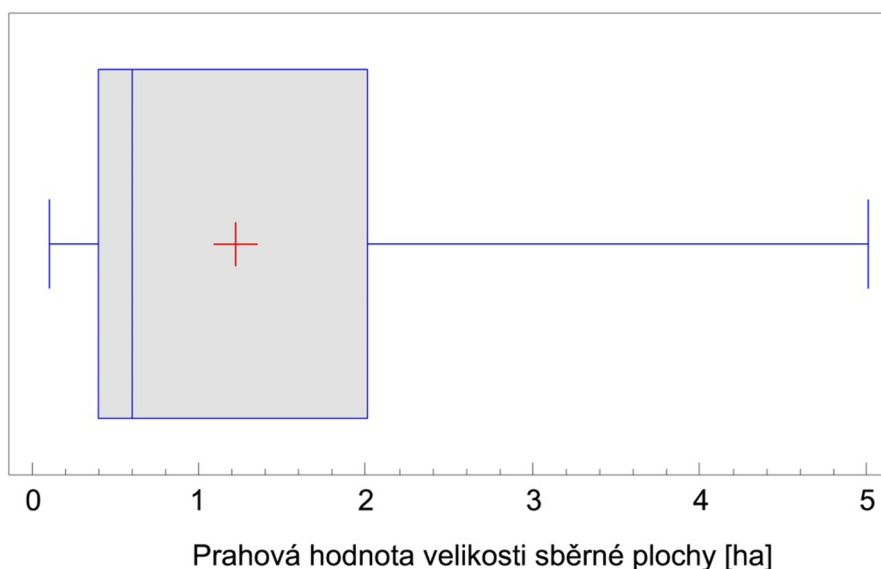
Hydrologické nástroje prostředí ArcMap

Pomocí hydrologických funkcí dostupných v prostředí ArcMap je možné prostřednictvím několika navazujících analýz určit sběrnou plochu každé výpočetní

buňky. Pomocí nástroje Flow Accumulation je tak možné určit buňky, které mají sběrnou plochu větší nebo rovnu zadané hodnotě (počtu buněk ve sběrné ploše).

Pro měřené rýhy byla provedena analýza, v rámci níž byly ověřeny prahové hodnoty velikostí sběrných ploch, od kterých dochází k tvorbě efemérních rýh. Bylo zjištěno, že neexistuje jediná prahová hodnota, která by charakterizovala všechny zaměřené rýhy, a to z důvodu odlišností ve vlastnostech příčných srážek, pokryvu terénu a morfologie terénu.

Prahová hodnota velikosti sběrné plochy se pohybovala od 0.11 do 5.00 ha s průměrem 1.22 ha (krajní body 95.0% intervalu spolehlivosti průměru jsou 0.65 a 1.78) a mediánem 0.60 ha. Níže (viz Graf 6) je grafické znázornění vlastností vzorku prahových hodnot velikostí sběrných ploch u měřených rýh. Ve vybarveném obdélníku je označen medián a interkvartilové rozpětí (25-75 %), další horizontální čáry označují minimální a maximální hodnotu ve vzorku. Zvýrazněný křížek značí střední hodnotu.



Graf 6: Krabicový graf – analýza vzorku prahových hodnot velikostí sběrných ploch u měřených rýh

Vymezení DSO na základě „Studie MZe“

Společnost Ekotoxa v rámci „Studie MZe“ také provedla vymezení erozně ohrožených DSO. Vymezení bylo taktéž prováděno na základě analýzy velikosti přispívající plochy rýhy. Limity přispívající plochy byly stanoveny na 300 buněk. Při použité velikosti buňky 10·10 m byl limit roven 3 ha. Takovýto profil byl označen jako rizikový. Dále byly automatizovaně vygenerované profily konfrontovány s leteckými snímky a hranicemi zemědělských pozemků (Ekotoxa, 2011). Z celkového souboru více než 33 000 identifikovaných DSO byl na základě leteckých snímků z let 2005 – 2009 u 3061 z nich identifikován výskyt erozních projevů.

