

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

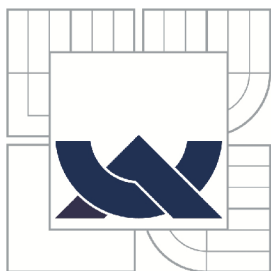
PROBLEMATIKA EROZNÍCH A ODTOKOVÝCH PROCESŮ V DRAHÁCH SOUSTŘEDĚNÉHO POVRCHOVÉHO ODTOKU

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. KATARZYNA DRONGOVÁ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

PROBLEMATIKA EROZNÍCH A ODTOKOVÝCH PROCESŮ V DRAHÁCH SOUSTŘEDĚNÉHO POVRCHOVÉHO ODTOKU

THE ISSUE OF EROSION AND RUNOFF PROCESSES IN CONCENTRATED
FLOW PATH

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. KATARZYNA DRONGOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MIROSLAV DUMBROVSKÝ, CSc.

BRNO 2014

Abstrakt

Práce je zaměřena na popis zákonitostí vzniku a dalšího rozvoje hlubokých efemérních rýh vyskytujících se v zemědělské krajině České republiky. Byla vypracována metodika přímého měření efemérních rýh, na jejímž základě došlo k zaměření statisticky významného vzorku rýh za účelem popisu charakteristik jednotlivých rýh i měřeného vzorku jako celku. 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. Disertační práce se také zabývá návrhem metodiky pro predikci výskytu a predikci základních parametrů efemérních rýh. Metodiku je možné využít pro stanovení optimálních protierozních opatření v podmínkách ČR.

Klíčová slova

hluboké efemérní rýhy, vodní eroze, dráhy soustředěného povrchového odtoku

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.

Keywords

ephemeral gully, water erosion, concentrated flow path

Bibliografická citace disertační práce

DRONGOVÁ, Katarzyna. *Problematika erozních a odtokových procesů v drahách soustředěného povrchového odtoku: disertační práce*. Brno, 2014, 130 str. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Miroslav Dumbrovský, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
podpis autora
Katarzyna Drongová

Poděkování:

Děkuji svému školiteli doc. Ing. Miroslavu Dumbrovskému, CSc. za odbornou pomoc a vedení při tvorbě této práce. Dále děkuji mým blízkým, bez jejichž morální podpory a značné dávky pochopení projevované po celou dobu mého studia by tato práce nevznikla.

OBSAH

1. ÚVOD	9
2. STÁVAJÍCÍ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	10
2.1. Vznik vodní eroze	10
2.2. Popis povrchového odtoku	12
2.3. Druhy vodní eroze.....	13
2.3.1. <i>Plošná eroze</i>	13
2.3.2. <i>Lineární eroze</i>	14
2.3.3. <i>Charakteristiky typů eroze</i>	16
2.4. Hluboké efemérní rýhy	17
2.4.1. <i>Popis hlubokých efemérních rýh</i>	17
2.4.2. <i>Tvorba a vznik efemérních rýh</i>	18
2.4.3. <i>Faktory ovlivňující vznik efemérních rýh</i>	20
2.4.4. <i>Transport částic vlivem působení soustředěného odtoku</i>	29
2.5. Eroze z tání sněhu	32
2.6. Výzkum efemérních rýh v České republice.....	33
2.7. Volumetrická kvantifikace efemérních rýh	35
2.8. Erozní modely.....	36
2.8.1. <i>Model EGEM</i>	37
2.8.2. <i>Model AnnAGNPS</i>	40
2.8.3. <i>Model SHETRAN</i>	44
2.9. Možnosti stabilizace DSO	46
2.9.1. <i>Zásady navrhování stabilizace DSO</i>	46
2.9.2. <i>Vyhodnocení realizované stabilizace DSO zatravněním</i>	50
3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	51
4. VSTUPNÍ DATA	52
4.1.1. <i>Výškopisné a polohopisné informace</i>	52
4.1.2. <i>Údaje o půdě a jejím využití</i>	52
4.1.3. <i>Údaje o srážkách</i>	53
5. MATERIÁL A METODA	54
5.1. Validace výsledků „Studie MZe“	54
5.2. Volumetrická kvantifikace rýhové eroze.....	55
5.2.1. <i>Výběr zařízení pro měření eroze</i>	55
5.2.2. <i>Mechanický erodoměr</i>	56
5.2.3. <i>Metodika zaměření erozních rýh</i>	58

5.3. Vyhodnocení zaměřených rýh	60
5.4. Tvorba regresních modelů	63
5.4.1. Regresní model z dat „Studie MZe“	63
5.4.2. Regresní model – data z přímého měření	65
5.5. Ověření použitelnosti erozních modelů	67
6. VÝSLEDKY A DISKUZE	68
6.1. Validace výsledků „Studie MZe“	68
6.2. Lokalizace a volumetrická kvantifikace rýh	69
6.3. Popis parametrů a charakteristik vzorku zaměřených rýh	71
6.3.1. Základní parametry rýh	71
6.3.2. Výzkum vývoje parametrů rýh po jejich délce	72
6.3.3. Objem rýh	81
6.4. Regresní modely	85
6.4.1. Porovnání souboru dat „Studie MZe“ a přímého měření	85
6.4.2. Regresní model z dat „Studie MZe“	86
6.4.3. Regresní model – data z přímého měření	88
6.5. Ověření výstupů erozních modelů na základě přímého měření	106
6.5.1. Model EGEM	106
6.5.2. Model AnnAGNPS	107
6.5.3. Model SHETRAN	107
6.6. Návrh metodiky pro predikci efemérních rýh	108
6.6.1. Predikce lokalizace rýhy a odhad délky rýhy	108
6.6.2. Empirický model pro predikci objemu rýh	114
7. ZÁVĚR	118
8. SEZNAMY	120
8.1. Seznam použité literatury	120
8.2. Seznam publikovaných prací	123
8.2.1. Články v recenzovaných neimpaktovaných časopisech	123
8.2.2. Další články související s tematikou práce	123
8.3. Seznamy zkratk	124
8.4. Seznam ilustrací a tabulek	127

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. Erodivní 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), která počítá 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. 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.

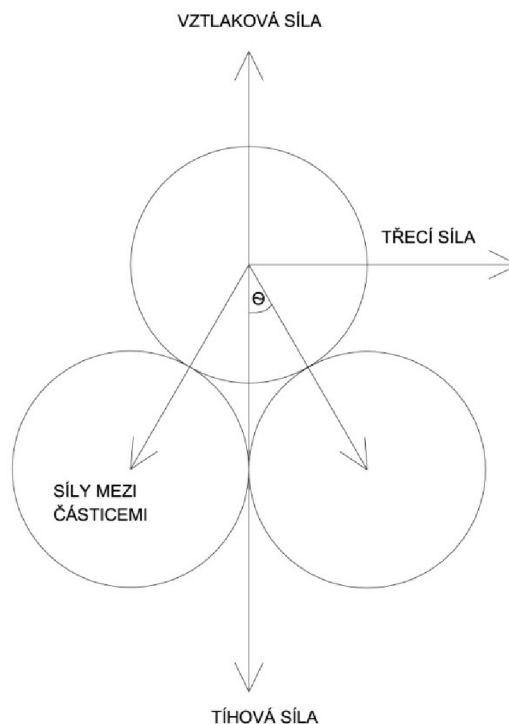
2. STÁVAJÍCÍ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1. Vznik vodní eroze

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. Kinetická intenzita deště je zjistitelná výpočtem z hmoty kapek a jejich konečné rychlosti (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 povrchovým odtokem. Ten bývá příčinou zahájení pohybu částic půdy. Zjednodušeně je možné říci, že existují tři typy sil působících na částice půdy při zahájení jejich pohybu:

- vertikální neboli tíhová síla;
- vztlaková síla;
- třecí síla.



Obr. 1: Síly působící na částice půdy při zahájení jejich pohybu (Morgan, 2005)

Podíl výše jmenovaných sil závisí na úhlu sklonu svahu. Na vodorovné ploše převládá tíhová síla, naopak na příkrých svazích dominuje vztlaková a třecí síla (Morgan, 2005).

Dle vztahu tíhové a třecí síly je možné na počátku celého erozního procesu definovat kritické podmínky, při jejichž překročení se částice začnou pohybovat dopředu či se otáčet okolo

svého bodu kontaktu s jinými částicemi směrem dolů po svahu. Podmínka je definována jako stav, ve kterém jsou si výše uvedené síly rovny:

$$\text{tíhová síla} = \text{třecí síla}, \quad (2.1)$$

$$F_G(\rho_s - \rho) \frac{\pi}{6} d_g^3 \tan \phi \frac{d_g}{2} \sin \phi = F_c \frac{d_g}{2} \sin \phi, \quad (2.2)$$

kde:

F_G gravitační síla [N];

ρ_s objemová hmotnost půdy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

ρ objemová hmotnost vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

d_g průměr zrna půdní částice [m];

ϕ úhel sklonu povrchu v době, kdy jsou částice půdy v klidu [$^\circ$];

F_c třecí síla potřebná pro pohyb částic půdy [N].

Vztlaková síla se skládá ze dvou složek:

- z rozdílů rychlostí proudění mezi vrchním a spodním povrchem částic, což vede k vytvoření tlakového gradientu, který způsobuje vytlačování částic (tento jev je znám jako Bernoulliho efekt);
- z turbulentních vírů vzniklých v rámci odtoku těsně pod povrchem.

Částice se začnou pohybovat dopředu či se otáčet okolo svého bodu kontaktu s jinými částicemi směrem dolů po svahu ve chvíli, kdy velikost třecí síly překročí velikost síly tíhové.

Třecí síla F_c způsobená prouděním vody je dle Morgana (2005):

$$F_c = \gamma R s, \quad (2.3)$$

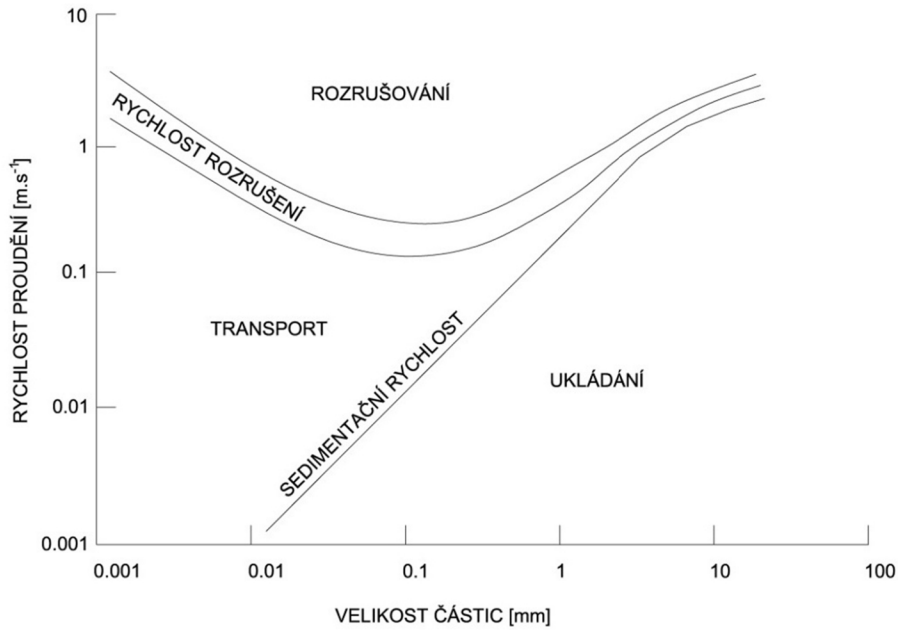
kde:

γ objemová hmotnost vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

R hydraulický poloměr [m];

s sklon svahu [-].

Morgan dále uvádí závislost mezi kritickou rychlostí při rozrušování, transportu a ukládání materiálu a velikostí půdních částic. Výsledky vycházejí z výzkumu provedeného v roce 1935. Z níže uvedeného grafu je patrné, že pro rozrušení jílovitých složek půdy je potřeba rychlost povrchového odtoku okolo $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. S velikostí částic se kritická rychlost zmenšuje až do velikosti odpovídající přibližně velikosti zrn jemného písku (dle klasifikace uvedené v ČSN (ČSN EN ISO 14688-1, 2003)). V případě, že jsou jemné částice odděleny, jsou tyto transportovány proudem až do chvíle, než rychlost proudu klesne pod $0.001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Oproti tomu rozdíl mezi rychlostí nutnou k rozrušení a sedimentaci je u hrubších částic relativně malý. Z toho vyplývá, že tyto hrubší částice bývají zpravidla nesený relativně krátkou dobu (Morgan, 2005).



Obr. 2: Kritická rychlost při rozrušování, transportu částic a sedimentaci částic jako funkce velikosti zrn

2.2. Popis povrchového odtoku

Povrchový odtok vody ze svahu podléhá základním principům zachování hmoty a zachování hybnosti. Vyplyvá z nich rovnice kontinuity a rovnice pohybová (Holý a kol., 1982).

Pro potřeby níže uvedeného tvaru rovnice kontinuity je odtok uvažován jako souvislá vrstva povrchově odtékající vody v kartézském souřadnicovém systému. Pokud zvolíme jednotkovou šířku svahu, má rovnice tvar (Holý a kol., 1982):

$$\frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x}(x, t) + \frac{\partial h}{\partial t}(x, t) = i_r(t) - i_v(t), \quad (2.4)$$

kde:

h výška povrchového odtoku, která je funkcí polohy a času $h(x,t)$ [m];

x osa souřadnic ve směru povrchu svahu;

t čas [s];

$i_r(t)$ intenzita srážek vztažená k jednotkové ploše svahu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];

$i_v(t)$ intenzita vsaku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];

\bar{u} průměrná rychlost povrchového odtoku ve směru osy x [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Pohybová rovnice vychází z druhého Newtonova zákona. Zabývá se silami působícími na vodu v uvažovaném elementárním úseku vyšetřovaného svahu.

Jedná se o 5 sil, které Holý a kol. (1982) značí následovně:

F_1 tíha vody v elementárním úseku [N];

F_2 tlaková síla působící na vodu v elementárním úseku ve vzdálenosti $x+\Delta x$ [N];

F_3 tlaková síla působící na vodu v elementárním úseku ve vzdálenosti x [N];

F_4 třecí síla [N];

F_5 síla vyvolaná dopadem dešťových kapek [N].

Pohybová rovnice má s výše uvedeným značením sil následující tvar:

$$h(x,t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}(x,t) + h(x,t) \bar{u}(x,t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}(x,t) = F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5, \quad (2.5)$$

kde:

h výška povrchového odtoku, která je funkcí polohy a času $h(x,t)$ [m];

x osa souřadnic ve směru povrchu svahu;

t čas [s];

\bar{u} průměrná rychlost povrchového odtoku ve směru osy x [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

2.3. 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.

2.3.1. Plošná eroze

U plošné (mezirýhové) eroze dochází k rovnoměrnému odnosu půdy z konkrétní části svahu. Jedná se o dvoufázový proces, který se skládá z:

1. oddělení jednotlivých částic půdy od celkové půdní masy, a to vlivem:
 - kinetické energie na povrch dopadajících dešťových kapek, mrazu, mechanického rozrušování zemědělskými stroji nebo zvířaty a dalšími vlivy (rozrušení povrchu dešťovými kapkami bývá označováno za nejdůležitějšího činitele způsobujícího oddělení částic půdy);
 - kyselin obsažených v dešti, které jsou schopny rozložit povrchovou část půdy.
2. odnosu půdy – vlivem dopadu dešťových kapek na povrch půdy dochází při oddělení půdních částic i k jejich posunu na krátkou vzdálenost. V případě výskytu některého z erozních činitelů (v našem případě proudící vody), dochází k odnosu uvolněných částic půdy vlivem povrchového odtoku (Zachar, 1982).

U nekohezních půd jsou nejdříve selektivně uvolňovány částice nejmenší zrnitostní frakce a teprve poté dochází k uvolnění hrubších frakcí. U kohezních půd jsou uvolňovány a transportovány celé agregáty (Toy, T.J. a kol., 2002).

Důležitým faktorem ovlivňujícím plošnou erozi je odolnost a stabilita půdních agregátů proti destrukci vlivem výše popsaných procesů. Odolnost a stabilita závisí na pedologických charakteristikách povrchového horizontu půdního profilu.

Za předpokladu, že není k dispozici energie potřebná k transportu půdních částic, dochází k sedimentaci transportovaného materiálu.

Projevy plošného smyvu jsou patrné z rozdílné textury půd v horní části svahu a na jejím úpatí, kde se hromadí jemné půdní částice a živiny. Mezi další projevy patří sytější barva půdy v úpatích, nestejněměrný vývoj vegetace na svazích, nebo vyplňování depresí a zanášení cest ve spodní části svahu (Holý, 1978).

2.3.2. Lineární eroze

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.

Popisem projevů a vzniku lineární eroze se zabývá řada autorů, kteří ji rozdělují na různé podtypy. Pro účely této práce je využito rozdělení dle Laflena a kol. (1985), který dělí lineární erozi na:

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

Rýhová eroze vzniká na svazích, kde se plošný povrchový odtok přetváří v odtok koncentrovaný. Studium charakteristik půdního profilu bylo prokázáno, že transformace plošného povrchového odtoku na proudění v rýhách má čtyři fáze:

- plošný povrchový odtok;
- povrchový odtok se soustředěnými dráhami odtoku;
- mikrokanálky bez výrazných skoků ve dně;
- mikrokanálky s výraznými svislými čely (Morgan, 2005).

Stržová eroze vzniká intenzivní výmolovou činností soustředěného povrchového odtoku. Zhlaví strží, kde dochází k soustředění srážkové vody, se postupně zařezává do svahu, čímž se strže rychle zvětšují (Holý, 1978).

Tato práce se zabývá výzkumem hlubokých efemérních rýh v podmínkách ČR, proto na tomto místě není problematika hlubokých efemérních rýh otevřená, ale bude podrobněji diskutována v dalších kapitolách.

2.3.3. Charakteristiky typů eroze

Laflen (1985) popisuje vodní erozi a dělí ji do tří kategorií dle charakteristik jejích projevů. Níže je uvedena tabulka převzatá z Laflenovy publikace (1985), kde jsou porovnávány projevy a charakteristiky tří kategorií vodní eroze:

- plošné a rýhové eroze;
- eroze v hlubokých efemérních rýhách;
- stržové eroze.

Tab. 1: Charakteristiky jednotlivých typů eroze (Laflen J. M. a kol., 1985)

Plošná a rýhová eroze	Eroze v hlubokých efemérních rýhách	Stržová eroze
Její výskyt je možný na svazích s homogenními sklony svahů.	Vyskytuje se v údolnicích s mírnými okolními sklony svahů.	Obecně vzniká v dobře definovatelných údolnicích.
Projevy eroze (např. rýhy) mohou být jakkoliv rozsáhlé, ale obvykle jsou menší než efemérní rýhy či projevy stržové eroze.	Mohou dosahovat jakýchkoliv rozměrů, ale převážně bývají větší než projevy rýhové eroze a menší než permanentní strže.	Obvykle bývají větší než rýhy.
Proudění vytváří mnoho malých rýh, které ústí do drah soustředěného odtoku. Směr proudění vody je ovlivněn agrotechnickými operacemi.	Proudění vody není závislé na použité agrotechnologii, ale na morfologii terénu.	Proudění vody není závislé na použité agrotechnologii, ale na morfologii terénu.
Šířka příčného profilu je malá vzhledem k hloubce.	Šířka příčného profilu bývá obvykle velká vzhledem k hloubce. Tvar břehů zatím není jednoznačně definován.	Šířka příčného profilu strže obvykle koreluje s hloubkou strže. Břehy jsou strmé. Náhlé změny hloubky dna strže jsou významné.
Rýhy jsou obvykle zahlazeny pomocí agrotechnologií a jejich znovuobjevení je závislé na vlastnostech zvolené agrotechnické operace v dalším vegetačním období.	Hluboké efemérní rýhy jsou obvykle zahlazeny pomocí agrotechnologií a k jejich znovuobjevení dochází na stejných místech během dalšího vegetačního období.	Strže nejsou zahlazovány pomocí agrotechnologií.
Odnos půdy bývá plošný.	Půda je odnášena z úzkých pásů (z drah soustředěného odtoku) do hloubky orby, pokud je zemina pod touto vrstvou dostatečně rezistentní vůči erozi. Případně může docházet k oderodování i hlubších vrstev, a to v případě, že se pod oranou vrstvou nachází vrstva nedostatečně odolná vůči erozi.	Zemina je erodována do velkých hloubek, často až na skalní podloží.
Oddělení půdních částic nastává především vlivem dopadu dešťových kapek.	Rozrušení půdních částic i jejich transport způsobuje především povrchový odtok.	Rozrušení půdního materiálu je způsobeno především povrchovým odtokem, sesuvem nestabilních svahů strže a zahlazováním stupňů ve dně strže. Transport půdních částic zajišťuje soustředěný povrchový odtok.

2.4. Hluboké efemérní rýhy

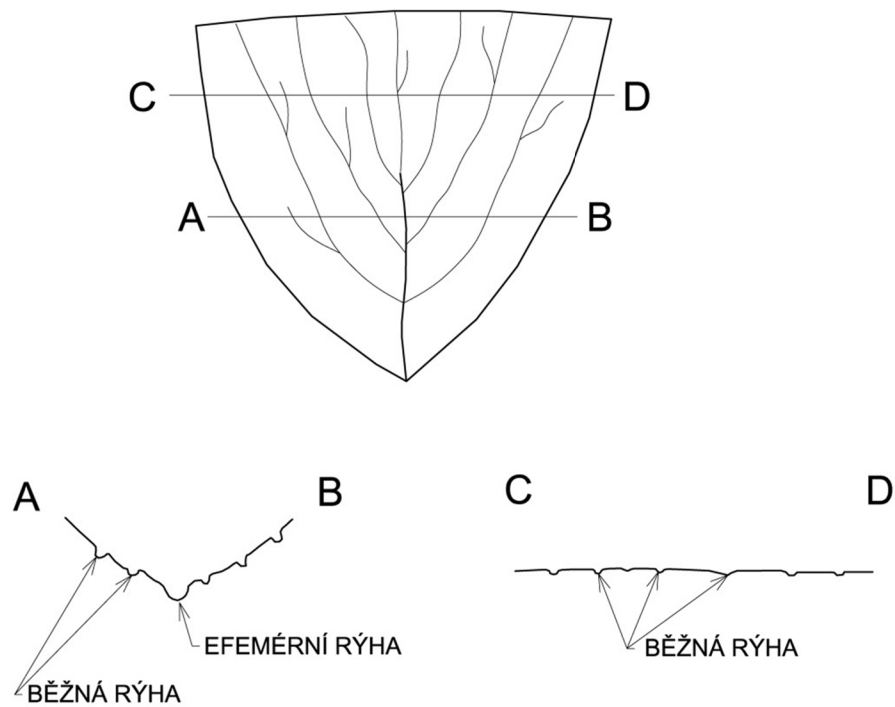
2.4.1. Popis hlubokých efemérních rýh

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 a kol., 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 znovuobjevení 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 a kol., 1996). Efemérní rýhy v DSO bývají obvykle větší než běžné rýhy a zároveň menší než permanentní strže. Vyskytují se většinou v místech, která jsou obklopována zemědělsky využívanými konvexně-konkávními svahy.

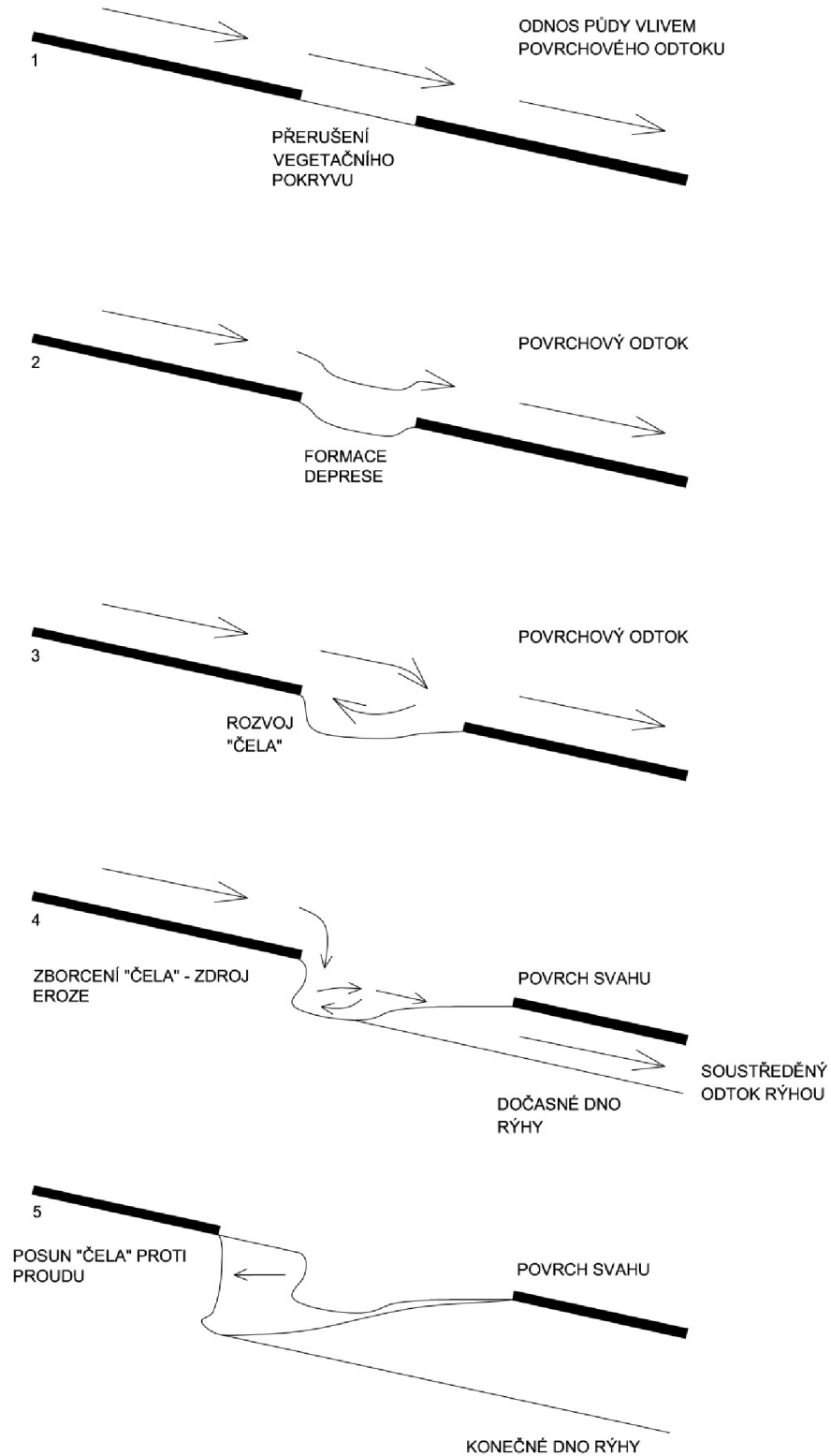
Rozdíl mezi běžnými rýhami a hlubokými efemérními rýhami dokumentuje také obrázek Obr. 3. Běžné rýhy se na zemědělském pozemku objevují ve větším množství a jejich každoroční výskyt je velmi závislý na konkrétních agrotechnických postupech. Oproti tomu efemérní rýhy se znovuobjevují na stejných místech – v drahách soustředěného povrchového odtoku.



Obr. 3: Znárodnění rozdílu mezi běžnými rýhami a efemérodními rýhami (U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service, 1992)

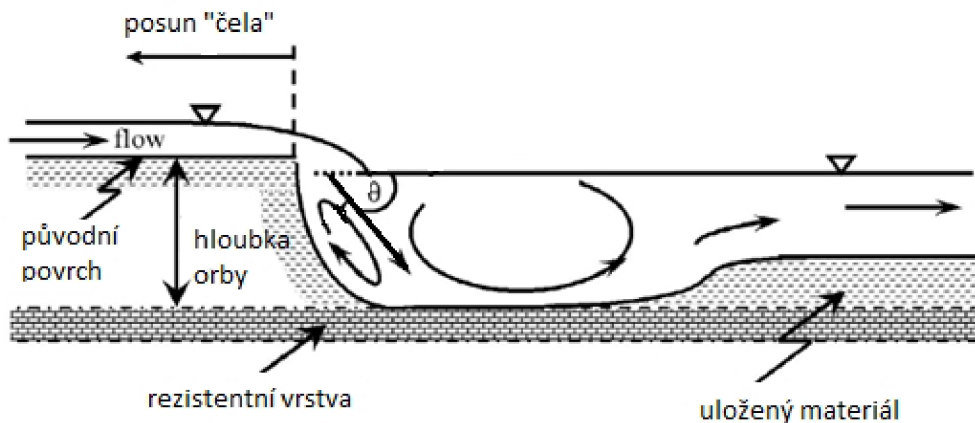
2.4.2. Tvorba a vznik efemérodních rýh

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 efemérodní rýhy tak, jak ho popsal Morgan (2005) je znázorněn na Obr. 4.



Obr. 4: 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. 5.



Obr. 5: 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. Měření provedená na jihovýchodě Sydney v Austrálii prokázala, že eroze bočních stěn (bočnic, břehů) je mnohem významnější co do množství oderodovaného materiálu (Morgan, 2005).

2.4.3. Faktory ovlivňující vznik efemérních rýh

Faktorů ovlivňujících dynamiku tvorby efemérních rýh je celá řada a je možné je rozdělit do následujících skupin:

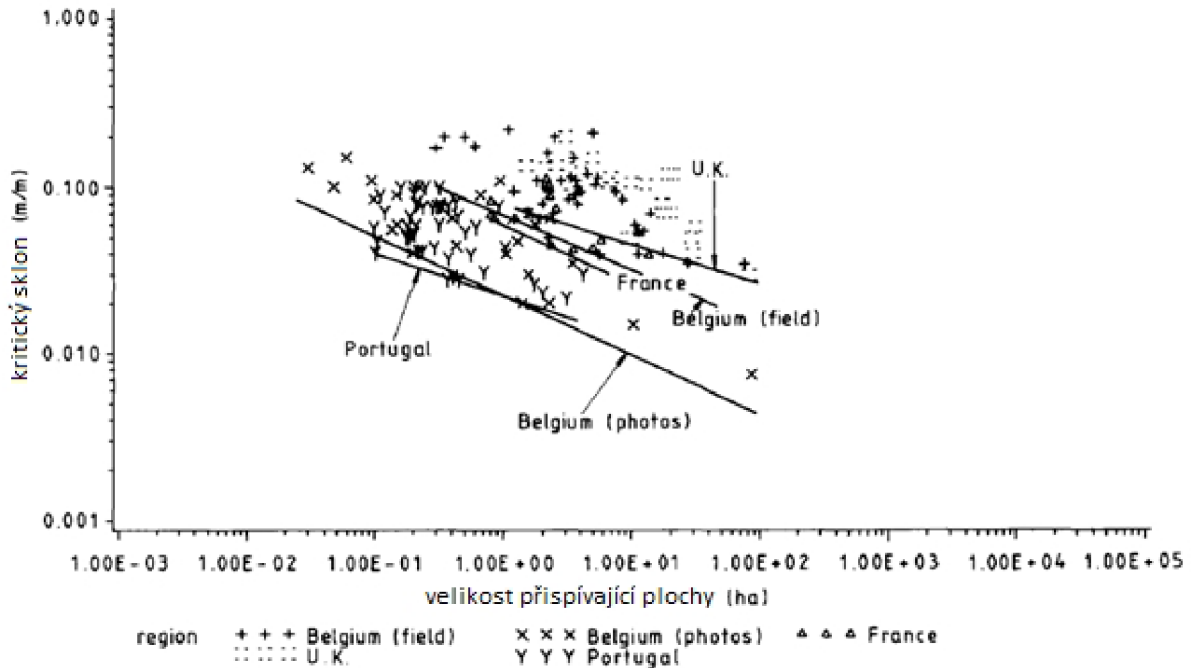
- morfologie terénu;
- vlastnosti srážky a povrchového odtoku;
- vlastnosti půdy a geologického podkladu;
- vlastnosti pokryvu půdy (vegetace);
- půdní management.

Morfologie terénu

Základní morfologické parametry určující rozsah eroze jsou sklon, délka svahu a velikost přispívající plochy rýhy. Několik zahraničních autorů se zabývalo problematikou stanovení

závislosti mezi tzv. kritickým sklonem údolnice a kritickou velikostí přispívající plochy svahu, při které existuje riziko vzniku eroze v efemérních rýhách.

Vandaele a kol. (1996) uskutečnil výzkum, v rámci něhož byly v několika evropských zemích měřeny velké počty DSO, ve kterých došlo ke vzniku eroze. Pro každou DSO byl následně zjištěn maximální sklon terénu. V místě maximálního podélného sklonu svahu byl dle autora předpokládán počátek hluboké efemérní rýhy. K tomuto místu byla určena velikost přispívající plochy. Výsledky měření jsou uvedeny v následujícím grafu, v němž jsou měření rozdělena dle států, ve kterých vznikla.



Graf 1: Graf zjištěných maximálních sklonů svahů a velikostí přispívajících ploch (Vandaele a kol., 1996)

Měřenými hodnotami byly prokládány dolní obalové křivky za účelem stanovení tzv. kritického sklonu údolnice (ztotožňován s kritickým sklonem DSO) a kritické velikosti přispívající plochy. Analytickým vyjádřením dolních obalových křivek je dle autora provedených měření následující mocninná funkce:

$$S_{cr} = aA^{-b}, \quad (2.6)$$

kde:

S_{cr} kritický sklon svahu [$m \cdot m^{-1}$];

A přispívající plocha svahu [m^2];

a, b koeficienty závislé na vlastnostech půdy a klimatu [-].

Vandaele a kol. dále provedl srovnání výše uvedených koeficientů a, b získaných z měření v jednotlivých státech s koeficienty, jež jsou uváděny jinými autory, kteří prováděli měření nejen v Evropě, ale i ve Spojených státech amerických. Dosažené hodnoty koeficientů jsou uvedeny v následující tabulce (Vandaele a kol., 1996).

Tab. 2: Srovnání zjištěných koeficientů dosazovaných do rovnice pro výpočet kritického sklonu svahu

Autor (rok), příp. oblast výzkumu	Koeficienty zjištěné při jednotlivých výzkumech	
	a	-b
Vandaele a kol. (1995), centrální Belgie	0.025	-0.40 až -0.35
Govers (1991)	0.0035	-0.40
Poesen a kol. (1995)	0.08	-0.40 až -0.30
Boardman (1992)	0.09	-0.25
I.G.N. (1983)	0.06	-0.40
Vandaele a kol. (1995), Portugalsko	0.02	-0.35
Montgomery a Dietrich (1988), Oregon	0.25	-0.40
Montgomery a Dietrich (1988), Kalifornie	0.27	-0.40
Montgomery a Dietrich (1988), Sierra Nevada	0.35	-0.60
Patton a Schumm (1975)	0.16	-0.26

Vandaele a kol. (1996) uvádí, že u evropských měření se koeficient a pohyboval v rozmezí 0.025 ~ 0.35 a koeficient b v rozmezí -0.40 ~ -0.26.

Výše popsané vztahy a koeficienty vycházejí z výzkumů provedených v Belgii, Portugalsku a Velké Británii. V případě aplikace v jiných geologických, půdních, klimatických nebo vegetačních podmínkách se mohou měnit.

Poesen uvádí, že na velikost koeficientu a má vliv především typ pokryvu. Koeficient $-b$ je dle autora závislý na vlastnostech srážek, typu pokryvu i půdních charakteristikách. Pro zemědělsky neupravovaná území je například koeficient a mnohem větší než pro ornou půdu. Na orné půdě jsou její typ a vlhkost klíčovými činiteli ovlivňujícími vztah pro výpočet kritického sklonu svahu (Poesen, 2011).

Casalí a kol. (2000) ve své práci definuje tzv. index AS . Jedná se o vážený průměr sklonu povodí vynásobený velikostí celkové přispívající plochy:

$$AS = A \frac{\sum_{i=1}^n Ap_i S_i}{\sum_{i=1}^n Ap_i} = \sum_{i=1}^n Ap_i S_i, \quad (2.7)$$

kde:

A celková přispívající plocha povodí [m^2];

Ap_i dílčí část přispívající plochy s homogenním sklonem [m^2];

S_i sklon dílčí části přispívající plochy [-].

Autor konstatuje, že čím je vyšší hodnota tohoto indexu, tím vyšší je objem oderodovaného materiálu z rýhy. Na základě testování tohoto vztahu na velkém vzorku měřených rýh v Portugalsku byla korelace mezi hodnotou AS indexu a objemem oderodovaného materiálu ověřena.

Capra (2009) počítá závislost oderodovaného objemu na délce rýhy pro každé z měřených vegetačních období podle následujícího vztahu:

$$V = a \cdot L^b, \quad (2.8)$$

kde:

V objem rýhy [m^3];

L délka rýhy [m];

a, b regresní koeficienty.

V rámci erozního procesu může část odděleného materiálu sedimentovat přímo v rýze, a proto nelze celkové oderodované množství volumetricky přesně změřit. V rámci zjednodušení je proto hodnota oderodovaného objemu ztotožněna s objemem rýhy. Výsledné koeficienty pro jednotlivá období jsou uvedeny v Tab. 3, kde R^2 značí koeficient determinace, n počet měření a P je hladina významnosti. Capra usuzuje, že koeficient b je závislý na srážkových jevech v daném roce.

Tab. 3: Parametry regresních vztahů pro jednotlivá vegetační období (Capra, 2009)

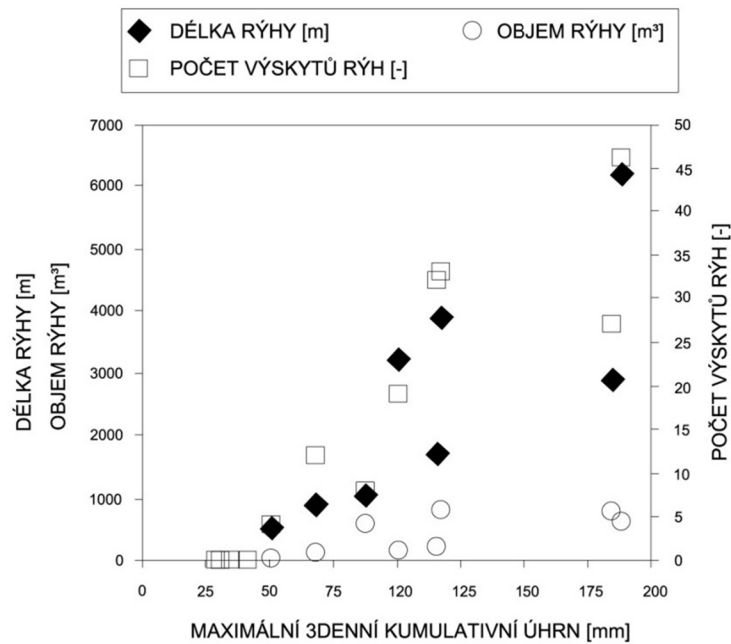
Období	a	b	R^2	n	P
1995-1996	0.0017	1.5898	0.801	19	≤ 0.001
1996-1997	0.9735	0.2901	0.007	4	-
1997-1998	0.0180	1.3885	0.548	17	≤ 0.001
1999-2000	0.0050	1.5382	0.653	46	≤ 0.001
2003-2004	0.0049	1.6530	0.707	33	≤ 0.001
2004-2005	0.0109	1.4381	0.701	12	≤ 0.001
2005-2006	0.0179	1.4503	0.630	26	≤ 0.001
2006-2007	0.0023	2.0787	0.839	8	≤ 0.001

Vlastnosti srážky

Poesen (2011) uvádí práh denního úhrnu srážky, od kterého dochází k erozi v hlubokých efemérních rýhách. Tento je mírně vyšší než práh tvorby rýhové eroze a pohybuje se od 14,5 do 22 mm. Práh je závislý na stupni půdní konsolidace. Rozsáhlý výzkum v Belgii ukázal, že v zimě je práh nižší (cca 15 mm) a na začátku léta vyšší (cca 18 mm), což je vysvětlováno různými vlhkostními podmínkami v těchto ročních obdobích. Poesen však uvádí, že je velmi obtížné generalizovat tyto výsledky na jiné oblasti a to především z důvodu nedostatku jiných studií pro ověření výše uvedených hodnot. Důvodem nízkého počtu výzkumů v této oblasti je především častá neznalost vlastností srážky, která byla příčinou vzniku rýhy (Poesen, 2011).

Kromě srážkového úhrnu je důležitým faktorem i intenzita srážkové události, délka jejího trvání a především nasycenost půdního profilu na počátku srážkové činnosti.

Na základě velkého vzorku téměř 200 rýh měřených v Itálii během let 1995 až 2007 byl zjištěn silný vztah mezi maximálním 3denním kumulativním úhrnem a parametry měřených rýh, tj. jejich objemem a délkou (viz Graf 2) (Capra, 2009).



Graf 2: Závislost parametrů rýhy na max. 3denním kumulativním úhrnu (Capra, 2009)

Vlastnosti povrchového odtoku

Voda dopadající na zemský povrch ve formě pevných nebo kapalných atmosférických srážek se po určitém čase začne pohybovat ve směru gravitace jako povrchový odtok. Tento okamžik nastává, když intenzita deště překročí vsakovací schopnost půdy sečtenou s dalšími hydrologickými ztrátami v povodí. V posledních dekádách je zaznamenáván pokles ročního úhrnu srážek, mění se dynamika srážek a stále častěji jsou pozorovány srážky s vysokou intenzitou a krátkou dobou trvání. Prodlužující se sucha vedou k ústupu vegetace z rozsáhlých ploch, které takto nechráněné proti splachu tvrdnou (Münster, 2007).

Nachtergaele a kol. (Nachtergaele, 2002) určili vztah mezi průměrnou šířkou rýhy a kulminačním průtokem:

$$W = aQ^b, \quad (2.9)$$

kde:

W průměrná šířka rýhy [m];

Q kulminační průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

a koeficient [-];

b koeficient pohybující se pro efemérní rýhy okolo 0.4 [-].

Autor uvádí, že tento vztah je platný pouze pro povodí s relativně homogenními půdními vlastnostmi, především s hloubkou na erozi náchylné orané vrstvy. Dále platí, že v případě, že je hloubka lépe oderodovatelné půdní vrstvy malá, např. v případě zmrzlé vrstvy těsně pod povrchem nebo v případě přítomnosti mělce uložených neoderodovatelných půdních

materiálů, bude průměrná šířka výrazně větší, než jak by jí udávala výše popsaná rovnice (Nachtergaele, 2002).

Mnoho autorů se zabývá vlivem smykového napětí způsobeného povrchově proudící vodou v rýze. Jako první popsal význam smykového napětí pro vznik rýh Horton (Horton, 1945). Uvádí vztah pro výpočet smykového napětí:

$$\tau = \rho g h s, \quad (2.10)$$

kde:

τ smykové napětí od povrchově odtékající vody [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$];

ρ objemová hmotnost vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

g tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];

h výška odtékající vody [m];

s sinus úhlu svírající povrch svahu s vodorovnou rovinou [-].

Řada autorů uvádí různé modifikace vztahu pro výpočet kritického smykového napětí způsobeného povrchově odtékající vodou, při jejímž překročení dochází k erozi.