V případě, že byly na snímcích viditelné erozní projevy, pohybovala se přispívající plocha v závěrovém profilu rýhy mezi 1 – 5 ha, nejčastěji se však rovnala velikosti 3 ha.

V rámci zpracování disertační práce bylo zjištěno, že pro lokalizaci potencionálního výskytu erozních projevů je vhodné za prahovou hodnotu přispívající plochy uvažovat již 1 ha.

Určení délky rýhy na základě regresních vztahů

Další alternativou je využití lineárního regresního vztahu pro určení délky rýhy. V rámci této práce byly sestaveny vztahy sloužící pro určení délky rýhy – model sestavený na základě vyhodnocení dat z přímého měření a model z dat „Studie MZe“.

Model sestavený na základě přímého měření (viz rovnice 4.4) má sice velkou statistickou významnost, ale jako nezávisle proměnné do něj vstupují parametry rýhy – její plocha a průměrná velikost omočeného obvodu. Proto byla provedena vícerozměrná regrese bez použití parametrů rýhy jako nezávisle proměnných. Nebyla nalezena statisticky významná závislost kombinace několika proměnných.

Na základě měřeného vzorku rýh bylo zjištěno, že je pro odhad délky rýhy možné použít regresní vztah, který využívá jako závisle proměnnou kulminační průtok způsobený deštěm s dobou opakování $N=100$ let (viz vztah 4.5). Vzhledem k hodnotě vypočteného koeficientu determinace ($R^2=0.496$) je nutné uvažovat s větší odchylkou vypočtené délky a tuto hodnotu považovat za orientační.

Vztah pro určení délky rýhy vycházející z dat „Studie MZe“ (viz rovnice 4.2) předpokládá znalost takových vstupních parametrů, jako jsou číslo BPEJ nebo číslo CN v ploše povodí. Vztah vychází z dat studie, která nabízí i grafický výstup, který umožňuje i polohovou lokalizaci rýhy (viz kapitola 2.3.2).

Návrh metody pro predikci lokalizace rýhy a odhad délky rýhy

Pro predikci lokalizace rýhy a odhad její délky je vhodné využít všech výše uvedených metod s následným porovnáním jejich výstupů.

Morfologie terénu v zemědělské krajině se v čase mění, proto je vhodná verifikace výstupů „Studie MZe“ za pomoci hydrologických nástrojů dostupných v prostředí ArcMap s využitím aktuálního výškopisu.

Pro orientační odhad délky rýhy je, v případě znalostí nezávisle proměnných vstupujících do výše popsáných regresních vztahů, možné i jejich využití.

4.6.2 Empirický model pro predikci objemu rýh

Cílem bylo vytvořit model použitelný pro predikci objemu rýh např. při zemědělské výrobě či při projekci protierozních a protipovodňových opatření v krajině.

Empirický model sloužící pro odhad objemu rýhy vycházel z přímých měření projevů vodní eroze v hlubokých efemérních rýhách. Následuje popis 3 variant tohoto modelu, které se liší množstvím požadovaných vstupních parametrů:

- model nezahrnující parametry rýhy;
- model zahrnující délku rýhy;
- model zahrnující délku i šířku rýhy.

Model nezahrnující parametry rýhy

Nejdříve byla prověřena možnost vytvoření kvalitního modelu jen na základě všeobecně dostupných dat bez použití dat z přímého měření, tj. bez nutnosti terénního šetření v místě, kde již došlo ke vzniku rýhy. Při použití takto vymezené množiny proměnných nebylo možné sestavit kvalitní regresní model. Bylo konstatováno, že bez použití alespoň základních parametrů samotné rýhy není možné sestavit použitelný model. Ke stejnému závěru pravděpodobně dospěli i tvůrci modelu EGEM, do kterého jsou jako vstupní parametry zadávány takové údaje, jako je délka rýhy, její šířka i informace o erozi dotčeném okolí rýhy.