Ukázalo se, že pro oddělení prachových půdních částic postačí smykové napětí menší než 1 Pa. Holé půdy se značnou kohezí dosahují kritického smykového napětí okolo 4 Pa. Hodnota smykového napětí může být i značně vyšší a je velmi závislá na vlastnostech dané půdy (její zrnitosti, obsahu jílu, obsahu vody a chemismu půdy). Podstatným činitelem ovlivňujícím pevnost ve smyku dané půdy je také zemědělský management. Bylo zjištěno, že neorané půdy mívají oproti oraným dvojnásobnou pevnost. Podstatným faktorem je také typ pokryvu a stupeň zpevnění půdy kořeny rostlin (Poesen, 2011).

Smykovému napětí potřebnému pro vývoj efemérních rýh není v literatuře věnováno mnoho prostoru. Poesen (2011) uvádí několik závěrů z výzkumů, kde bylo zjišťováno reálné smykové napětí při tvorbě efemérních rýh. Při jednom z výzkumů bylo zjištěno kritické smykové napětí při dosažení kulminace odtoku v rýhách od 3.3 do 32.2 Pa (průměrně 14 Pa). Jednalo se o rýhy zkoumané v Belgii na jílovitohlinitých půdách. V Portugalsku na písčitéch půdách s obsahem kamenů bylo zjištěno podstatně větší kritické smykové napětí: od 16.8 po 74.4 Pa. V obou případech měla území stejný zemědělský management. Autor vysvětluje rozdíl v dosaženém napětí odlišnými půdními typy. V případě Portugalského výzkumu byl navíc zjištěn mnohem větší obsah velkých kamenů (cca 30%) v půdě. Je prokázáno, že kamenité půdy jsou méně náchylné ke vzniku eroze vlivem proudění vody.

Vandaele a kol. (1996) uvádí vztah pro stanovení kritického smykového napětí, při kterém dochází k iniciaci rýh:

$$\tau_{cr} = (c\rho)A^{rf}s, \quad (2.11)$$

kde:

- τ_{cr} kritické smykové napětí [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$];
- A přispívající plocha svahu [ha];
- s sklon svahu [$\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$];
- rf součinitel;
- c konstanta;
- ρ objemová hmotnost vody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

Součinitel rf se pohybuje v rozmezí hodnot 0.2 až 0.4.

Vlastnosti půdy a geologického podkladu

Působení geologických poměrů na vznik a průběh eroze se uplatňuje přímo, a to odolností obnaženého podkladu vystaveného styku s tekoucí vodou a ovzduším a nepřímo působením na povahu půdního substrátu, jehož vlastnosti jsou dány druhem geologického podkladu. Příímý vliv geologického podkladu se projevuje zejména v místech, v nichž snadno větřající podložní hornina vystupuje těsně k povrchu území a je obnažena rýhovou či stržovou erozí. Poté obvykle dochází k rychlému rozrušení této horniny a k prohloubení rýh či strží (Holý, 1978).

Půdní poměry, jež jsou souhrnem jednotlivých vlastností půdy, se projevují působením na velikost a časový průběh infiltrace srážkové vody do půdy a působením na odolnost půdy vůči destruktivnímu účinku dešťových kapek a povrchově stékající vody (Holý, 1978).

Jednou z půdních charakteristik je objemová hmotnost, která je také proměnná v čase. Ta se mění na základě typu a doby zpracování půdy, povětrnostních podmínek atd.

Pro vznik rýh je nejdůležitějším ukazatelem odolnost půdy vůči rozrušení, které je způsobené povrchově odtékající vodou. Byly vytvořeny stupnice, v nichž je vyjádřena odolnost jednotlivých typů půdy s přihlédnutím k její struktuře a typu obdělávání (Poesen, 2011).

Zanášení a kornatění půd zásadně mění schopnost infiltrace. Ucpávání půdních pórů jemnými částicemi při povrchovém (třeba i nepatrném) splachu způsobuje utěsnění svrchní vrstvy půdy. Vandaele a kol. (1996) studoval rychlost utěsnění povrchu po zemědělských přípravách půdy pro setí v závislosti na kumulaci dešťových srážek. Výsledek ve střední Belgii ukázal, že přijde-li první dešť krátce po úpravě půdy, je zanášení pórů velice rychlé a vysoké procento zemědělské půdy je utěsněno již několik dní po úpravách.

Podle Römkense (Römken a kol. in Münster, 2007) dochází k uzavírání pórů také při dopadu dešťových kapek na odhalený povrch půdy, čímž trpí struktura půdního povrchu. Rychlost degradace povrchové struktury závisí na přítomnosti stabilizačních prvků, jako jsou

karbonáty, sesquioxidy (hydroxidy Fe a Al) a množství organického materiálu. Vedle zanášení jsou infiltrační kapiláry uzavírány také za přítomnosti smektitických jílovitých minerálů, které mohou po absorpci vody zvětšit svůj objem až na 1500% původní velikosti (Münster, 2007).

Po vysušení se svrchní vrstva stává nepropustnou, obzvláště u hlinitých půd s vysokým obsahem písku. Veškerá voda pak odtéká povrchově. Zvyšuje se rychlost odtoku a náchylnost k erozi. Kornatění půd má ale i opačný účinek. Zvyšuje pevnost ve smyku na povrchu a činí půdu odolnější proti erozi. Rýhy se tak mohou vyvíjet pouze v trhlinách nepropustné kůry (Münster, 2007).

Vlastnosti pokryvu půdy

Obecně se vliv vegetačního pokryvu na smyv půdy projevuje ochranou povrchu před destruktivním působením dopadajících dešťových kapek a zpomalováním rychlosti povrchového odtoku. Nepřímo pak působením vegetace na půdní vlastnosti, zejména na pórovitost a propustnost, včetně omezení možnosti zanášení porů jemnými půdními částicemi a mechanickým zpevněním půdy kořenovým systémem.

Ochranný vliv vegetace je přímo úměrný pokryvnosti a hustotě porostu v době výskytu přívalových dešťů (převážně duben – září). Proto dokonalou protierozní ochranu představují porosty trav a jetelovin, zatímco běžným způsobem pěstované širokořádkové plodiny (kukuřice, okopaniny, sady a vinice) chrání půdu nedostatečně (Janeček a kol., 2012). V případě kukuřice je dalším nepříznivým faktorem i tvorba vzdušných kořenů nad povrchem půdy, které v případě povrchového odtoku přispívají k tvorbě turbulentního proudění vody.

Vliv managementu půdy

Použitý typ zpracování půdy má vliv na drsnost půdního povrchu, objemovou hmotnost půdy i hydraulickou vodivost.

Nejlepší podmínky pro vznik rýh představuje čerstvě zoraná půda, nebo půda, na jejímž povrchu je vytvořená krusta a to v kombinaci s odtoky způsobenými přívalovými srážkami, jejichž kulminační průtok dosahuje hodnot několika $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Typ půdy a vertikální rozložení rezistence půdy vůči rozrušení jsou hlavními faktory, které ovlivňují velikost objemu eroze z efemérních rýh.

Pro potřeby odhadu vodní eroze metodou USLE (Wischmeier a Smith, 1978) bylo stanoveno 5 období dle typu agrotechnických prací či aktuálního stavu půdy mezi těmito pracemi:

- období podmítky a hrubé brázdy;
- období od přípravy pozemku k setí do jednoho měsíce po zasetí nebo sázení;
- období po dobu druhého měsíce od jarního nebo letního setí či sázení, u ozimů do 30.4.;
- období od konce 3. období do sklizně;

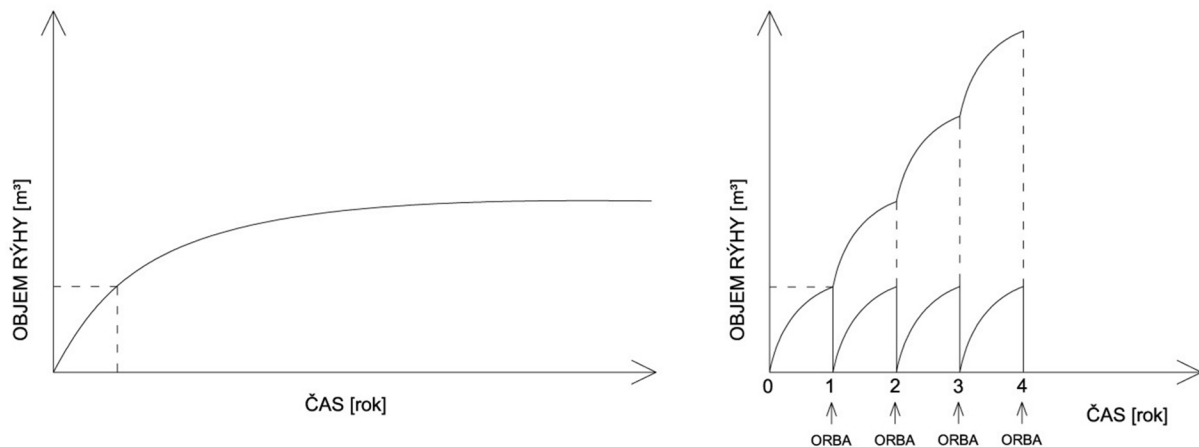
- období strniště (Janeček a kol., 2012).

V druhém jmenovaném období má půda menší objemovou hmotnost a zároveň je hodnota kritického smykového napětí pro daný povrch menší.

Pod vrstvou zemědělsky obdělávané půdy se nachází půda, která je dostatečně konsolidovaná a kritické smykové napětí je u ní vyšší. Tato půda je již obtížně erodovatelná. Odtok obvykle způsobí rychlý odnos svrchní nakypřené vrstvy a při kontaktu s konsolidovaným povrchem dochází ke snížení množství erodovaného materiálu a zpomalení procesu rozšiřování rýhy.

Poesen zdůrazňuje vliv zemědělského managementu a tedy i stavu půdy na dočasný vznik rýh. Na grafu (Graf 3) je porovnání teoretického kumulativního objemu v případě bezorebných (vlevo) a orebných postupů (vpravo) (Poesen, 2011). Toto srovnání nezohledňuje jiné přispívající faktory, jako je druh pěstované plodiny, vlastnosti srážek a půdy.

V prvním případě dochází k postupnému zvětšování objemové hmotnosti zeminy a tím i ke zvětšování odolnosti půdy vůči rozrušení. V druhém případě jsou efemérní rýhy každoročně zahlazeny – vyplněny méně rezistentní půdou, která je náchylná k erozi. Navíc je povrch půdy drsnější, což způsobuje zpomalení odtoku a snížení jeho objemu.



Graf 3: Srovnání vývoje objemu rýhy při bezorebných postupech a při použití orby

2.4.4. Transport částic vlivem působení soustředěného odtoku

Morgan (2005) uvádí, že k transportu částic dochází až do chvíle, kdy rychlost proudění klesne pod rychlost sedimentace (v_s) daných částic půdy. Sedimentační rychlost vychází ze Stokesova zákona a má tvar:

$$v_s = \frac{2gr(\rho_s - \rho)}{9\mu}, \quad (2.12)$$

kde:

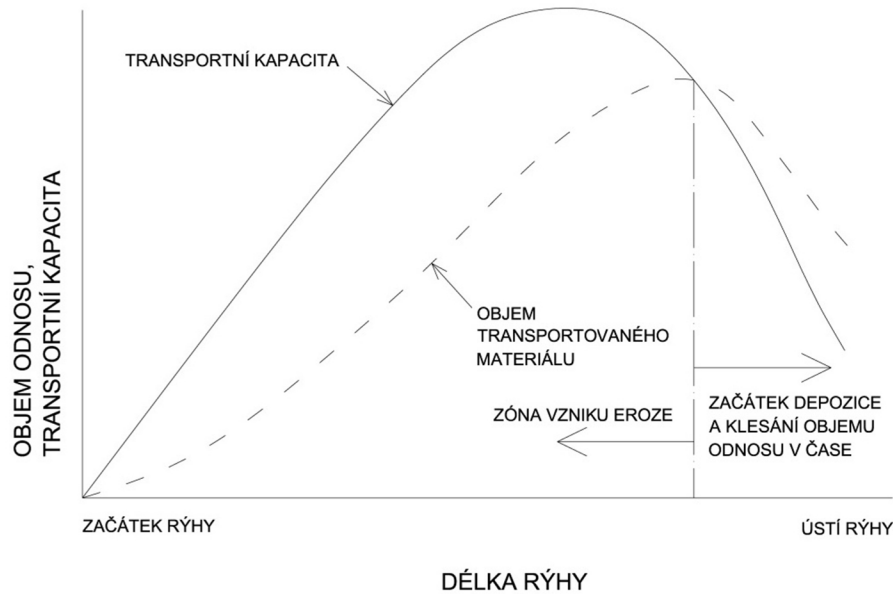
- g tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];
- r poloměr částic půdy [m];
- ρ_s objemová hmotnost půdy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
- ρ objemová hmotnost vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
- μ dynamická viskozita vody [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$].

Foster tuto problematiku ve svém příspěvku (Foster, 1986) popisuje podrobněji. Podle něj platí, že množství materiálu transportovaného povrchovým odtokem je limitováno buď transportní kapacitou odtoku, nebo množstvím materiálu vhodným k transportu. Transportní kapacita je definována jako maximální množství materiálu, které může být povrchovým odtokem v daném čase nesen. Rozhoduje vždy menší ze dvou výše uvedených vstupů.

Původ půdního materiálu vhodného k transportu v hluboké efemérní rýze může být tedy z:

- rýhové a plošné eroze vzniklé v přispívající ploše efemérní rýhy;
- eroze vzniklé v samotné efemérní rýze výše po svahu.

Množství transportovaného materiálu roste podél rýhy vlivem dotace materiálu z přispívající plochy a dále vlivem detašování materiálu ve výše ležícím úseku rýhy. Transportní kapacita se zvyšuje se zvyšováním průtoku v rýze. Rovněž platí, že se transportní kapacita zvyšuje se zvyšováním podélného sklonu a naopak.

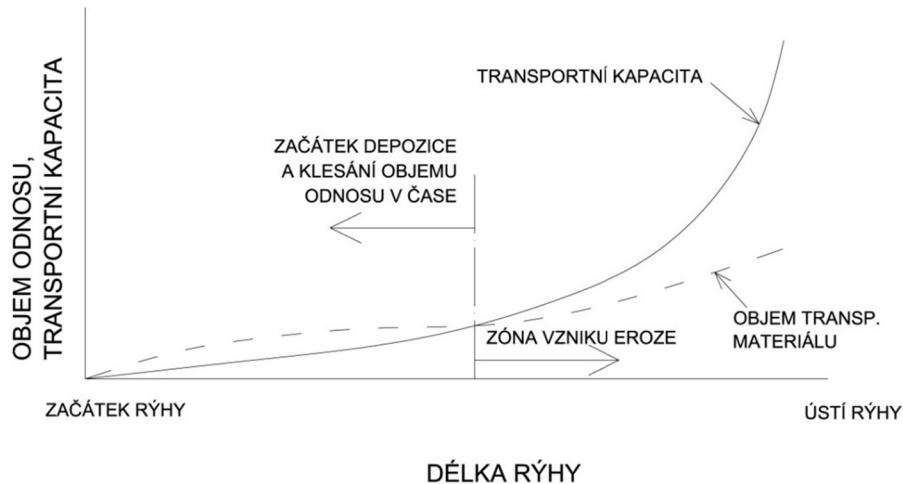


Graf 4: Průběh změny množství transportovaného materiálu a velikosti transportní kapacity podél konkávních svahů (Foster, 1986)

Podélný profil řady rýhy má konkávní tvar s postupně klesajícím podélným sklonem po délce svahu. V případě významného poklesu podélného sklonu DSO se transportní kapacita vyrovná s množstvím neseného materiálu a začíná docházet k ukládání materiálu až k ústí dané rýhy (Foster, 1986) (viz Graf 4). V případě mírně konkávního tvaru svahu se nemusí depozice v rámci rýhy vůbec uskutečnit.

V případě konstantního sklonu svahu podél celé rýhy je depozice materiálu v rýze závislá na objemu povrchového odtoku a objemu materiálu přicházejícího z přispívající plochy. V případě, že se depozice uskuteční, probíhá podél celé rýhy.

V případě konvexních profilů (Graf 5) se depozice vyskytuje častěji v horní části svahu, kde je podélný sklon relativně malý. Transportní kapacita se zvyšuje podél svahu rychleji než objem erodovaného materiálu, což je příčinou snižování depozice materiálu a započítí eroze dále po svahu. Kombinace velkého sklonu a vysokého průtoku pak může vést k vysokému objemu eroze.



Graf 5: Průběh změny množství transportovaného materiálu a transportní kapacity podél efemérní rýhy s konvexním tvarem podélného profilu (Foster, 1986)

Foster (1986) hovoří o teorii, která předpokládá, že intenzita oddělování částic závisí na podílu hmotnosti materiálu neseného v povrchově odtékající vodě a transportní kapacity:

$$D_f = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c}\right), \quad (2.13)$$

kde:

D_f intenzita oddělování částic půdy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$];

D_c maximální intenzita oddělování částic půdy proudem [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$];

G aktuální množství splavenin nesených v povrch. odtékající vodě [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$];

T_c transportní kapacita [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$].

Z výše uvedené teorie vyplývá, že čím je nižší podíl materiálu neseného povrchově odtékající vodou, tím je eroze v tomto úseku vyšší.

D_c je možné spočítat následovně:

$$D_c = K_c(\tau) - \tau_{cr}, \quad (2.14)$$

kde:

K_c faktor erodovatelnosti půdy vlivem proudění vody [-];

τ smykové napětí vyvolané proudící vodou [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$];

τ_{cr} kritické smykové napětí potřebné k oddělení částic půdy [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$].

Transportní kapacita T_c , která určuje maximální možnou koncentraci plavenin za daného odtoku je funkcí smykového napětí vyvolaného odtokem (Zhang a kol., 2008):

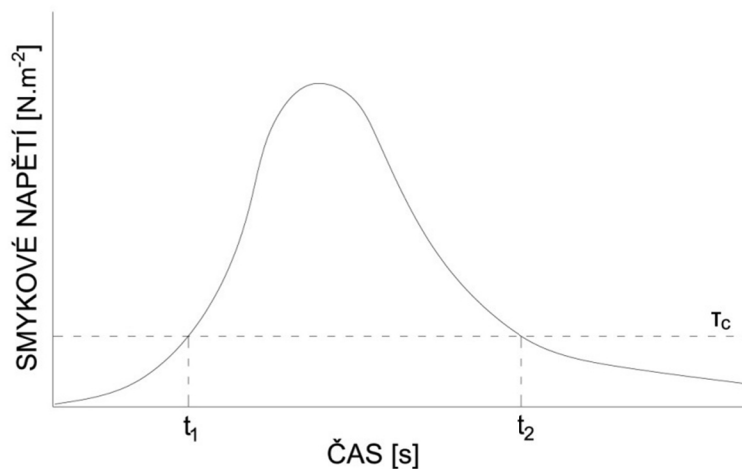
$$T_c = K_t \tau^{\frac{3}{2}}, \quad (2.15)$$

kde:

K_t koeficient transportu půdního materiálu [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$];

τ smykové napětí vyvolané proudící vodou [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$].

Koeficient K_t závisí na zrnitosti a hustotě erodovaného materiálu. Na grafu (Graf 6) je vidět typický průběh smykového napětí během povrchového odtoku s vyznačením času zahájení (t_1) a ukončení (t_2) oddělování půdních částic.



Graf 6: Změna smykového napětí v čase (Foster, 1986)

2.5. Eroze z tání sněhu

Problematika stanovení eroze způsobené táním sněhu je v České republice zatím poměrně málo rozpracovaná vzhledem k poměrně obtížnému stanovení jednotlivých faktorů, které mají na intenzitu eroze vliv. Škody způsobené erozí z tajícího sněhu, zejména v předjarním období, jsou však někdy značné (Toman a Podhrázská, 2002).

Hlavním rysem eroze z tání sněhu je opětovné zamrzání půdy ve studené periodě. V této době je voda vyloučená z půdy agregována do ledových krystalů okolo půdních hrudek. Ledové krystalky při svém formování částečně rozmělnují půdní hrudky, a proto je mnoho kvalitních půdních částic (agregátů) rozplaveno s příchodem tání. Zvláště v povrchových vrstvách tak narůstá rozrušení půdních hrudek a přesycení vodou během opětovného zamrznutí. Tím se zadržuje odtok vody z tání sněhu z povrchu půdy, roztátá půdní vrstva nabývá blátivou podobu a má sklon k tečení (Toman a Podhrázská, 2002).

Jiným efektem mrznutí půdy, který zvyšuje její erodovatelnost v jarních měsících, je silně snížená rychlost průsaku vody do spodních vrstev půdy. Proto v povrchové vrstvě vzniká relativně intenzivní eroze i tehdy, je-li množství tajícího sněhu malé. Vliv na urychlení těchto

erozních procesů má i oteplení doprovázené intenzivními relativně teplými dešti. Na jižních svazích je tání doprovázeno největšími škodami (Toman a Podhrázká, 2002).

Intenzita tání je podstatně nižší než intenzita dešťových srážek. Avšak rychlost vsakování je minimální a kolísá u hlinitých a jílovitých půd mezi 0.01 a 1.0 mm·den⁻¹, protože půda je v zimě promrzlá a v povrchových vrstvách nasycená vodou. Povrchový odtok probíhá hlavně v době tání, kdy během 10 až 20 dnů taje podstatná část sněhu (Toman a Podhrázká, 2002).

Ačkoliv eroze způsobená sněhovou vodou nedosahuje stejné intenzity jako eroze dešťová, ovlivňuje rozsáhlá území slabě chráněná vegetací a základním následkem je odnášení půdy (Toman a Podhrázká, 2002).

2.6. Výzkum efemérních rýh v České republice

V roce 2010 a 2011 byla pro Ministerstvo zemědělství ČR provedena identifikace a zakreslení 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 zakreslení nestabilizovaných drah soustředěného odtoku byly provedeny na základě vizuálního vyhodnocení erozních projevů viditelných na ortofotomapách, výpočtu akumulace odtoku vody z území a interpretace charakteru terénu na dotčených půdních blocích. Součástí výstupu je databáze se stanovenou strukturou položek, která charakterizuje lokalizaci a charakter jednotlivých identifikovaných a zakreslených drah soustředěného odtoku vody.

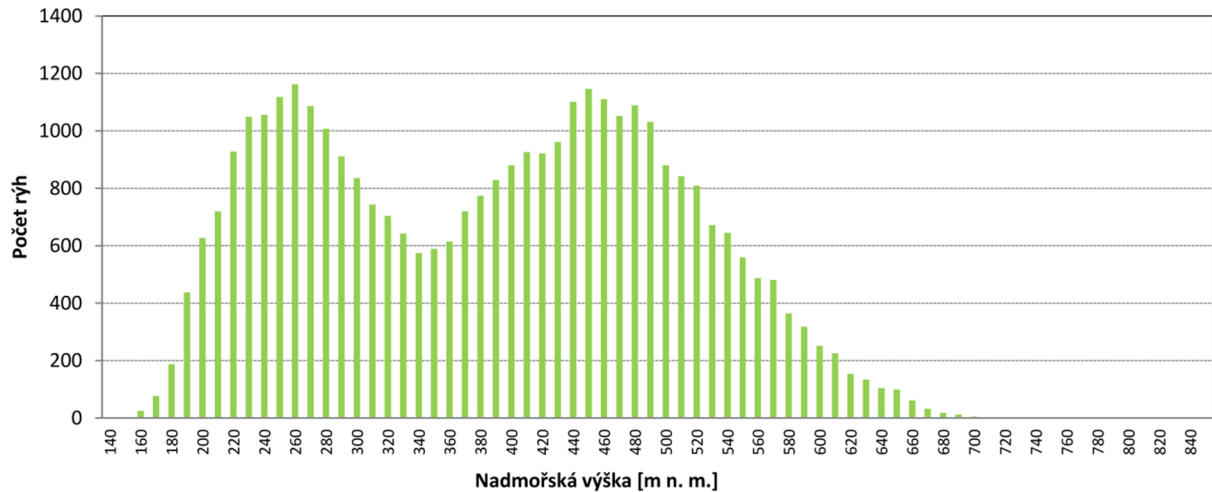
V roce 2011 proběhlo přesné vymezení přispívajících ploch, kalkulace výměr a jejich přiřazení k odpovídajícím drahám odtoku. Vymezení přispívajících ploch proběhlo na základě odtokové analýzy nad digitálním modelem terénu, automatizovaným vymezením přispívajících ploch a manuální korekcí s využitím rastrových topografických map, leteckých ortofotomap a směrů akumulací 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).

Tab. 4: Základní parametry erozně ohrožených DSO (Ekotoxa, 2011)

Identifikovaných a zakreslených segmentů DSO celkem	33 345
Celková délka všech DSO	11 963 km
Medián délky / minimální / maximální délka DSO	283 m / 44 m / 5 421 m
Medián sklonu / minimální / maximální sklon DSO	2.3° / 0.1° / 12.5°
Počet zasažených půdních bloků osou DSO / DSO při šířce pásu 20 m	32 828 / 32 867
Počet zasažených uživatelů osou DSO / DSO při šířce pásu 20 m	6 299 / 6 314

V následujícím grafu je uvedena četnost výskytu identifikovaných drah soustředěného odtoku na nadmořské výšce. Je patrné, že většina identifikovaných DSO se nachází v nadmořské výšce do 600 m n. m., což souvisí s výskytem orné půdy v ČR. Četnost zastoupení výskytu DSO na nadmořské výšce má dva vrcholy, jeden kolem 250 m n. m. (intenzivní úrodné oblasti zvlhčeného charakteru s vysokým stupněm zornění) a druhý kolem nadmořské výšky 450 m n. m. (podhorské oblasti s výskytem orné půdy).



Graf 7: Četnost zastoupení identifikovaných DSO dle nadmořských výšek (Ekotoxa, 2011)

Součástí identifikace a zákresu DSO bylo i posouzení jejich stabilizace v minulosti s využitím historických map. Z níže uvedené tabulky (Tab. 5) je patrné, že každá druhá v současnosti nestabilizovaná erozně ohrožená DSO byla v minulosti stabilizována (51.7 %). Čtvrtina DSO byla v minulosti stabilizována na celé ploše (délce). Tyto informace poukazují především na zastoupení krajinného prvku (zatravněná údolnice) v minulosti.

Z posouzení erozní ohroženosti DSO vizuální interpretací leteckých snímků vyplývá, že téměř 10% identifikovaných erozně ohrožených drah soustředěného odtoku vody z pozemku nese známky výrazného erozního projevu spojeného s odnosem zeminy. Nejvíce DSO s výraznými erozními projevy se nachází v pahorkatinách (např. jihovýchodní Morava).

Z rozboru větvení jednotlivých identifikovaných DSO vyplývá, že 90.3% se skládá pouze z jedné DSO. Necelých 10% se skládá alespoň ze dvou větví.

Velmi zajímavým statistickým ukazatelem je posouzení charakteru vyústění DSO. Charakter vyústění je důležitým ukazatelem i z hlediska případných škod na majetku v okolí půdních bloků s identifikovanými DSO. Největší část DSO ústí do vodních útvarů (33%). Do intravilánu ústí necelých 6% DSO.

Tab. 5: Rozdělení DSO dle vyústění (Ekotoxa, 2011)

Vyústění DSO	Počet DSO	Podíl DSO [%]
V (vodní útvary)	11 318	33.9
T (travní porosty)	6 006	18.0
P (přikopy)	5 968	17.9
L (lesy)	4 659	14.0
S (stabilizovaná DSO)	2 091	6.3
I (zastavěné území)	1 530	4.6
C (polní cesta)	1 290	3.9
Z (železniční násep)	268	0.8
J (jinam)	215	0.6
celkem	33 345	100

Na základě identifikace vodárenských nádrží (Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 137/1999 Sb.) a vymezení jejich sběrných území bylo zjištěno, že cca 4% všech DSO leží v těchto územích a potenciálně tedy ohrožují kvalitu vod ve vodárenských nádržích.

Cílem projektu bylo především vymezení erozně ohrožených DSO a jejich přispívajících ploch. Projekt byl vytvořen jako podklad vhodný pro nastavení dotačních podmínek případného zatravňování erozně ohrožených DSO. Cílem projektu však nebylo terénní šetření, které je nutné ke zjištění přesného průběhu nestabilizovaných drah soustředěného odtoku (Ekotoxa, 2011).

Výše 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 reálně vzniklých efemérních rýh a tedy ani jejich parametry (šířka, hloubka, objem odnosu půdy, příčinné faktory).

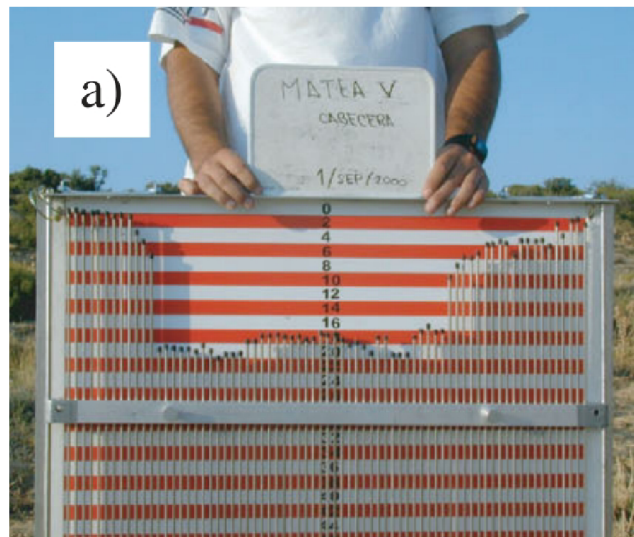
2.7. Volumetrická kvantifikace efemérních rýh

Volumetrická kvantifikace je způsob přímého měření objemu efemérních rýh. Popis volumetrické kvantifikace se objevuje v řadě zahraničních publikací.

Casali (2006) vytvořil srovnání všech běžně používaných metod měření rýh a konstatuje, že pro získání optimálního výsledku, je třeba vždy individuálně volit nejvhodnější možné postupy i měřící zařízení. Dále pojednává o přesnosti jednotlivých metod měření objemu rýh a vyhodnocuje 3 různé metody zaměření objemu se závěrem, že nejpřesnější a zároveň nejméně na vzdálenosti příčných profilů závislou metodou je metoda využívající mechanické zařízení využívající soubor jehel k vykreslení stavu příčného profilu rýhy (Obr. 6).

Tento typ zařízení je často využíván i v zahraničí. Po zaměření dostatečného počtu příčných profilů rýhy může být potom usuzováno o celkovém objemu rýhy. Zařízení a jeho princip popsal např. De Santisteban a kol. (2006).

Casalí publikoval metodiku měření pomocí tohoto zařízení a doporučuje volit vzdálenost příčných profilů individuálně dle charakteru konkrétní rýhy. Jako maximální vzdálenost příčných profilů doporučuje 5 m (Casalí, 2006).



Obr. 6: Příklad jednoho ze zařízení sloužícího pro provedení volumetrické kvantifikace jak ho publikoval De Santisteban a kol. (2006)

V ČR v současné době 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.

2.8. Erozní modely

V současné době existuje několik erozních modelů sloužících k odhadu požadovaných charakteristik srážkoodtokových a erozních procesů v krajině. Z hlediska používané matematické formulace procesů je možné alespoň přibližně rozdělit modely na empirické, konceptuální a fyzikální modely.

Empirické modely vycházejí ze statistického zpracování naměřených dat a jsou popisem závislosti mezi sledovanými veličinami. Příkladem takového typu modelu je např. rovnice USLE. Konceptuální modely bývají zčásti založeny na empirických vztazích, ale jejich přesnost bývá oproti výše popsaným větší. Často nabízejí větší možnost volby vstupních parametrů. Základem fyzikálních modelů bývá matematické vyjádření odtokového procesu a podrobnější popis erozních pochodů. Fyzikální modely bývají náročnější na výpočetní techniku a vstupní data, zato jejich výsledky jsou při dostatečném množství vstupních dat přesnější.

Pro predikci parametrů efemérních rýh bylo vyvinuto několik modelů, převážně v USA. Často se jedná o modely konceptuální, které využívají pro odhad objemu odnosu půdy z efemérních rýh údaje o velikosti přispívající plochy, sklonu svahu, vlastnostech půdy a typu zemědělského managementu. Modely 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 odtoku, který není mnohdy znám. Předpokládá se, že na povodích, kde dominuje Hortonův povrchový odtok, se tento zvětšuje proporcionalně s plochou povodí (Vandaele a kol., 1996).

V zahraničních publikacích se uvádí několik modelů pro odhad eroze v DSO, z nichž nejvíce využívané jsou modely EGEM a AnnAGNPS. Zatím nedošlo k ověření platnosti těchto modelů v podmínkách České republiky.

Mezi méně zmiňované a využívané modely patří model REGEM, který vznikl úpravou modelu EGEM a WEPP. Další z erozních modelů, jako je např. německý EROSION 3D, který je řazen mezi „přesnější“ fyzikálně založené modely, zatím neobsahuje nástavbu pro výpočet eroze vznikající v DSO.

2.8.1. Model EGEM

Model EGEM (Ephemeral gully erosion model) byl vyvinut Ministerstvem zemědělství Spojených států amerických (U.S. Department of Agriculture - USDA). V USA je eroze vznikající v drahách soustředěného odtoku poměrně závažným problémem. Běžně aplikované predikční modely pro obecný výpočet vodní eroze využívají rovnici USLE (Universal Soil Loss Equation) nebo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Tyto rovnice postihují objem plošné eroze, ne však eroze vznikající v drahách soustředěného povrchového odtoku. Model EGEM je v USA používán pro odhad ohroženosti povodí erozí z efemérních rýh. Model EGEM je schopen simulovat jednotlivé nevětvené rýhy (U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service, 1992).

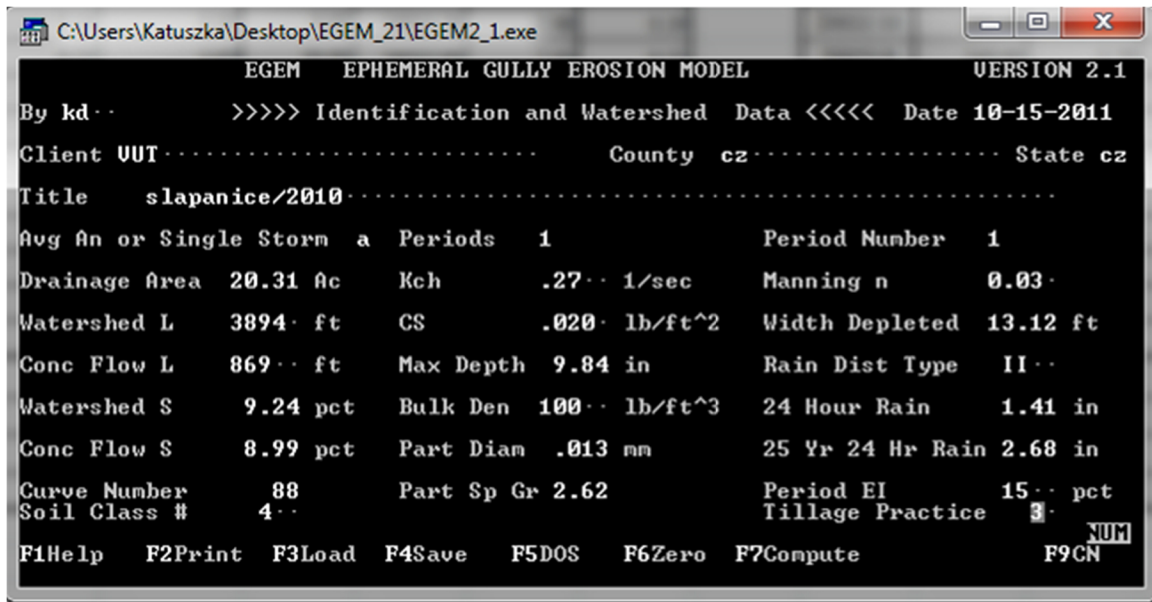
Eroze půdy je složitý časoprostorově se měnící děj. V rámci programu EGEM je prováděna určitá schematizace tohoto komplexního děje. Nejdříve je odhadnuta počáteční a maximální šíře příslušné efemérní rýhy. V závislosti na objemu odtoku, kulminačním průtoku a vlastnostech půdy, je efemérní rýha poprvé prohloubena na úroveň hůře erodovatelné půdní vrstvy (typicky hloubka orby či hloubka ornice), dále pak dochází k rozšiřování rýhy do té doby, než dosáhne maximální šířky.

Model EGEM je schopen výpočtu objemu odtoku a kulminace průtoku pro dané povodí, a to dle metodiky USDA (U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service, 1989). Je možné volit mezi výpočtem eroze z DSO způsobené konkrétní srážkovou událostí (zastoupené 24hodinovým deštěm) nebo výpočtem průměrného ročního odnosu. Rok může být rozdělený do nejvíce tří období dle druhu pěstované plodiny.

Výpočet průměrné roční eroze z DSO je založen na několika předpokladech. První předpokladem je, že při největším úhrnu v daném roce dojde ke vzniku maximálních rozměrů rýhy. Druhý předpoklad je, že jednou ročně dochází k zaorání rýhy a tím k jejímu dočasnému

zániku. Třetím předpokladem je vznik pouze jedné, jednoduché a nevětvené rýhy v jednom povodí.

Obr. 7 ilustruje uživatelské rozhraní aplikace umožňující zadání vstupních hodnot. Většina hodnot je vyžadována v anglosaských mírách, tudíž je potřeba před zadáváním provést přepočít ze systému SI.



Obr. 7: Zadávání vstupních hodnot programu EGEM

Z technické dokumentace k modelu vyplývá, že je využíváno mnoho empirických rovnic obsahujících koeficienty, jejichž hodnoty nelze pro použití modelu v podmínkách ČR jednoznačně stanovit. Jedná se například o koeficienty charakterizující klima jednotlivých regionů USA.

Intenzita oddělování částic půdy vlivem působení eroze je v programu odvozena z rozdílu smykového napětí a kritického smykového napětí pro zadaný typ půdy:

$$D_f = KC(\tau - \tau_c), \quad (2.16)$$

kde:

D_f intenzita oddělování částic půdy [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$];

KC odolnost půdy v rýze (z hlediska eroze) [-];

τ průměrné smykové napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$];

τ_c kritické smykové napětí pro daný typ půdy [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$].

V modelu je zjednodušen proces tvorby rýhy tak, že je nejdříve uvažováno s prohlubováním rýhy za současného zachování prvotní šířky rýhy, a to až do doby dosažení hloubky orby. Údaj o hloubce orby je také jedním ze vstupů, které musí uživatel do programu zadat. Poté dochází k rozšiřování rýhy až do doby, kdy rýha dosáhne své maximální šířky. Ta je odhadována následovně:

$$W_{max} = 179Q^{0.552}n^{0.556}S_{cr}^{0.199}\tau_c^{-0.476}, \quad (2.17)$$

kde:

- W_{max} maximální šířka rýhy [m];
 Q kulminační průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$];
 n Manningův drsnostní součinitel [$m^{-1/3} \cdot s$];
 S_{cr} kritický sklon svahu [$m \cdot m^{-1}$];
 τ_c kritické smykové napětí pro daný typ půdy [$N \cdot m^{-2}$] (Poesen, 2011).

Další obrázek (Obr. 8) znázorňuje aplikační okno, kde jsou uvedeny výstupy z modelu. Kromě objemu odtoku a kulminačního průtoku vycházejícího z dříve zadaného srážkového úhrnu program nabízí výsledky týkající se samotné rýhy: její hloubku, šířku a průměrnou roční (nebo konkrétní) ztrátu půdy.

The screenshot shows the EGEM software interface with the following text and table:

```

C:\Users\Katuszka\Desktop\EGEM_21\EGEM2_1.exe
EGEM EPHEMERAL GULLY EROSION MODEL VERSION 2.1
By kd >>>> Average Annual Erosion Results <<<<< Date 10-15-2011
Client UUT County cz State cz
Title slapanice/2010
  
```

	Period 1			Period 2			Period 3			Aug. Annual
	2 Yr	25 Yr	Per	2 Yr	25 Yr	Per	2 Yr	25 Yr	Per	
DA acres	20.31	20.31		0.00	0.00		0.00	0.00		
Vol Ro in	0.52	1.54		0.00	0.00		0.00	0.00		
Peak Q cfs	9.1	29.1		0.0	0.0		0.0	0.0		
Depth in	9.8	9.8		0.0	0.0		0.0	0.0		
Width ft	5.7	9.7		0.0	0.0		0.0	0.0		0.9
Tons eros	135.7	229.5	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.0
Uoided Ac	0.076	0.128		0.000	0.000		0.000	0.000		0.012
Depl Ac	0.26	0.26		0.00	0.00		0.00	0.00		0.04

Press PgUp to return to data input screens

F1Help F2Print F3Load F4Save F5DOS F6Zero F7Compute F9CN

Obr. 8: Výstupy z modelu EGEM

Závěry z testování modelu v zahraničí

Testováním modelu EGEM se zabývalo několik autorů v USA, kde byly převážně konstatovány pozitivní výsledky. V Evropě se tímto modelem zabývalo jen velmi málo autorů. Jedním z nich byl Nachtergaele, který popsal testování EGEMu na velkém vzorku dat měřených ve středozemí (na jihu Portugalska a Španělska). Pro jižní Evropu, dle jeho testování, nedával EGEM dobré výsledky (Nachtergaele, 1999).

Nachtergaele uvádí problémy se získáním některých vstupních hodnot nutných pro spuštění výpočtu jako například kritického smykového napětí. Tento vstup je zde zjednodušeně odhadován pomocí procentuálního obsahu jílu v půdě. Další studie však tento zjednodušující předpoklad vyvracejí (Poesen, 2011). Mnoho autorů také popisuje velkou závislost výpočtů objemu eroze na délce rýhy, která je také jedním ze zadávaných vstupů do modelu EGEM.

2.8.2. Model AnnAGNPS

Stejně jako EGEM byl i model AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source model) vyvinut v USDA a jeho cílem je usnadnění posuzování krajinných procesů ovlivňujících zemědělské plochy. Jak uvádějí jeho autoři, v mnoha ohledech je tento model zdokonalením výše uvedeného modelu EGEM.

Model je schopen simulovat odtok z povodí, objem odnosu půdního materiálu, transport znečištění vzniklých zemědělskou činností, a to vše pomocí osvědčených numerických metod. Model pracuje s buňkami, do kterých je při výpočtu rozděleno celé povodí. Každé buňce je přiřazen jednotný sklon svahu, typ půdy, způsob využívání půdy i management půdy.

Nejnovější verze programu navíc nepoužívá pro výpočet eroze pouze rovnici RUSLE (která odhaduje pouze plošnou a rýhovou erozi), ale má navíc vestavěný modul pro predikci efemérních rýh, což byl hlavní důvod jeho popisu v rámci této práce.

Simulace rýh vychází ze stejných rovnic, jaké jsou použity v programu EGEM, je však uzpůsobena pro rozdělení výpočtu do jednotlivých výpočetních buněk. Výpočet eroze z efemérních rýh tak probíhá pouze v buňkách stanovených uživatelem. Tímto bylo dosaženo několika vylepšení předchozích výpočetních nástrojů. Nejpodstatnějšími z nich jsou:

- možnost výpočtu neustáleného, v čase proměnného povrchového odtoku;
- definování celkové délky rýhy pomocí míry jejího rozvoje popsatelné migrací svíslého čela (toto vylepšení řeší problém, který byl popsán u modelu EGEM a to, že v době iniciace rýhy není možné dobře odhadnout její finální délku, se kterou silně koreluje objem oderodované zeminy);
- stanovení šířky rýhy na základě průtoku, což umožňuje přesnější predikci rýh v každém časovém i prostorovém bodě;
- zadávání pěti odlišných velikostních tříd zrn zeminy (jíl, prach, písek a malé nebo velké agregáty) (Gordon, 2007).