Model zahrnující délku rýhy

V případě, že mezi vstupy bude zařazena i délka rýhy, je možné odhad objemu rýhy provést pomocí vztahu 4.3, který je modifikací Caprova vzorce.

Model zahrnující délku i šířku rýhy

Jelikož i autoři modelu EGEM používají jako vstup délku a šířku rýhy, bylo přistoupeno k sestavení regresního modelu, kde byly jako nezávisle proměnné použity zmíněné parametry rýhy. Model má tvar:

$$Y = -4.36581 + 42.7249 \cdot X_1 + 48.9561 \cdot X_{17} + 24.7623 \cdot X_{26}, \quad (4.6)$$

kde:

Y objem rýhy [m^3];

X_1 až X_{26} ... nezávisle proměnné – viz Tab. 5 [jednotky viz Tab. 5].

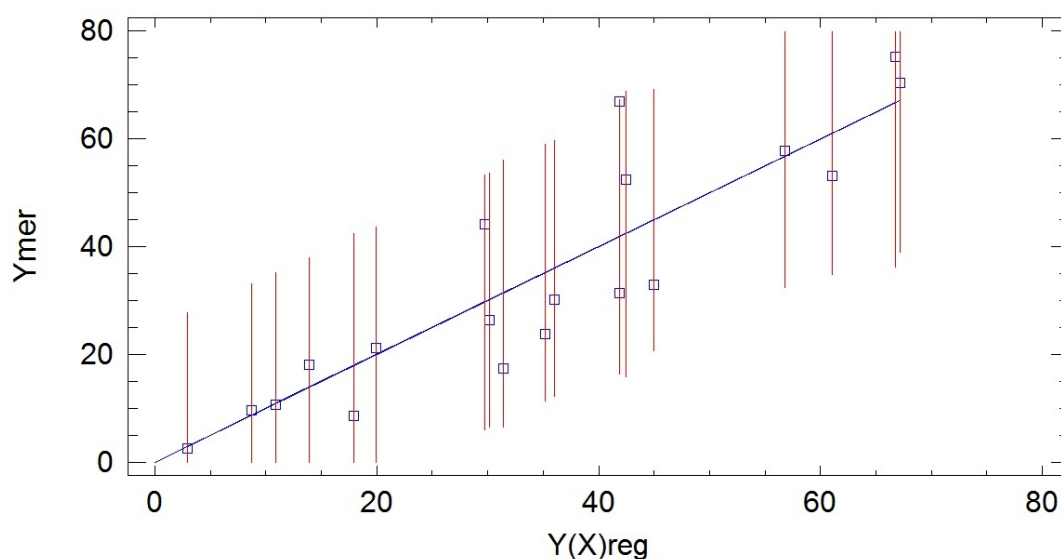
Jedná se o statisticky významný vztah mezi proměnnými na hladině významnosti 95.0%. Koeficient determinace R^2 je 0.810 tzn., že model popisuje 81.0% variability Y . Směrodatná chyba odhadu je 10.832 m^3 .

Tento model popisuje testovaný vzorek dat lépe než model vycházející pouze z délky rýhy. Vyžaduje však více vstupních dat. V tabulce níže jsou uvedeny jednotlivé nezávisle proměnné použité ve vztahu 4.6.

Tab. 5: Popis nezávisle proměnných z regresní rovnice 4.6

Označení nez. proměnné	Význam nez. proměnné	Jednotky	Koeficient β	Významnost nez. proměnné [%]
X_1	Délka rýhy	[m]	42.72	36.7
X_{17}	Průměrná šířka rýhy	[m]	48.96	42.0
X_{26}	Maximální denní úhrn ve vegetačním období	[mm]	24.76	21.3

Porovnání měřeného objemu rýhy s jeho odhadem pomocí regresní funkce znázorňuje Graf 7.



Graf 7: Porovnání měřeného objemu rýhy s jeho odhadem pomocí regresní funkce se znázorněním 95% intervalů spolehlivosti odhadu $Y(X)$.