Hydrologické výpočty

Pro hydrologické výpočty program vyžaduje údaje o maximálním průtoku a objemu odtoku. Tyto hodnoty mohou být buď zadány uživatelem, nebo vypočteny pomocí metody TR-55 pomocí zadání plochy povodí, čísel odtokových křivek CN a typu deště. Následně je vytvořen trojúhelníkový odtokový hydrogram s použitím sudého počtu kroků, z nichž každý je označen indexem i (Gordon, 2007).

Výpočet iniciace efemérní rýhy a posun svíslé stěny ve dně rýhy

Jak bylo popsáno výše, pro jednotlivé výpočetní buňky jsou zadány konstantní charakteristiky (druh půdy, půdní profil, zemědělský management atd.). Průtok je soustředěn u „výpusti“ z buňky. V tomto místě je šířka rýhy rovna:

$$w_{ij} = 2,51 Q_{ij}^{0,412}, \quad (2.18)$$

kde:

w_{ij} šířka rýhy ve výpočetní buňce ij [m];

Q_{ij} průtok u výpusti buňky ij [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Průměrné smykové napětí je vypočteno jako:

$$\tau_{ij} = \rho_w g d_{ij} S, \quad (2.19)$$

kde:

τ_{ij} průměrné smykové napětí v buňce ij [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$];

ρ objemová hmotnost vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

g tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];

d_{ij} hloubka proudící vody v rýze v buňce ij [m];

S_{ij} sklon dna výpočetní buňky [-].

Ve chvíli, kdy je dosaženo hloubky rezistentní vrstvy půdy, jsou formována svíslá čela, přes která přepadá voda a dochází k migraci těchto čel.

V případě, že je průtok redukován ve výše položené části rýhy, je rýha považována za nejširší v místě její výusti a zároveň nejužší v místě vytvořeného skoku ve dně. Tento předpoklad vychází z pozorování Smitha z roku 1992 (Gordon, 2007).

Skrz migraci skoku ve dně, která může probíhat dlouhé měsíce, by měla rýha dosáhnout své maximální délky. I po ukončení této migrace ale dále probíhá transport vody i půdního materiálu danou rýhou (Gordon, 2007).

Eroze půdy, její transport a depozice

Model uvažuje se třemi možnými zdroji půdního materiálu transportovaného uvnitř části rýhy během stanoveného časového kroku:

- půdní materiál přicházející z výše ležící části rýhy;
- půdní materiál oderodovaný v počítané části rýhy, který mohl vzniknout migrací čela a/nebo rozšiřováním rýhy v počítaném úseku;
- dříve uložený sediment nacházející se na dně rýhy v počítaném úseku (Gordon, 2007).

Hmotnost odneseného materiálu dané frakce c [t] z části rýhy označené j během časového kroku i je dána vztahem:

$$c_{ijx} = c_{i(j+1)x} + \Delta w_{ij} \Delta L_j S_D \rho_s P_x \pm w_j L_j D_{d_j} \rho_d \frac{P_x}{n_m}, \quad (2.20)$$

Na pravé straně rovnice jsou postupně sčítány jednotlivé dílčí složky materiálu, a to nejdříve materiál přicházející z výše ležícího úseku, materiál oderodovaný uvnitř počítaného úseku (Δw_{ij} a ΔL_j zahrnují změnu šířky a délky rýhy v během daného časového kroku) a změnu materiálu uloženého na dně rýhy. D_{d_j} [m] je označení pro tloušťku uloženého sedimentu a ρ_d [t·m⁻³] je objemová hmotnost sedimentu uloženého na dně rýhy. V rovnici je dále jako n_m označen počet výpočtových kroků, během nichž probíhá migrace čela rýhy (Gordon, 2007).

Rovnice pro výpočet kapacity transportu materiálu pro konstantní šířku rýhy t_c [t·m⁻¹·s⁻¹] pro jednotlivé frakce materiálu x uvnitř každého úseku rýhy j pro každý časový krok i je definována takto:

$$t c_{ijx} = \frac{\eta_{ijx} k_x \tau_{ij} u_{ij}}{v_s}, \quad (2.21)$$

kde:

η faktor efektivního transportu [-];

k faktor kapacity transportu [-];

v_s sedimentační rychlost částic půdy [m·s⁻¹].

V případě, že je množství dostupného materiálu pro odnos menší než transportní kapacita vypočtená pro daný časový krok, je všechen dostupný materiál transportován po směru proudu do dalšího výpočetního úseku, kde je toto množství znovu porovnáváno s dostupnou transportní kapacitou. Tento proces je opakován do doby, kdy je dosažena kapacita ústí výpočtové části rýhy. Množství materiálu dané frakce, které přesahuje transportní kapacitu, je pro účely výpočtu ukládáno v konstantní tloušťce na dno rýhy s tím, že je možné jeho znovuodplavení během dalších časových kroků, kdy nebude překročena transportní kapacita (Gordon, 2007).

Iniciace rýhy

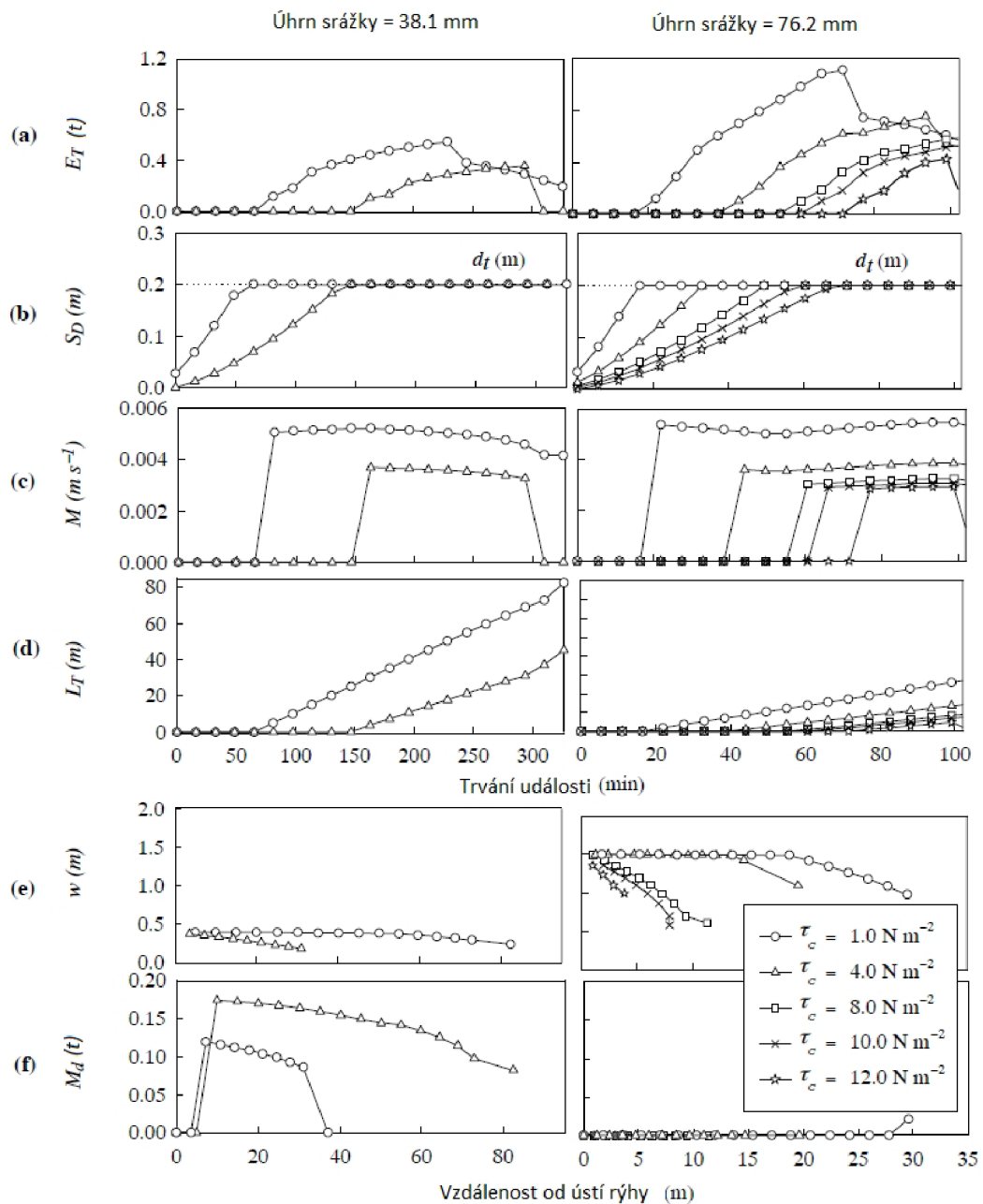
Algoritmus pro výpočet iniciace rýhy byl převzat z modelu EGEM a vychází ze dvou parametrů. Z kritického smykového napětí τ_{cr} a koeficientu půdní erodibility.

Vztah pro výpočet kritického smykového napětí τ_{cr} je založen na úvaze, že kritické smykové napětí na nedávno zemědělsky kultivované půdě je funkcí procentuálního obsahu jílu v dané půdě P_c :

$$\tau_{cr} = 0.311 \cdot 10^{0,0182P_c}, \quad (2.22)$$

Pro půdu, která není nedávno obdělávána, případně nebývá zemědělsky upravována vůbec, jsou uváděny odlišné vztahy.

Níže je uveden grafický výstup z modelu AnnAGNPS (Graf 8), který ukazuje výpočty jednotlivých charakteristik rýhy po její délce a po celou simulovanou dobu trvání odtoku pro dvě různé hodnoty úhrnu a různá kritická smyková napětí. Jak je vidět, objem eroze zůstává nulový až do doby než je iniciována rýha (vlivem tvorby svislého čela). Této iniciace je dosaženo mnohem dříve v případě větších přívalových dešťů a menšího kritického smykového napětí. Pokud dojde k dosažení hloubky orby výše popsaným způsobem a navíc je překonáno kritické smykové napětí, skok ve dně začíná postupovat směrem proti proudu. Míra pohybu skoku ve dně je mnohem více citlivá na změny půdní odolnosti než na změny typu proudění vody (Gordon, 2007).



Graf 8: Porovnání výstupů z modelu AnnAGNPS při různě zadaných scénářích (Gordon, 2007)

Na prvním obrázku (a) je znázorněn průběh eroze (E_T) v čase. Na obrázku (b) je znázorněn vývoj hloubky rýhy (S_D). Obrázek (c) ukazuje rychlost protiproudání migraci čela rýhy (M) a obrázek (d) vývoj délky rýhy (L_T). Vše je znázorněno v čase a v různých scénářích kritického smykového napětí. Dále je na obrázku (e) je znázorněn vývoj šířky rýhy (w) a na obrázku (f) uveden průběh hmotnosti materiálu sedimentovaného v rýze (M_d). Dvě poslední charakteristiky jsou znázorněny jako funkce délky rýhy nad jejím ústím.

Závěry z testování modelu v zahraničí

Autoři 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. Autoři upozorňují na zlepšení získaných výsledků v případě podrobnějšího zadání sklonu svahu na ploše, i tak ale byly výsledky nepříliš uspokojivé.

2.8.3. Model SHETRAN

Model SHETRAN 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.

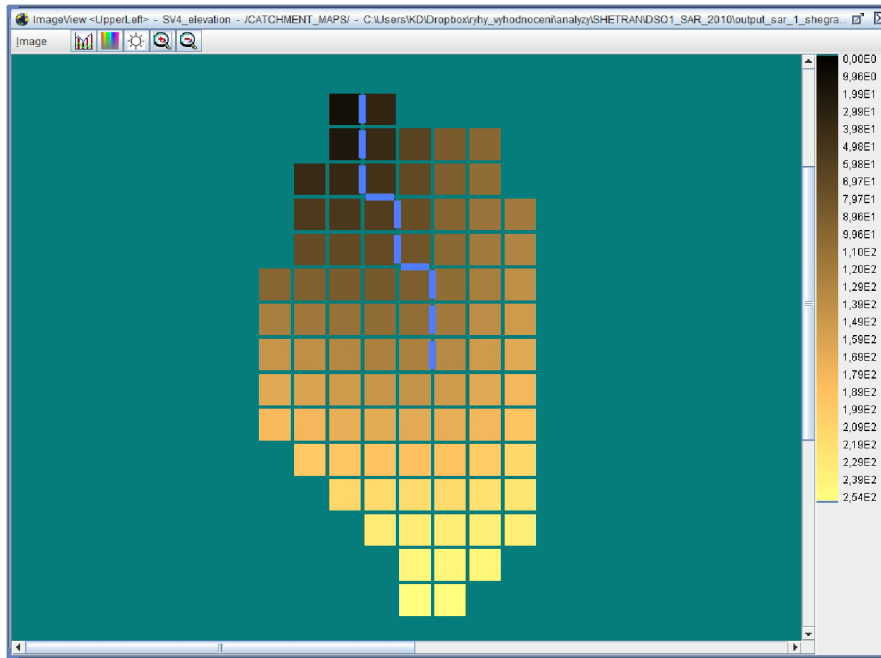
Pro tuto práci je využitelný srážkoodtokový a erozní model, který program nabízí. Digitální model terénu popisující morfologii počítaného povodí a jeho blízkého okolí je v programu rozdělen do čtvercových buněk, přičemž je uvažováno, že vypočtený povrchový odtok nastává na hranicích jednotlivých buněk. Každá buňka nese informaci o nadmořské výšce. Povodí je v modelu terénu vymezeno tzv. maskou. V rámci povodí je možné každé výpočetní buňce přiřadit informaci o typu pokryvu i půdním typu. Povodí je zatěžováno průměrnou hodinovou či denní srážkou. Jedním ze vstupů je i průměrný denní výpar. Zadaná srážka je na odtok transformována pomocí sady empirických rovnic vyjadřujících jednotlivé typy hydrologických ztrát v povodí.

Velikost výpočetní sítě je limitována na 50·50 buněk, což v případě větších povodí vede k nutnosti zvětšování velikosti výpočetní buňky a tím i snižování přesnosti výpočtu.

Vstupy je možné částečně generovat v prostředí ArcMap a následně převést do textového souboru ve formátu, který je vyžadován programem. Pro každý výpočet je nutné vytvořit několik různých vstupů, z nichž některé musí být před použitím upraveny v dalším podpůrném programu. Celkově není získání vstupních souborů a práce s SHETRANem nijak uživatelsky přátelská.

V případě, že jsou vstupy zadány korektně, nabízí program řadu výstupů zahrnujících časové rozdělení povrchového odtoku, míru infiltrace, hloubku odneseného půdního materiálu, a další.

Níže je vidět základní grafický výstup z programu SHETRAN. Povodí je rozděleno do výpočetních buněk, které jsou barevně odlišeny dle relativní výšky. Modře je znázorněn soustředěný povrchový odtok v době kulminace odtoku způsobeného srážkou s největším úhrnem v zadaném období.



Obr. 9: Schematizace povodí a prostorová lokalizace soustředěného povrchového odtoku v modelu SHETRAN

Erozní modul programu SHETRAN

Pro výpočet eroze nabízí model SHETRAN přídatný modul, který není součástí standardní podoby programu spustitelné v operačním systému Windows. Modul využívá systém MS-DOS.

Kromě simulace rozrušení půdy vlivem dopadu dešťových kapek je v modelu uvažována i eroze vznikající třením od povrchového odtoku. Smykové napětí je počítáno dle rovnice (2.10) a toto je porovnáváno s kritickým smykovým napětím:

$$\tau_{cr} = (\rho_s - \rho) g D_{50} a_3 Re_*^{b_3}, \quad (2.23)$$

kde:

- τ_{cr} kritické smykové napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$];
- ρ_s objemová hmotnost půdy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
- ρ objemová hmotnost vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
- g tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];

D_{50} střední velikost zrna půdního materiálu [m];

Re_* Reynoldsovo číslo pro půdní částice [-];

a_3, b_3 konstanty závislé na Reynoldsově čísle pro půdní částice [-].

Reynoldsovo číslo pro půdní částice je počítáno ze střední velikosti zrna půdního materiálu, smykového napětí způsobeného proudící vodou, objemové hmotnosti vody a kinematické viskozity.

Pro soudržné zeminy je pro výpočet kritického smykového napětí používán jiný vztah, který je obdobou rovnice používané v dříve popsaném programu AnnAGNSP (rovnice 2.22):

$$\tau_{cr} = 0.493 \cdot 10^{1.83P_c}, \quad (2.24)$$

kde:

P_c obsah jílu v oderodovaném půdním materiálu [%].

Transportní kapacitu je možné v modelu počítat dle dvou různých empirických vztahů. V obou případech je ale tato kapacita počítána jako funkce smykového napětí, střední velikosti zrna půdního materiálu, výšky vodního sloupce a objemové hmotnosti vody a půdy (Lukey a kol., 1995).

2.9. Možnosti stabilizace DSO

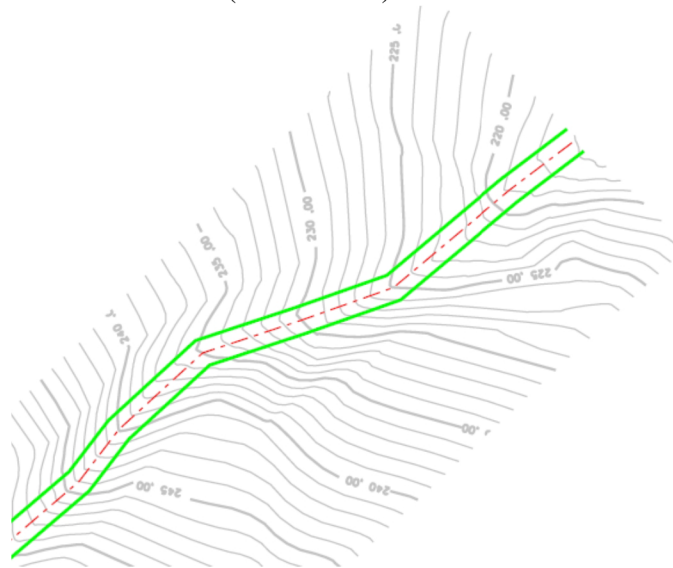
V zahraničí je nejpoužívanějším opatřením proti vzniku erozních rýh zpevnění DSO vegetačním krytem. Přirozené dráhy soustředěného povrchového odtoku zpevněné vegetačním krytem jsou schopny bezpečně (bez projevů eroze) odvést soustředěný povrchový odtok, ke kterému dochází v důsledku morfologické rozmanitosti krajiny. Vegetační kryt údolnice ovlivňuje rychlost pohybu vody v údolnici. Kořenový systém v závislosti na své hustotě a kvalitě zpevňuje půdu a redukuje odnos půdních částic, rostlinných živin a agrochemikálií. Ochranný účinek trav proti vodní erozi spočívá především v útlumu kinetické energie, ve snížení rychlosti a množství povrchově stékající vody projevujících se ve snížení její vymílací a transportní schopnosti a také v mechanickém zpevnění půdy kořenovým systémem.

Vedle snížení hodnot erozních odnosů a minimalizace formování efemérních rýh, umožní zatravněním stabilizovaná dráha soustředěného odtoku zachycení také rostlinných živin a dalších agrochemikálií nesených spolu s erodovanými půdními částicemi.

2.9.1. Zásady navrhování stabilizace DSO

Při realizaci zatravněných drah soustředěného odtoku (údolnic) má být využito profilu přirozené údolnice. Při návrhu zatravnění by mělo být posouzeno splnění podmínky maximální střední profilové rychlosti povrchového odtoku = $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Dumbrovský a kol., 2010).

Opatření by mělo být realizováno v období mimo výskyt přívalových srážek (optimálně v září). V této době by mělo dojít k vytvoření pásu z doporučené směsi výběžkatých trav se středem v identifikované ose DSO (viz Obr. 10).



Obr. 10: Vymezený rozsah osetí

Pro rychlejší zapojení ochranného vegetačního krytu je vhodné provést osetí do krycí plodiny případně ve směsi s jinými plodinami zajišťujícími rychlý nástup ochranného účinku do doby vytvoření stabilního travního porostu.

Při zakládání, výživě a ošetřování porostů je třeba vycházet z komplexního posouzení vzájemných vztahů stanovištních podmínek, složení porostu a specifčnosti jeho funkce. V druhovém složení jsou preferovány trávy výběžkaté, tvořící pevný drn. Složení směsi se obvykle vyjadřuje procentuálním podílem jednotlivých druhů. Z vybraných druhů se určí druhy hlavní (1–2), ostatní jsou pak doplňující.

Dostatečný podíl výběžkatých trav musí být základem každého porostu určeného k protierozní funkci, protože právě výběžkaté druhy mají nejvyšší účinek a zajišťují vytrvalost porostu. Protože tyto trávy mají zpravidla pomalý počáteční vývoj, doplňují se druhy s rychlejším růstem. Příklady travních směsí volených dle typu stanoviště jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 6 až Tab. 9).

Tab. 6: Směs s vysokým protierozním účinkem, vhodná na stanoviště s dostatkem vláh, dobře zásobené živinami

Druh trávy	Podíl ve směsi [%]	Potřeba osiva [kg·100 m ⁻²]
Lípnice luční	40	0,40
Kostřava červená výběžkatá	25	0,40
Kostřava červená trsnatá	15	0,23 – 0,30
Jílek vytrvalý	20	0,30

Tab. 7: Směs s vysokým protierozní, účinkem, vhodná na stanoviště sušší, s nižší zásobou živin

Druh trávy	Podíl ve směsi [%]	Potřeba osiva [kg·100 m ⁻²]
Kostřava luční	20	0,24 – 0,40
Kostřava červená výběžkatá	35	0,53
Kostřava červená trsnatá	15	0,23 – 0,30
Jílek vytrvalý	15	0,23
Lipnice luční	15	0,15

Tab. 8: Směs s vysokým protierozním účinkem, vhodná na stanoviště ve vyšších polohách s drsnějšími klimatickými podmínkami

Druh trávy	Podíl ve směsi [%]	Potřeba osiva [kg·100 m ⁻²]
Kostřava červená výběžkatá	40	0,60
Kostřava červená trsnatá	35	0,53 – 0,70
Jílek vytrvalý	10	0,15
Lipnice luční	15	0,15

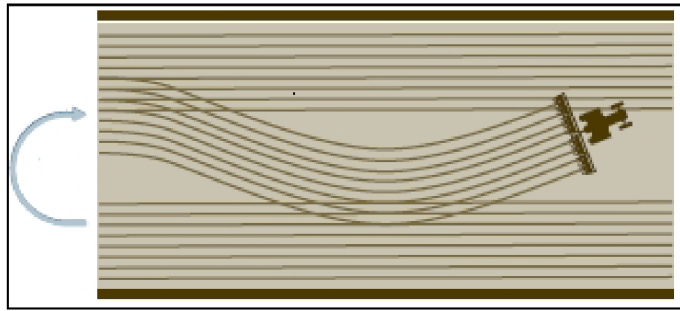
Tab. 9: Směs s vysokým protierozním účinkem, vhodná na stanoviště ve vysokých polohách s drsnými klimatickými podmínkami

Druh trávy	Podíl ve směsi [%]	Potřeba osiva [kg·100 m ⁻²]
Kostřava červená výběžkatá	30	0,45
Kostřava červená trsnatá	30	0,45 – 0,60
Jílek vytrvalý	10	0,15
Lipnice luční	10	0,10
Psineček tenký	20	0,12

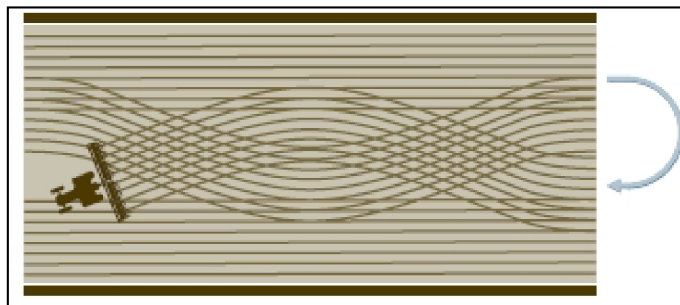
Vypracování návrhu na složení travní směsi spočívá ve výběru a stanovení poměru vhodných druhů. Při zakládání vegetačního zpevnění DSO zatravněním se doporučuje při setí postupovat způsobem kroků zobrazených níže na obrázcích (Obr. 11, Obr. 12 a Obr. 13). Dvě třetiny navržené šířky se osejí v podélném směru podél vnějších stran navrženého rozsahu zatravnění (viz Obr. 11), následně se třetina šířky podél osy osívá napříč (viz Obr. 12 a Obr. 13).



Obr. 11: Postupový krok 1

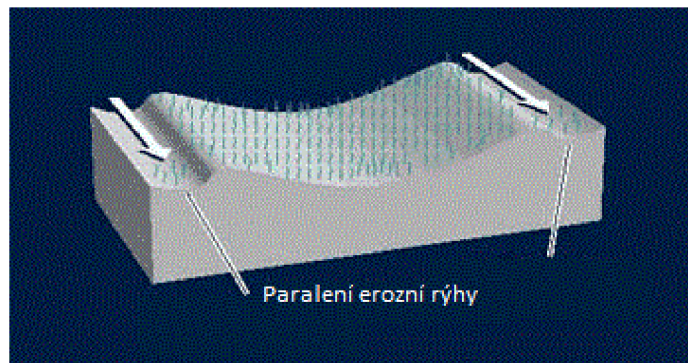


Obr. 12: Postupový krok 2



Obr. 13: Postupový krok 3

Při realizaci zatravněných drah soustředěného odtoku je nutno zajistit pečlivé napojení navazujících částí pozemku (sběrných ploch) a vyvarovat se vytvoření brázdy či vyjetých kolejí podél zatravněné údolnice. Takto vznikají paralelní erozní rýhy, které jsou nežádoucí.



Obr. 14: Příklad paralelních rýh podél údolnice

Zatravněná stabilizovaná dráha soustředěného povrchového odtoku je protierozní opatření, které vyžaduje údržbu, aby zůstala zachována jeho požadovaná funkce. Systém údržby spočívá zejména v:

- pravidelném sečení tak, aby výška porostu v době po sečení byla 8–10 cm (dlouhé stonky mají tendenci vířit a vibrovat v proudu a tím mohou způsobovat zvýšenou turbulenci s následnou možností poškození profilu údolnice). Kosení rovněž zajišťuje bohatý, pevný, odolný a stabilní porost;
- přihnojování porostu – zejména přihnojení na jaře po zasetí je velmi důležité pro dosažení kvalitního stabilního porostu;

- odstraňování akumulovaného sedimentu;
- bezprostředním odstraňování škod vzniklých při provádění agrotechnických operací, zejména paralelních rýh (Dumbrovský a kol., 2010).

2.9.2. Vyhodnocení realizované stabilizace DSO zatravněním

Níže je popsána lokalita, kde došlo k provedení úspěšné stabilizace DSO. Předmětná lokalita se nachází v k.ú. Dušejov v okr. Jihlava. Stabilizace DSO byla realizována v rámci komplexních pozemkových úprav.

Před realizací stabilizace docházelo v trase DSO k výrazným erozním projevům (viz Obr. 15).



Obr. 15: Výrazný erozní smyv před realizací stabilizace DSO v k.ú. Dušejov

Na základě výsledků průzkumu a při konzultacích s uživatelem pozemků bylo zjištěno, že již od roku 2000, kdy byla realizována stabilizace, nedochází k projevům eroze. Po cca 7 letech byla provedena obnova travního porostu. Při rekognoskaci terénu bylo patrné, že v profilu stabilizované DSO byl akumulován sediment. Potvrdila se tak, vedle stabilizační funkce, také funkce zachycení sedimentu a živin v něm obsažených.



Obr. 16: Stav po stabilizaci DSO v k.ú. Dušejov

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 (morfolgie terénu, půdní pokryv, kulminační průtok, atd.).

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. VSTUPNÍ DATA

Pro potřeby disertační práce byla využita řada vstupních dat, zejména geografických, hydrologických a pedologických. Některá data byla získána z veřejně přístupných serverů, část dat byla za účelem vyhodnocení naměřených efemérních rýh zakoupena. Níže jsou konkrétněji popsána používaná data. Popis je rozdělen do podkapitol dle charakteru konkrétních dat.

4.1.1. Výškopisné a polohopisné informace

Pro účely této práce byla zakoupena výškopisná a polohopisná data zájmových území zaměřených rýh a jejich blízkého okolí. Poskytovatelem dat je Český úřad zeměměřičský a katastrální. Byla zakoupena sada dat aktuální k listopadu roku 2012. Část výškopisných dat tvoří 3D vrstevnice s udávanou přesností 0.7 – 1.5 m v odkrytém terénu. Část zájmových lokalit byla ke konci roku 2012 zpracována v rámci projektu „Digitálního modelu terénu 4. generace“ (DMR 4G), případně „Digitálního modelu terénu 5. generace“ (DMR 5G). Tyto podklady byly předány ve formě 3D bodů. Střední chyba výšky dosahuje u DMR 4G 0.3 m a u DMR 5G dokonce 0.18 m.

Na části území obce Šardice, kde byly v průběhu roku 2010 a 2011 zaměřeny 3 efemérní rýhy, bylo v roce 2010 provedeno geodetické zaměření zájmového území. Tato data byla do vyhodnocení rovněž zahrnuta.

Dále byla využita dostupná data o stávajících výzkumech efemérních rýh v ČR a to „Vymezení přispívajících ploch nad uzávěrovými profily erozně ohrožených drah odtoku na orné půdě pro potřeby Rámcové směrnice pro vodní politiku 2000/60/ES“, která byla zpracována pro Ministerstvo zemědělství v roce 2011. Dále bude v textu označována jako „Studie MZe“.

Pro dokreslení celkové situace byla použita i veřejně dostupná data:

- ortofotomapy a automapy dostupné na WMS serveru <http://geoportal.gov.cz>;
- katastrální mapy dostupné na WMS serveru <http://geoportal.cuzk.cz>.

4.1.2. Údaje o půdě a jejím využití

Údaje o půdních blocích byly poskytnuty Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy v. i. i. (VÚMOP), a to v podobě vektorového formátu shapefile. Data jsou aktuální k říjnu 2012.

Údaje o využití zemědělských pozemků byly čerpány z celostátně dostupného registru půdních bloků LPIS získaného ze stránek Ministerstva zemědělství (eAGRI: Portál farmáře, 2004).

4.1.3. Údaje o srážkách

Denní srážkové úhrny pro vegetační období v letech 2009 až 2012 byly poskytnuty Českým hydrometeorologickým ústavem. Hodnoty srážkových úhrnů pro požadované lokality byly získány interpolací záznamů jednotlivých srážkoměrných stanic adjustovaných radarovými údaji.

Pro rok 2010 byl dále k dispozici soubor 15minutových záznamů ze srážkoměru společnosti AMET, který je umístěn cca 1100 m od měřené lokality. Vzhledem ke značné vzdálenosti srážkoměru společnosti AMET od místa měření, bylo rozhodnuto o primárním využití dat ČHMÚ.

5. MATERIÁL A METODA

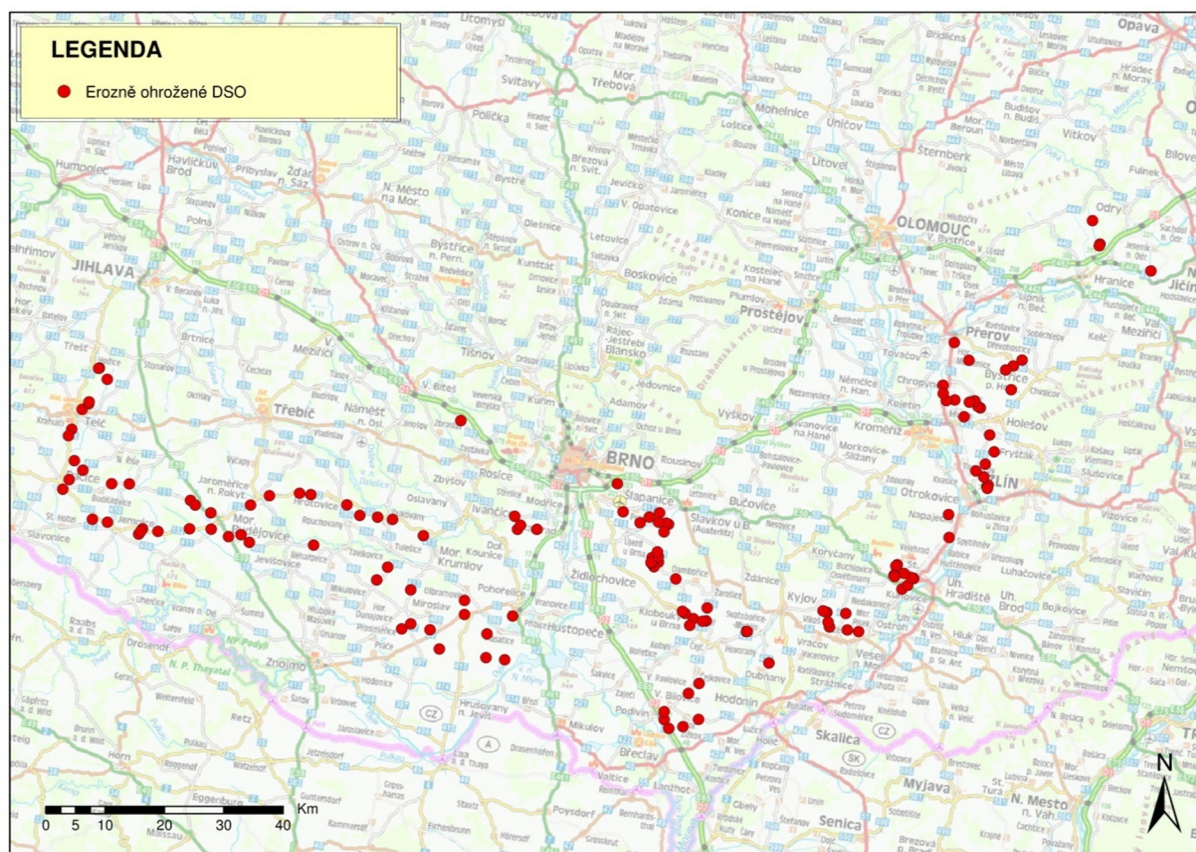
Jak je popsáno v kapitole CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE, jsou stanoveny následující cíle disertační práce:

- 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.

Za účelem získání výsledků, ze kterých by bylo možné vyvodit relevantní závěry naplňující výše popsané cíle, bylo nutné vytvořit postup jak pro měření samotných rýh, tak i pro vyhodnocení těchto měření. V následujících podkapitolách jsou popsány nejdůležitější kroky, které byly provedeny za účelem dosažení daných cílů.

5.1. Validace výsledků „Studie MZe“

Za účelem ověření použitelnosti „Studie MZe“ pro potřeby této disertační práce bylo v prvním kroku přistoupeno k výběru téměř 150 konkrétních DSO ze souboru více než 33 000 drah nalezených na území ČR. Tyto byly v terénu lokalizovány a došlo ke zhodnocení aktuální erozní činnosti a případného potenciálního erozního ohrožení DSO, a to dle charakteristik majících vliv na tvorbu rýh (morfologie terénu, délka údolnice a její přispívající plocha atd.). Pro terénní průzkum byly vybrány DSO v krajích Vysočina, Jihomoravském a Olomouckém. Jednotlivé zkoumané rýhy jsou bodově lokalizovány na následujícím obrázku.



Obr. 17: Lokalizace prověřovaných erozně ohrožených DSO

5.2. Volumetrická kvantifikace rýhové eroze

Aby mohla být posuzována škodlivost efemérních rýh, je nutné znát parametry vzorku rýh, tj. jejich délku a především jejich objem. Proces měření a jeho vyhodnocení je nazýván volumetrickou kvantifikací hlubokých efemérních rýh. Před samotným měřením byla vypracována metodika pro volumetrickou kvantifikaci rýh. Popis kvantifikace se objevuje v řadě zahraničních publikací. Autoři popisují 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 (Drongová, 2013). Konkrétnější popis v zahraničí používaných zařízení s uvedením jejich autorů se nachází v kapitole 2.7.

5.2.1. Výběr zařízení pro měření eroze

V rámci vývoje metodiky volumetrické kvantifikace rýh byly posuzovány i jiné metody pro zaměření rýhy než v předchozí kapitole uvedené použití měřičského pásma nebo mechanického zařízení. Cílem bylo najít metodu, která by umožňovala spojitě zaměření celé rýhy a odstranila 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 poškozený povrch, především v dolní části rýhy, pokryt vegetací (viz Obr. 18), čímž by pravděpodobně docházelo k chybám měření (Drongová, 2013).



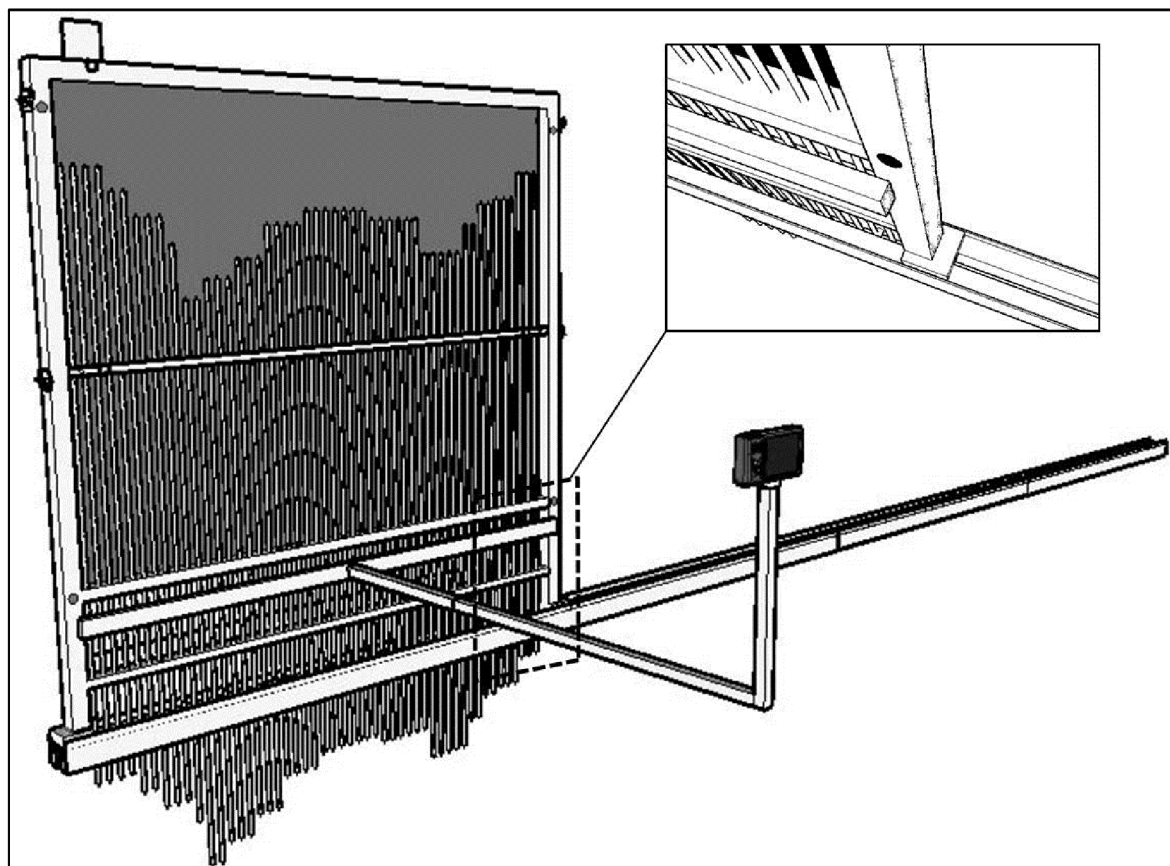
Obr. 18: Ústí jedné ze zaměřovaných rýh

5.2.2. Mechanický erodoměr

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, fakulty stavební, VUT v Brně. Zařízení (erodoměr) umožňuje pomocí kovových jehlic umístěných v rámu zaměřování příčných profilů povrchu půdy. Pro zaměřování průběhu terénu ve vybraném zaměřovaném příčném profilu je erodoměr posunován v 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 (popis vyhodnocení je uveden dále).

V dolní části rámu je umístěn profil pro ukotvení speciálně upraveného stativu s fixní délkou. Na tento stativ je po ustavení erodoměru připevněn fotoaparát, který je následně použit ke zdokumentování každého kladu erodoměru. 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. 19: Nákres erodoměru (Pavlík, Sobotková, Dumbrovský, Drongová, Uhrová, 2013)

Nosný profil je délkově regulovatelný. Jeho maximální délka je 4 m. Šířka rámu s jehlami je 1 m. V případě profilu rýhy šířky větší než 1 m je vytvořeno více kladů mostu tak, že je tento posouván po hliníkové liště. V rámci každého kladu mostu je pořízená fotografie jehel.



Obr. 20: Zaměřování příčného profilu erozní rýhy Erodoměrem

5.2.3. Metodika zaměření erozních rýh

Vzdálenosti měřených příčných profilů byly voleny v závislosti na délce konkrétní zaměřované rýhy a subjektivním vyhodnocením proměnlivosti příčného profilu rýhy po její délce. Tuto metodu popisuje ve svém článku Casalí (viz kap. 2.7). Autor doporučuje volit maximální vzdálenost příčných profilů 5 m, což s ohledem na proměnlivost tvaru identifikovaných rýh nebylo dodrženo. Capra (2009) při měření efemérních rýh v Itálii volil vzdálenosti mezi příčnými profily průměrně po 15 m. Vzhledem k charakteru identifikovaných rýh, bylo rozhodnuto, že pro popis těchto rýh postačí zaměření příčných profilů po vzdálenostech 10, 20 nebo 30 m, a to vždy s ohledem na charakter konkrétní rýhy a subjektivní vyhodnocení proměnlivosti jejich parametrů po délce.

V terénu byly vzdálenosti mezi jednotlivými zaměřovanými příčnými profily odměřovány měřičským pásmem. Polohová lokalizace rýhy i zaměřených profilů byla provedena pomocí terénního GPS přístroje.

Pro ověření velikosti zkreslení zaměřeného objemu vlivem volby vzdálenosti příčných profilů došlo ve dvou případech ke stanovení chyby určeného objemu, a to tak, že byly zaměřeny příčné profily rýhy po 10 m a objem byl poté počítán jak z tohoto podrobného měření, tak i z každého druhého nebo třetího profilu. V případě, že byla rýha homogenní co do svých rozměrů, byla chyba malá (viz Tab. 10). U kratších a rozměrově nestejných rýh je ovšem volení velkých vzdáleností mezi měřenými profily nevhodné (viz Tab. 11).