Výběr modelu pro určení objemu rýhy

Na základě měřeného vzorku dat je možné říci, že nejvhodnějším nástrojem pro určení objemu rýhy je regresní model, do kterého vstupuje délka i šířka rýhy a údaj o srážkovém úhrnu. Pokud nejsou tyto podklady dostupné, lze použít i modifikace vztahu dle Capry, který určil objem pouze na základě délky rýhy. Predikce délky rýhy je popsána v předchozí kapitole.

5 ZÁVĚR

Disertační práce je zaměřena na popis zákonitostí vzniku a dalšího rozvoje hlubokých efemérních rýh vyskytujících se v zemědělské krajině v ČR.

S využitím studie „*Vymezení přispívajících ploch nad uzávěrovými profily erozně ohrožených drah odtoku na orné půdě pro potřeby Rámcové směrnice pro vodní politiku 2000/60/ES*“ (Ekotoxa, 2011) (dále jen „Studie MZe“) a na základě hydrologických analýz dostupných v prostředí ArcMap byl proveden rozsáhlý terénní průzkum vybraných lokalit a byly určeny efemérní rýhy k zaměření.

Byl vyvinut metodický postup pro zaměření hlubokých efemérních rýh a automatizované vyhodnocení jednotlivých parametrů zaměřovaných efemérních rýh. Pomocí vyvinuté metodiky bylo provedeno zaměření statisticky významného vzorku rýh pro další vyhodnocení.

Zaměřený vzorek rýh byl zpracován a analyzován a byly vypočteny popisné charakteristiky jednotlivých rýh. Pomocí moderních metod matematické pravděpodobnosti a statistiky byly provedeny jednorozměrné a vícerozměrné regresní analýzy zkoumající vazby mezi vypočtenými či zaměřenými charakteristikami efemérních rýh či faktory mohoucími mít vliv na vývoj rýh. Na základě výsledků těchto analýz byly vytvořeny regresní modely reprezentující závislost hlavních charakteristik rýh (délka, objem) na ostatních vybraných charakteristikách a byly diskutovány statisticky významné a nevýznamné vazby.

Jednorozměrnou regresní analýzou byl na vzorku měřených rýh jako nejtěsnější prokázán vztah mezi délkou rýhy a jejím zaměřeným objemem, dále mezi délkou a plochou rýhy. Byl nalezen i vztah mezi délkou rýhy a kulminačním průtokem způsobeným úhrnem s dobou opakování 100 let ($N=100$), který lze využít pro orientační predikci délky rýhy.

Pomocí vícerozměrné regresní analýzy byla potvrzena závislost délky rýhy na průměrném čísle odtokových křivek CN v ploše sběrného povodí rýhy, která se projevila v rámci jednorozměrné regresní analýzy a také ve vícerozměrné regresní analýze dat ze „Studie MZe“. Na měřeném vzorku dat naopak nebyla prokázána tak významná závislost délky rýhy na její přispívající ploše, jaká byla zjištěna při analýze dat ze „Studie MZe“, a to zřejmě z důvodu méně četného vzorku měřených rýh.

Na měřeném vzorku rýh byla potvrzena platnost Caprou (2009) publikovaného vztahu mezi zaměřeným objemem rýhy a její délkou. Platnost Casalího indexu AS (Casalí, 2000) ani Nachtergaelem (2002) popsané závislosti šířky rýhy na kulminačním průtoku nebyla pozorována.

V rámci práce byla upravena metodika pro určení Vandaelem a kol. (1996) popsaného kritického sklonu DSO, při jehož překročení dochází k tvorbě rýhy. Na základě statisticky korektní metodiky byl určen kritický sklon svahu platný v podmínkách České republiky.

S cílem nalezení modelu vhodného k predikci délky rýhy byla provedena vícerozměrná regresní analýza měřeného vzorku dat bez použití parametrů rýhy jako nezávisle proměnných. Nebyla nalezena statisticky významná závislost kombinace několika proměnných, která by byla využitelná pro predikci délky rýhy.