Tab. 10: Chyba zaměření vlivem změny vzdálenosti příčných profilů – DSO1_Šardice_2011

Číslo profilu	Objem rýhy - profily po 10 m	Objem rýhy - profily po 20 m	Objem rýhy - profily po 30 m
[-]	[m ³]	[m ³]	[m ³]
1	0.60	1.19	2.00
2	0.80		
3	0.96	1.78	
4	0.94		2.75
5	0.90	2.01	
6	0.89		
7	0.99	2.12	3.26
8	1.18		
9	1.24	2.43	
10	1.33		3.53
11	1.26	2.43	
12	0.98		
13	1.06	2.45	3.95
14	1.40		
15	1.35	2.52	
16	1.21		4.35
17	1.31	2.62	
18	1.31		
19	1.10	2.41	3.18
20	0.86		
21	1.02	2.33	
22	1.42		
23	1.42	2.66	3.06
Σ	25.51	26.94	26.09
Chyba oproti nejpodrobnějšímu měření [%]	0.00	5.64	2.27

Tab. 11: Chyba zaměření vlivem změny vzdálenosti příčných profilů – DSO3_Domašov_2012

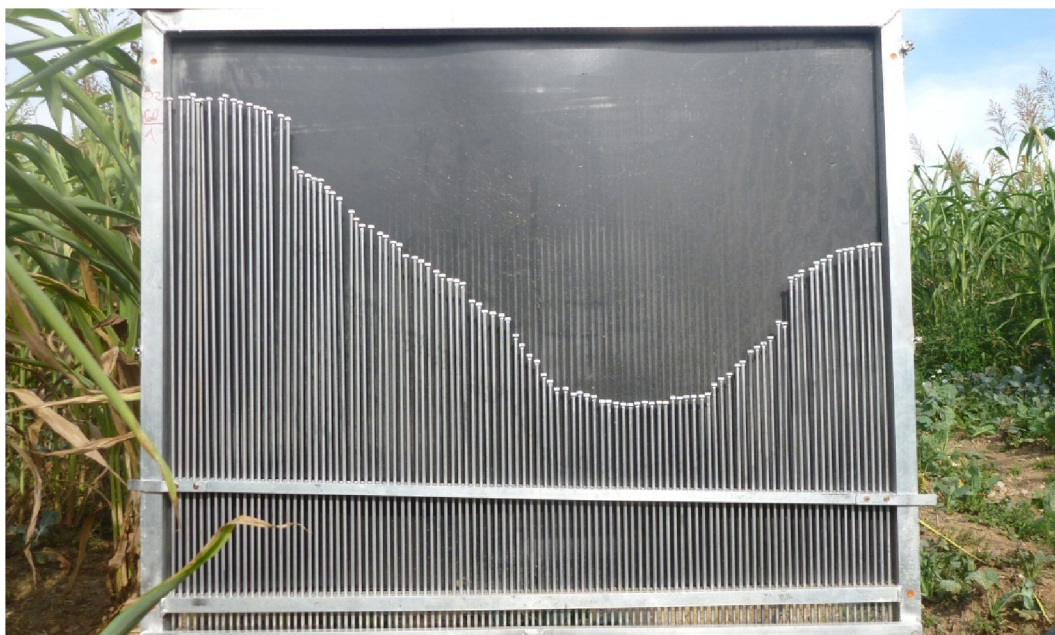
Číslo profilu	Objem rýhy - profily po 10 m	Objem rýhy - profily po 20 m	Objem rýhy - profily po 30 m
[-]	[m ³]	[m ³]	[m ³]
1	0.43	0.86	1.30
2	0.75		
3	0.74	1.71	
4	1.12		2.55
5	1.54	2.02	
6	1.18		
7	0.03	0.12	0.15
Σ	5.79	4.70	4.00
Chyba oproti nejpodrobnějšímu měření [%]	0.00	-18.72	-30.85

Před zaměřením rýh bylo proto vždy uskutečněno terénní šetření, při kterém došlo k vyhodnocení charakteru rýhy a předběžnému zaměření její délky včetně určení přibližně homogenních úseků, které budou jednotlivé příčné profily charakterizovat.

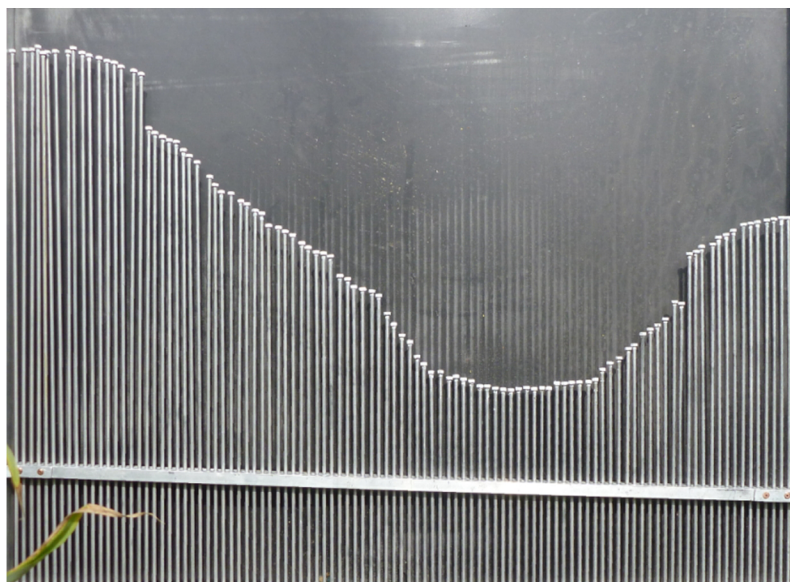
5.3. Vyhodnocení zaměřených rýh

Za účelem vyhodnocení přímých měření efemérních rýh jsou v rámci každého kladu mostu pořizovány fotografie poloh jehel. Z důvodu časové náročnosti ručního vyhodnocování byl v rámci této práce vyvinut software, který je schopen v každé fotografii identifikovat jednotlivé jehly a vypočítat plochu příčných profilů rýhy. Software pracuje na principu rozpoznání obrazu. Všechny měřicí jehlice jsou opatřeny bílými hlavičkami, které jsou kontrastní k černé plastové desce nacházející se v pozadí (za jehlicemi). Tím je umožněn automatický odečet polohy horních konců měřících jehlic.

V rozích rámu erodoměru jsou kontrastní barvou vyznačeny body, podle nichž software natočí foto do vodorovné polohy a ořízne snímek tak, aby byly viditelné jen jehly (viz Obr. 21 a Obr. 22).

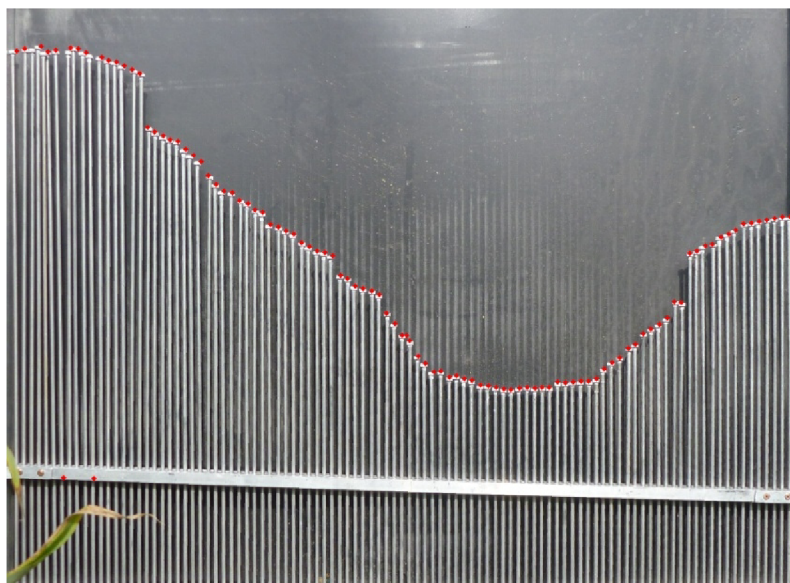


Obr. 21: Neupravené foto erodoměru



Obr. 22: Ořezané a natožené foto erodoměru

Níže je uvedena programem oříznuta fotografie (Obr. 23), na které jsou již softwarově identifikovány jednotlivé hlavičky jehlic (červené body). Poté program určí relativní souřadnice hlaviček jehel, které jsou ve formátu textového souboru exportovány jako výstupy. Tyto textové výstupy mají podobu skriptu použitelného pro automatizované vykreslení zaměřených profilů v prostředí programu AutoCAD za účelem dalších analýz přímého měření.



Obr. 23: Automatizovaná identifikace hlaviček jehel

Výpočet objemu rýhy

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

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{A_{i-1} + A_i}{2} l, \quad (5.1)$$

kde:

V celkový objem erozní rýhy [m^3];

A_i plocha příčného profilu rýhy [m^2];

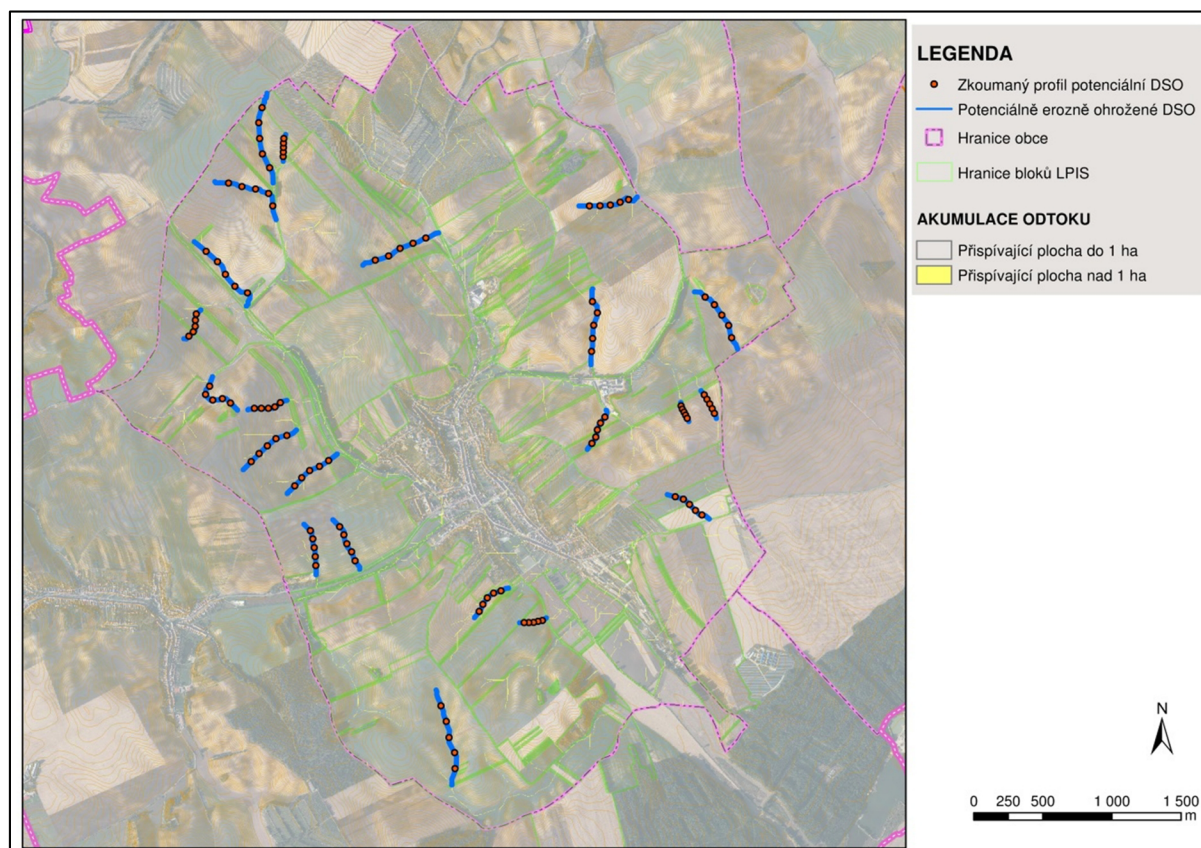
A_{i-1} plocha předcházejícího příčného profilu rýhy [m^2];

l vzdálenost mezi jednotlivými příčnými profily[m].

Analýza tvaru původního terénu

Za účelem minimalizace chyby volumetrické kvantifikace efemérních rýh byla diskutována otázka tvaru původního terénu ve stavu na začátku vegetačního období, tj. před příchodem prvních přívalových srážek a jimi způsobených povrchových odtoků. Tento stav byl považován za výchozí pro výpočet objemu oderodovaného materiálu z rýhy.

Pro analýzu tvaru příčných profilů bylo zvoleno katastrální území obce Šardice, kde bylo k dispozici výškopisné zaměření zemědělských pozemků. Bylo zde lokalizováno 21 potenciálně erozně ohrožených DSO a v rámci každé z nich bylo vytvořeno 5 příčných profilů původního terénu (situace DSO viz Obr. 24). Tyto příčné profily byly porovnány s tvarem parabol různých parametrů a bylo zjištěno, že velikost parametru p paraboly se pohybuje od 100 m po 500 m. Vzepětí paraboly ve směry osy y při šířce 4 m (největší možná šířka příčného profilu zaměřitelného erodoměrem) tedy činilo max. 2 cm. Vzhledem k zanedbatelnosti zjištěného vzepětí je jako původní terén před vznikem rýhy uvažována vodorovná rovina.



Obr. 24: Situace analyzovaných DSO v KÚ Šardice

5.4. Tvorba regresních modelů

Jedním ze stanovených cílů této práce bylo vyhodnocení závislostí mezi parametry rýh (délka, šířka, sklon, objem, aj.) a faktory zapříčiňujícími jejich vznik a rozvoj (morfologie terénu, půdní pokryv, kulminační průtok, atd.). Pro splnění tohoto cíle byla použita statistická metoda – regresní analýza.

V prvním kroku byla regresní analýze podrobena data studie „Vymezení přispívajících ploch nad uzávěrovými profily erozně ohrožených drah odtoku na orné půdě pro potřeby Rámcové směrnice pro vodní politiku 2000/60/ES“ („Studie MZe“). Druhým krokem bylo provedení regresní analýzy měřených dat. V tomto případě vstupoval do analýzy mnohem větší počet nezávisle proměnných, jelikož v rámci přímého měření bylo možné získat mnohem více údajů. V následujících podkapitolách jsou podrobněji popsány oba kroky.

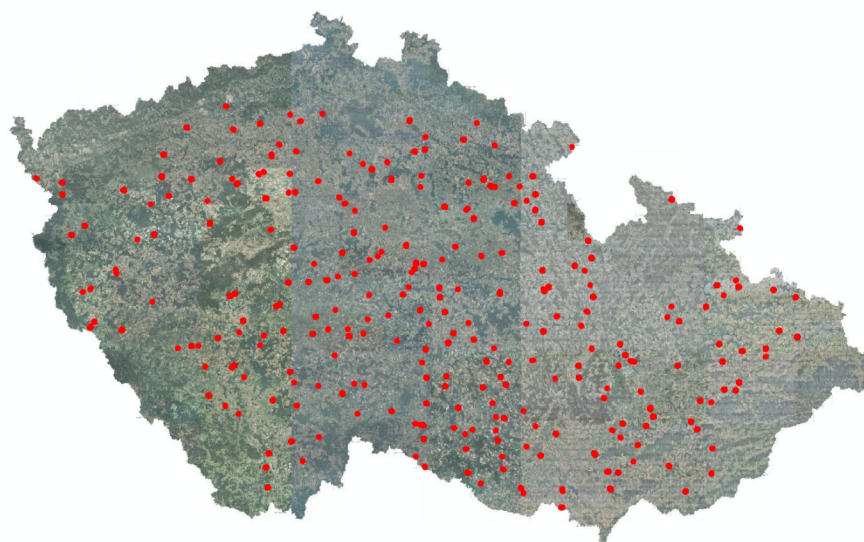
5.4.1. Regresní model z dat „Studie MZe“

Vzorek rýh ze „Studie MZe“ je velmi početný a bylo na jeho základě možné sestavit kvalitní regresní model popisující závislost délky na skupině 10 nezávisle proměnných, které byly v rámci „Studie MZe“ zkoumány. Seznam nezávisle proměnných viz Tab. 12.

Tab. 12: Výčet nezávisle proměnných testovaných v rámci vícerozměrné lineární regrese – „Studie MZe“

Označení nezávisle proměnné	Význam nezávisle proměnné	Jednotky
X1	Vážený průměr sklonu přispívající plochy erozně ohrožené DSO	%
X2	Vážený průměr sklonu erozně ohrožené DSO	%
X3	Vážený průměr nadmořské výšky přispívající plochy erozně ohrožené DSO	m n. m.
X4	Vážený průměr hlavní půdní jednotky v přispívající ploše DSO	-
X5	Vážený průměr 1. čísla BPEJ (příslušnost ke klimatickému regionu) v přispívající ploše DSO	-
X6	Vážený průměr 4. čísla BPEJ (kombinace svazitosti a expozice)	-
X7	Vážený průměr hodnoty K-faktoru v přispívající ploše DSO	-
X8	Vážený průměr HSP v přispívající ploše DSO	-
X9	Vážený průměr čísla CN v přispívající ploše DSO	-
X10	Velikost přispívající plochy DSO	ha

Pro účely regresní analýzy bylo nutné zmenšit počet prvků ve skupině tak, aby bylo možné z dat vyvozovat relevantní závěry. Z původní sady přes 33 000 drah byl vytvořen menší vzorek tak, že byl vybrán každý 110 prvek ze souboru. Vznikl tím soubor plošně rovnoměrně rozložen po celé ČR (viz Obr. 25).



Obr. 25: Lokalizace erozně ohrožených DSO vybraných do regresní analýzy

Za účelem zpracování výše uvedených analýz byly použity nástroje dostupné v prostředí ArcMap, pomocí kterých byly získány prostorové informace o poloze efemérních rýh, velikosti a fyzicko-geografických parametrech jejich povodí. Byly provedeny prostorové analýzy s cílem získání základních hydrologických a erozních charakteristik přispívajících ploch rýh.

Dále došlo k normalizaci dat do intervalu $\langle 0,1 \rangle$ dle vztahu:

$$x_i' = \frac{x - \min(x_1..x_i)}{\max(x_1..x_i) - \min(x_1..x_i)}, \quad (5.2)$$

kde:

- x n -tá hodnota souboru nezávisle proměnné;
- x_1 první hodnota souboru nezávisle proměnné;
- x_i poslední hodnota souboru nezávisle proměnné.

5.4.2. Regresní model – data z přímého měření

Měřená data byla regresi podrobená několikrát. V první řadě byla data testována pomocí jednoduché regrese. V dalším kroku byl sestaven model vícerozměrné lineární regrese.

Jednorozměrná regrese

Hlavním cílem jednoduché regrese bylo ověření závislostí, které jsou uváděny v zahraniční literatuře. Testy byly rozděleny do kategorií:

- závislost délky rýhy na jiných faktorech;
- závislost objemu rýhy na jiných faktorech;
- Casalího index AS;
- Nachtergaeleho závislost šířky rýhy na kulminačním průtoku;
- Vandaeleho kritický sklon svahu.

Vícerozměrná regrese

Podobně jako v případě „Studie MZe“ byla i v tomto případě jako závisle proměnná zvolena délka měřené rýhy. Data z přímého měření umožňovala vytvořit mnohem obsáhlejší množinu nezávisle proměnných. Níže v tabulce je uvedeno označení a význam jednotlivých nezávisle proměnných. Jedná se o kompletní seznam, z něhož byly některé proměnné později odstraněny, a to pro svou zjevnou nadbytečnost. Zdůvodnění odstranění konkrétních proměnných je uvedeno v kapitole 6.4.3.

Tab. 13: Výčet nezávisle proměnných testovaných v rámci vícerozměrné regrese – měřená data

Označení nezávisle proměnné	Význam nezávisle proměnné	Jednotky
X1	Délka rýhy	m
X2	Vážený průměr sklonu přispívající plochy rýhy	%
X3	Vážený průměr sklonu rýhy	%
X4	Maximální sklon rýhy	%
X5	Vážený průměr nadmořské výšky přispívající plochy rýhy	m n.m.
X6	Vážený průměr hlavní půdní jednotky v přispívající ploše DSO	-
X7	Vážený průměr 1. čísla BPEJ (příslušnost ke klimatickému regionu) v přispívající ploše rýhy	-
X8	Vážený průměr 4. čísla BPEJ (kombinace svažitosti a expozice) v přispívající ploše rýhy	-
X9	Vážený průměr 5. čísla BPEJ (kombinace hloubky půdního profilu a skeletovistosti) v přispívající ploše	-
X10	Vážený průměr hodnoty K-faktoru v přispívající ploše rýhy	-
X11	Vážený průměr HSP v přispívající ploše rýhy	-
X12	Typ CN (dle IPS)	-
X13	Vážený průměr čísla CN v přispívající ploše rýhy	-
X14	Změřený objem rýhy	m ³
X15	Kulminační průtok vyvolaný 100letou srážkou (při IPS 2)	m ³ ·s ⁻¹
X16	Kulminační průtok vyvolaný deště s maximálním úhrnem v daném vegetačním období	m ³ ·s ⁻¹
X17	Průměrná šířka rýhy	m
X18	Půdorysná plocha rýhy	m ²
X19	Plocha sběrného povodí	ha
X20	Omočený obvod	m
X21	Hydraulický poloměr	m
X22	Tečné napětí	Pa
X23	Střední profilová rychlost při Q _{max} (maximální úhrn deště ve vegetačním období)	m·s ⁻¹
X24	Průměrná hloubka zaměřená v ose rýhy	m
X25	Úhrn srážky, která započala tvorbu rýhy (do 1 měsíce po zasetí)	mm
X26	Úhrn maximální srážky ve vegetačním období	mm
X27	Reliéfový poměr - Rp	m·km ⁻¹
X28	Charakteristika povodí	-
X29	Tvar povodí - KG	-
X30	Maximální délka údolnice (od závěrného profilu po rozvodnici)	km
X31	Sklon max. délky údolnice	%
X32	AS index	-
X33	Maximální stoletý úhrn	mm

5.5. Ověření použitelnosti erozních modelů

Jedním z cílů této práce bylo ověření výstupů vybraných erozních modelů na základě parametrů zaměřených efemérních rýh. V rámci rešeršní části práce byl vytvořen ucelený seznam modelů zabývajících se predikcí efemérních rýh a kvantifikací eroze v nich vznikající. Následně byly z této množiny vybrány modely, které dle alespoň některých výzkumů dávaly uspokojivé výsledky.