Na základě měřeného vzorku rýh bylo zjištěno, že pro odhad délky rýhy je možné použít regresní vztah, který využívá jako závisle proměnnou kulminační průtok způsobený deštěm s dobou opakování $N=100$ let. Vzhledem k hodnotě vypočteného koeficientu determinace je nutné uvažovat s větší odchylkou vypočtené délky a tuto hodnotu považovat za orientační.

U vybraných rýh byla sledována dynamika jejich vývoje během vegetačního období a bylo zjištěno, že iniciace a největší nárůst objemu rýhy jsou realizovány v období od přípravy pozemku k setí do jednoho měsíce po zasetí nebo sázení, kdy má půda malou smykovou odolnost vůči rozrušení povrchovým odtokem. V následujících obdobích popsaných Wischmeierem a Smithem (1978) dochází ke zvyšování kritického smykového napětí a v případě výskytu srážkového úhrnu překračujícího parametry iniciačního deště již nedochází k výraznějšímu nárůstu objemu rýhy.

Na základě charakteristik zaměřených efemérních rýh a dále na základě zjištěných podmínek jejich vzniku bylo provedeno ověření výstupů erozních modelů EGEM, AnnAGNPS a SHETRAN. Výstupy modelování erozních procesů byly konfrontovány s naměřenými veličinami a bylo konstatováno, že vybrané modely nejsou použitelné pro predikci eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku v podmínkách ČR.

Vzhledem k výsledkům ověřování existujících programů pro predikci efemérních rýh bylo rozhodnuto o vytvoření vlastního postupu predikce výskytu a predikce parametrů hlubokých efemérních rýh. Byly určeny možné způsoby lokalizace rýh a dále doporučeny dva empirické modely pro určení objemu rýhy vycházející z přímého měření. Na základě měřeného vzorku dat je možné říci, že nejvhodnějším nástrojem pro určení objemu rýhy je regresní model, do kterého vstupuje délka i šířka rýhy a údaj o srážkovém úhrnu. Pokud nejsou tyto podklady dostupné, lze použít i modifikaci vztahu dle Capry, který určil objem pouze na základě délky rýhy.

Výstupy metodiky pro predikci výskytu a predikci základních parametrů efemérních rýh je možné využít pro stanovení optimálních protierozních opatření (stabilizace drah soustředěného povrchového odtoku) v podmínkách České republiky.

Tato práce vznikla za podpory projektu QJ1230066. „Degradace půdy a její vliv na komplex půdních vlastností včetně návrhu nápravných opatření k obnově agroekologických funkcí půdy“. Autorka děkuje MZe ČR za finanční podporu a za poskytnutí studie „*Vymezení přispívajících ploch nad závěrovými profily erozně ohrožených drah odtoku na orné půdě pro potřeby Rámcové směrnice pro vodní*

politiku 2000/60/ES“. Práce vznikla i za podpory specifického výzkumu na VUT v Brně reg. č. FAST-J-11-45 „*Vývoj měřících zařízení pro potřeby měření projevů vodní eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku“*.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Capra, A. a kol. 2009.** Relationships between rainfall characteristics and ephemeral gully erosion in a cultivated catchment in Sicily (Italy). *Soil & Tillage Research*. 2009, stránky 77-87.
- Casalí, J. a kol. 2000.** Processes of ephemeral gully erosion. *International Journal of Sediment Research*. 2000, stránky 31-41.
- Casalí, J. a kol. 2006.** Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. 2006, stránky 128-138.
- De Santisteban, L.M. a kol. 2006.** Assessing soil erosion rates in cultivated areas of Navarre (Spain). Wiley InterScience. 2006.
- Drongová, K. 2013.** Výzkum eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku v České republice. *Vodní hospodářství*. 2013, stránky 312-315.
- Drongová, K., Sobotková, V. 2013.** Projevy vodní eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku. *Littera Scripta*. 2013, stránky 151-161.
- Ekotoxa. 2011.** Vymezení přispívajících ploch nad uzávěrovými profily erozně ohrožených drah odtoku na orné půdě pro potřeby Rámcové směrnice pro vodní politiku 2000/60/ES. 2011.
- Gordon, L.M. a kol. 2007.** Simulating Ephemeral Gully Erosion in AnnAGNPS. Buffalo : American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. 0001-2351.
- Holý, M. a kol. 1978.** Protierozní ochrana. Praha : SNTL, 1978. str. 288.
- Holý, M. a kol. 1982.** Modelování erozních procesů. Praha : Academia, 1982.
- Janeček, M. a kol. 2012.** Ochrana zemědělské půdy před erozí - metodika. Praha: Česká zemědělská univerzita Praha, 2012.
- Laflen J. M. a kol. 1985.** Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. *Soil Conservation and Productivity*. 1985, stránky 3-8.
- Morgan, R.P.C. 2005.** Soil Erosion and Conservation. Third Edition. Malden: Blackwell Publishing, 2005. 1-4051-1781-8.
- Nachtergaele, J. a kol. 1999.** Testing the Ephemeral Gully Erosion Modle (EGEM) in Mediterranean Environments. [pdf] West Lafayette, Indiana : autor neznámý, 1999. článek ve sborníku.
- Nachtergaele, J. a kol. 2002.** Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels. 2002. stránky 1935-53. Sv. 16. 0885-6087.
- Pavlík, F., Sobotková, V., Dumbrovský, M., Drongová, K., Uhrová, J.** Vysoké učení technické v Brně. Zařízení pro volumetrickou kvantifikaci projevů vodní eroze půdy v efemérních rýhách [užitný vzor]. Česká republika. Užitný vzor, CZ 25471 U1. Zapsáno 4. 6. 2013.

- U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service. 1989.** Estimating Runoff and Peak Discharges. Washington, D.C. : Government Printing Office, 1989.
- U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service. 1992.** Ephemeral Gully Erosion Model. Washington D.C. : autor neznámý, 1992. User Manual.
- Vandaele, K., et al. 1996.** Geomorphic threshold condition for ephemeral gully incision. *Geomorphology*. 1996, Sv. 16, stránky 161-173.
- Wischmeier, W.C., Smith, D.D. 1978.** Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. Washington, DC : US Department of Agriculture, 1978. str. 537.
- Zachar, D. 1982.** Soil Erosion. *Developments in soil science*; 10. Amsterdam: Elsevier, 1982. str. 547. 2-0842.652.

7 PŘÍLOHY

7.1 SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

7.1.1 Články v recenzovaných neimpaktovaných časopisech

Drongová, K. 2013. Výzkum eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku v České republice. *Vodní hospodářství*. 2013.

Drongová, K., Sobotková, V. 2013. Projevy vodní eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku. *Littera Scripta*. 2013, stránky 151-161.

Pavlík, F., Sobotková, V., Dumbrovský, M., Drongová, K. a Uhrová, J. Vysoké učení technické v Brně. Zařízení pro volumetrickou kvantifikaci projevů vodní eroze půdy v efemérních rýhách [užitný vzor]. Česká republika. Užitný vzor, CZ 25471 U1. Zapsáno 4. 6. 2013.

7.1.2 Další články související s tematikou práce

2013

Drongová, K. 2013. Volumetrická kvantifikace erozních projevů v drahách soustředěného povrchového odtoku a analýza faktorů ovlivňujících jejich vznik. In Konference doktorského studia JUNIORSTAV 2013, VUT Brno 1.2.2013, ISBN: 978-80-214-4669-4.

Drongová, K. 2013. Analýza faktorů přispívajících k tvorbě erozních projevů v drahách soustředěného povrchového odtoku v podmínkách České republiky. In Konference doktorského studia JUNIORSTAV 2013, VUT Brno 1.2.2013, ISBN: 978-80-214-4669-4.

2012

Drongová, K., Pavlík, F. 2012. Volumetrická kvantifikace vodní eroze vznikající na hranicích pozemků. In Konference doktorského studia JUNIORSTAV 2012, VUT Brno 15.1.2012, ISBN: 978-80-214-4393-8.

2011

Drongová, K., Pavlík, F. 2011. Volumetrická kvantifikace vodní eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku jako podklad pro ověření predikčního modelu. In 10. konferencia mladých vodohospodárov, Bratislava, Slovenský hydrometeorologický ústav, ISBN: 978-80-88907-76-3.

Drongová, K. 2011. Komplexní návrh ochranných opatření v povodí Čebínského potoka při třech různých scénářích R faktoru. In Konference doktorského studia JUNIORSTAV 2011, VUT Brno 4.2.2011, ISBN: 978-80-214-4232-0.

Drongová, K. 2011. Analýza vlivu změny R faktoru na protierozní opatření v povodí Lubě. In Workshop Adolfa Patery - Extrémní hydrologické jevy v povodích 2010, Bratislava, Technická univerzita Bratislava.

7.2 ŽIVOTOPIS

Osobní údaje:

Jméno, příjmení, titul: Katarzyna Drongová, Ing.
Datum narození: 19. 3. 1985
Adresa: Těrlická 1267/34, Horní Suchá, 735 35
Kontaktní telefon: +420 604 857 832
E-mail: drongova.k@fce.vutbr.cz

Vzdělání:

2010 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny – doktorské studium, obor Vodní hospodářství a vodní stavby;
2008 – 2010 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební – magisterské studium, obor Vodní hospodářství a vodní stavby;
2004 – 2008 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební – bakalářské studium, obor Vodní hospodářství a vodní stavby;
2000 – 2004 Střední průmyslová škola stavební v Havířově, obor Stavebnictví, zaměření: Pozemní stavitelství.

Vědecká činnost:

2010 – 2013 NAZV MZe - Hodnocení účinnosti realizace komplexních pozemkových úprav (QI91C200) – člen řeš. týmu;
během r. 2012 NAZV MZe - Degradace půdy a její vliv na komplex půdních vlastností včetně návrhu nápravných opatření k obnově agroekologických funkcí půdy (QJ230066) – člen řeš. týmu;
během r. 2011 VaV MZe - Systém přírodně blízkých protierozních a protipovodňových opatření a jeho optimalizace v procesu pozemkových úprav (QH1292981) - člen řeš. týmu;
během r. 2011 Specifický výzkum - Vývoj měřících zařízení pro potřeby měření projevů vodní eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku – navrhovatel a hlavní řešitel;

Praxe v oboru:

- 2013 – dosud EKOTOXA s.r.o., práce na pozici Specialista pro vodohospodářské plánování;
- 2010 – 2012 WELL Consulting, s.r.o., nejdříve práce na pozici Krajinový inženýr, poté jako Vedoucí úseku technických služeb;
- 2009 – 2010 VZD INVEST s.r.o., práce na pozici Projektant vodohospodářských staveb.

Dovednosti:

- AutoCAD, AutoCAD Civil 3D, ArcMap, MicroStation – uživatelsky;
- MS Windows, MS Office – uživatelsky.

Jazykové znalosti:

- Angličtina – pokročilý slovem i písmem;
- Polština – rodilý mluvčí.

8 ABSTRACT

The thesis deals with analysis of factors contributing to the development of ephemeral gully erosion on area of the Czech Republic. Method used to direct measurements of ephemeral gully erosion was developed. The statistical sample of gullies was measured to describe the characteristics of ephemeral gullies. Statistical methods were used to compute simple and multiple linear regression models. The models describe relationships between ephemeral gully parameters or factors contributing to development of ephemeral gully. The thesis is concentrated with the development of methodology for prediction the occurrence and prediction of parameters of ephemeral gullies. The methodology can be used to design the optimal erosion control measures in the conditions of the Czech Republic.