Byly vybrány tyto tři modely:

- EGEM;
- AnnAGNPS;
- SHETRAN.

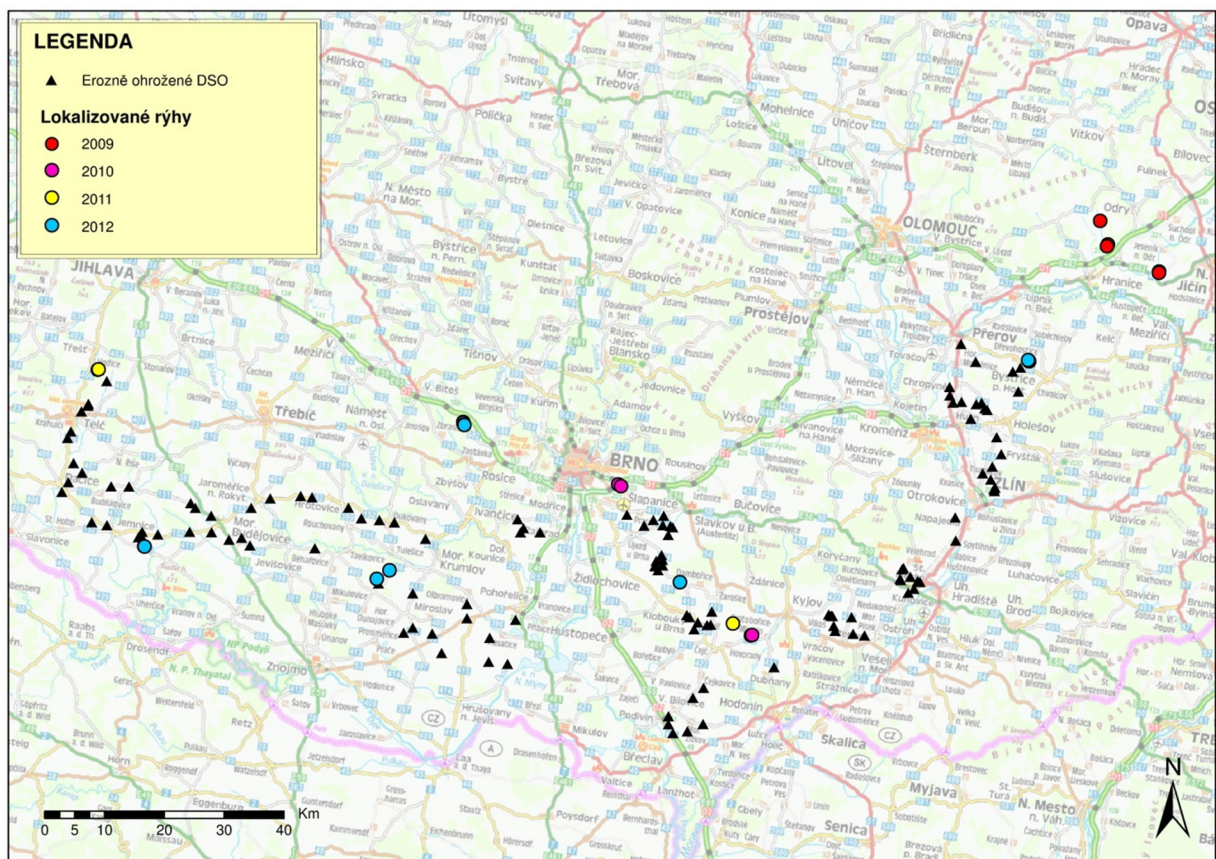
Cílem bylo ověřit, zda výše uvedené modely jsou schopny, na základě známých vstupů, uspokojivě predikovat parametry rýh, jako jsou délka, šířka a hloubka a dále objem oderodovaného materiálu. Výstupy získané modelováním erozních procesů byly konfrontovány s hodnotami z přímého měření a byla vyhodnocena použitelnost těchto modelů pro analýzu eroze v hlubokých efemérních rýhách v ČR. Výsledky jsou uvedeny v kapitole 6.5.

6. VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole jsou uvedeny výsledky aplikace jednotlivých bodů metodiky popsaných v předchozí kapitole. Získané výsledky jsou konfrontovány se závěry, jež uvádí jiní autoři.

6.1. Validace výsledků „Studie MZe“

Jak je popsáno v kapitole MATERIÁL A METODA, byla použitelnost „Studie MZe“ pro potřeby této disertační práce ověřena na souboru téměř 150 konkrétních DSO. Tyto erozně ohrožené rýhy byly v rámci disertační práce v terénu lokalizovány a došlo ke zhodnocení aktuálních projevů eroze a potenciálního erozního ohrožení DSO. Projevy eroze byly identifikovány u 25 DSO. 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. I přesto bylo konstatováno, že všechny vymezené erozně ohrožené rýhy mají s ohledem na morfologii terénu potenciál ke vzniku rýhové eroze. Na níže uvedeném obrázku jsou znázorněny prověřené erozně ohrožené DSO s barevným zvýrazněním těch drah, kde byla identifikována eroze v hlubokých efemérních rýhách.



Obr. 26: Lokalizace prověřených erozně ohrožených DSO

6.2. Lokalizace a volumetrická kvantifikace rýh

Ke splnění cíle výzkumu byl vytvořen statisticky významný vzorek volumetricky kvantifikovaných efemérních rýh. Rýhy byly zaměřovány během období výskytu přívalových srážek v letech 2009 až 2012. Zaměření rýh probíhalo koncem měsíce srpna, případně začátkem září, tj. krátce před sklizní plodiny pěstované na daném zemědělském pozemku.

V roce 2009 bylo identifikováno 5 výrazných rýh v povodí Luhy na Přerovsku, kde byla zaznamenána extrémní přívalová srážka. Během roku 2010 byly identifikovány 2 rýhy na území obce Šardice na Hodonínsku a další 2 u Šlapanic u Brna. Další tři byly zaměřeny během roku 2011, a to u Hodic na Jihlavsku a v Šardicích na Hodonínsku. Na začátku vegetační sezóny roku 2012 byl připraven a rozeslán dotazník pro starosty všech obcí Jihomoravského kraje s cílem získání informací o lokalitách, kde dochází ke škodám způsobeným vodní erozí. Soubor obdržených údajů byl dále doplněn o data uvedená na portálu Ministerstva zemědělství, kde jsou shromažďovány závěry „erozního monitoringu“ prováděného starosty obcí a pracovníky pozemkových úřadů. Pomocí hydrologických nástrojů dostupných v prostředí ArcMap byly na základě získaných informací určeny lokality vhodné k zaměření erozních odnosů. Během roku 2012 bylo zaměřeno 13 efemérních rýh (Drongová, 2013).

Z celkového počtu 25 rýh bylo 22 kvantifikováno volumetricky. Zbylé 3 nemohly být pro své extrémní rozměry postihnuty touto metodou. Proto došlo k určení jejich základních parametrů pomocí měřičského pásma.

Níže uvedená tabulka je seznamem všech provedených měření včetně později přiřazených kódů (sloupec *Označení DSO*). Tyto kódy budou dále v textu používány pro přehlednější prezentaci dosažených výsledků. V tabulce je kromě data měření a lokalizace rýhy uvedena i plodina, která byla na pozemku pěstovaná v sezoně, ve které probíhalo měření.

Tab. 14: Seznam zaměřených rýh

Označení DSO	Datum zaměření	Lokalizace rýhy			Kultura
		Katastrální území	Okres	Kraj	
DSO1_LUH_2009	30.9.2009	Jindřichov u Hranic	Přerov	Olomoucký	kukuřice
DSO2_LUH_2009	30.9.2009	Nejdek u Hranic	Přerov	Olomoucký	kukuřice
DSO3_LUH_2009	30.9.2009	Nejdek u Hranic	Přerov	Olomoucký	kukuřice
DSO12_LUH_2009	30.9.2009	Dub u Nového Jičína	Nový Jičín	Moravskoslezský	kukuřice
DSO13_LUH_2009	30.9.2009	Dub u Nového Jičína, Polouvsí	Nový Jičín	Moravskoslezský	kukuřice
DSO1_ŠLP_2010_1.měření	9.7.2010	Bedřichovice	Brno-venkov	Jihomoravský	kukuřice
DSO1_ŠLP_2010_2.měření	10.8.2010				
DSO2_ŠLP_2010_1.měření	9.7.2010	Šlapanice u Brna	Brno-venkov	Jihomoravský	kukuřice
DSO2_ŠLP_2010_2.měření	10.8.2010				
DSO2_ŠLP_2010_3.měření	22.9.2010				
DSO1_ŠAR_2010_1. měření	8.7.2010	Šardice	Hodonín	Jihomoravský	kukuřice
DSO1_ŠAR_2010_2. měření	11.8.2010				
DSO1_ŠAR_2010_3. měření	23.9.2010				
DSO2_ŠAR_2010_1. měření	8.7.2010	Šardice	Hodonín	Jihomoravský	kukuřice
DSO1_HOD_2011	22.9.2011	Hodice	Jihlava	Vysočina	kukuřice
DSO2_HOD_2011	22.9.2011	Hodice	Jihlava	Vysočina	kukuřice
DSO1_ŠAR_2011	28.7.2011	Šardice	Hodonín	Jihomoravský	kukuřice
DSO1_RAD_2012	28.8.2012	Lipová u Přerova	Přerov	Olomoucký	kukuřice
DSO2_RAD_2012	28.8.2012	Lipová u Přerova	Přerov	Olomoucký	kukuřice
DSO3_RAD_2012	28.8.2012	Lipová u Přerova	Přerov	Olomoucký	kukuřice
DSO1_DOM_2012	30.8.2012	Domašov	Brno-venkov	Jihomoravský	čirok
DSO2_DOM_2012	30.8.2012	Domašov	Brno-venkov	Jihomoravský	čirok
DSO3_DOM_2012	30.8.2012	Domašov	Brno-venkov	Jihomoravský	čirok
DSO4_DOM_2012	6.9.2012	Domašov	Brno-venkov	Jihomoravský	čirok
DSO5_DOM_2012	6.9.2012	Domašov	Brno-venkov	Jihomoravský	čirok
DSO1_M_2012	2.9.2012	Mladoňovice na Moravě	Třebíč	Vysočina	kukuřice
DSO2_M_2012	2.9.2012	Mladoňovice na Moravě	Třebíč	Vysočina	kukuřice
DSO1_H_2012	5.9.2012	Velké Hostěradky	Břeclav	Jihomoravský	pohanka
DSO1_T_2012	18.8.2012	Trstěnice u Moravského Krumlova	Znojmo	Jihomoravský	holá půda - po sklizni obiloviny
DSO1_DZ_2012	18.8.2012	Džbánice	Znojmo	Jihomoravský	holá půda - po sklizni obiloviny

6.3. Popis parametrů a charakteristik vzorku zaměřených rýh

6.3.1. Základní parametry rýh

Během let 2009 až 2012 bylo celkově zaměřeno 25 projevů eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku. Níže jsou uvedeny základní statistické charakteristiky vzorku identifikovaných rýh.

V Tab. 15 je každá rýha označená unikátním kódem (shodným s označením v Tab. 14) a jsou zde uvedeny průměrné parametry jednotlivých rýh.

Délkou rýhy je myšlena skutečně zaměřená délka určená dle místního šetření a posléze ověřena hydrologickými analýzami dostupnými v prostředí ArcMap. Jako začátek rýhy bylo označeno místo, kde v terénu docházelo k přeměně projevů plošné a rýhové eroze na hluboké efemérní rýhy. Jako konec rýhy byl identifikován bod, kde docházelo k zániku koryta rýhy a významné sedimentaci půdního materiálu. Často se tato ústí nacházela na hranicích zemědělských pozemků. Několik rýh ústilo do permanentních koryt – potoků.

Průměrná šířka rýhy byla získána jako vážený aritmetický průměr šířek všech měřených příčných profilů. Hloubka byla stanovena v ose rýhy a její průměrná hodnota byla opět vypočtena jako vážený průměr. Jako váhy byly v obou případech použity délky jednotlivých úseků rýhy mezi měřeními.

Délka měřených rýh se pohybovala od 35 m do 1151 m. Průměrná šířka od 0.8 m po 5.8 m. Hloubka se průměrně pohybovala od 0.1 po 0.4 m (Drongová, 2013).

Tab. 15: Základní charakteristiky měřených rýh

Označení rýhy	Délka rýhy [m]	Průměrná šířka rýhy [m]	Průměrná hloubka zaměřená v ose rýhy [m]
DSO1_LUH_2009	305	1.01	0.29
DSO2_LUH_2009	260	0.87	0.22
DSO3_LUH_2009	474	2.24	0.37
DSO12_LUH_2009	220	2.64	0.21
DSO13_LUH_2009	340	2.53	0.33
DSO1_ŠLP_2010	195	1.73	0.18
DSO2_ŠLP_2010	265	2.74	0.14
DSO1_ŠAR_2010	150	2.48	0.16
DSO2_ŠAR_2010	230	2.73	0.10
DSO1_HOD_2011	77	1.45	0.20
DSO2_HOD_2011	130	1.54	0.23
DSO1_ŠAR_2011	230	0.87	0.21
DSO1_RAD_2012	311	3.13	0.09
DSO2_RAD_2012	90	3.59	0.06
DSO3_RAD_2012	35	1.56	0.08
DSO1_DOM_2012	175	3.33	0.25
DSO2_DOM_2012	137	2.70	0.23
DSO3_DOM_2012	53	0.84	0.32
DSO4_DOM_2012	111	0.98	0.19
DSO5_DOM_2012	126	1.27	0.25
DSO1_M_2012	60	2.70	0.12
DSO2_M_2012	180	5.81	0.07
DSO1_H_2012	147	2.37	0.13
DSO1_T_2012	1151	3.52	0.05
DSO1_DZ_2012	1039	4.30	0.07

6.3.2. Výzkum vývoje parametrů rýh po jejich délce

Za účelem podrobnějšího popisu parametrů a charakteristik zaměřených rýh byl proveden výzkum vývoje parametrů rýhy po její délce. Z výše uvedeného vzorku byly vyňaty ty rýhy, které nebyly měřeny pomocí erodoměru. V následujících kapitolách jsou uvedeny grafy vývoje jednotlivých charakteristik po délce rýhy od jejího začátku (staničení = 0 m) po ústí rýhy.

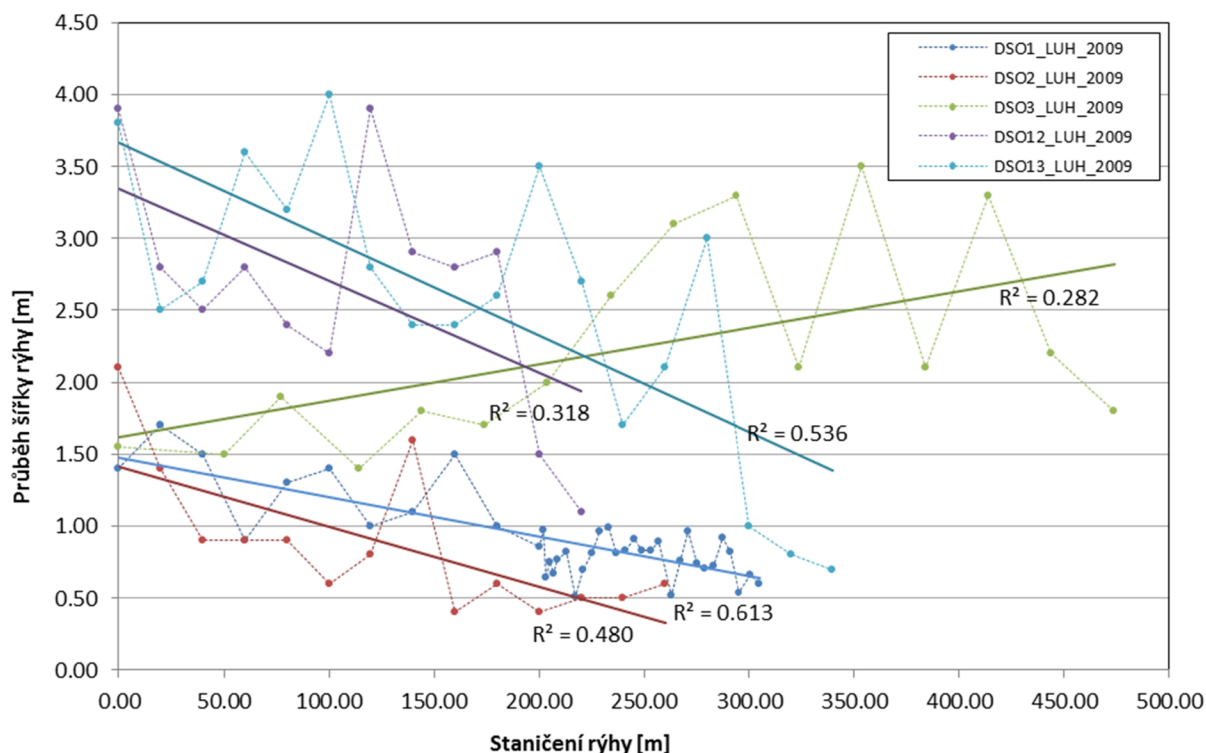
Pro lepší orientaci jsou jednotlivé body, ve kterých docházelo k měření předmětných charakteristik spojeny úsečkami. V terénu byly vzdálenosti měření voleny dle charakteru dané rýhy tak, aby byla postihnuta každá významnější změna v charakteristikách. I přesto je ale velikost dané charakteristiky rýhy mezi body měření spíše jen orientačním údajem. Za účelem znázornění trendů jednotlivých parametrů rýhy po její délce byly do grafů přidány regresní přímky. Pro přehlednost jsou grafy uvedeny pro každý rok, ve kterém probíhalo měření.

Průběh šířky rýhy po délce

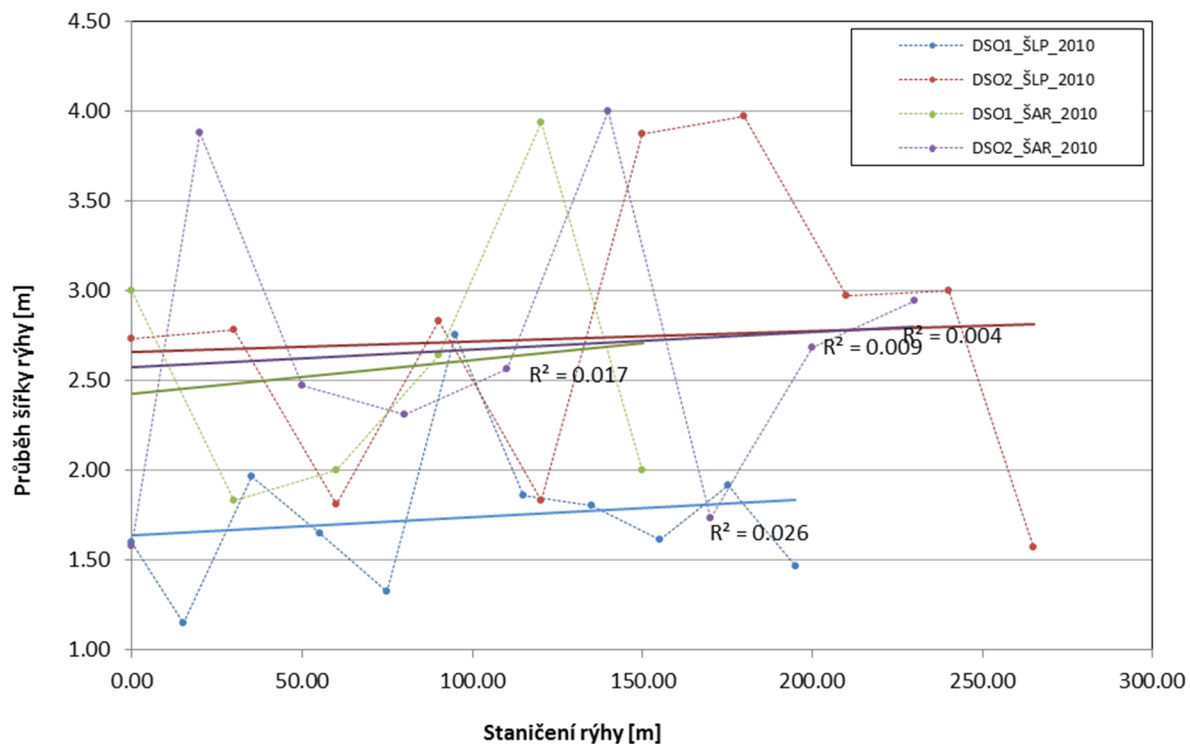
Téměř všechny rýhy měřené v roce 2009 vykazují trend snižování své šířky s délkou. Oproti tomu u rýh měřených v dalších letech se šířka s délkou převážně zvětšuje, ovšem z hlediska často nízkým hodnotám koeficientu determinace nelze jednoznačně hovořit o trendu.

V roce 2011 byla zaměřena rýha v Šardicích (ozn. DSO1_ŠAR_2011), jejíž vývoj šířky po délce má konstantní trend a rozptyl bodového měření šířky je nižší než u ostatních rýh. Jednalo se o rýhu, která nevznikla v přirozené dráze soustředěného povrchového odtoku, ale na hranici zemědělských pozemků a byla iniciována nesprávně aplikovanými agrotechnologiemi. Tato rýha byla limitována okolním terénem, který byl rezistentní vůči rozrušení.

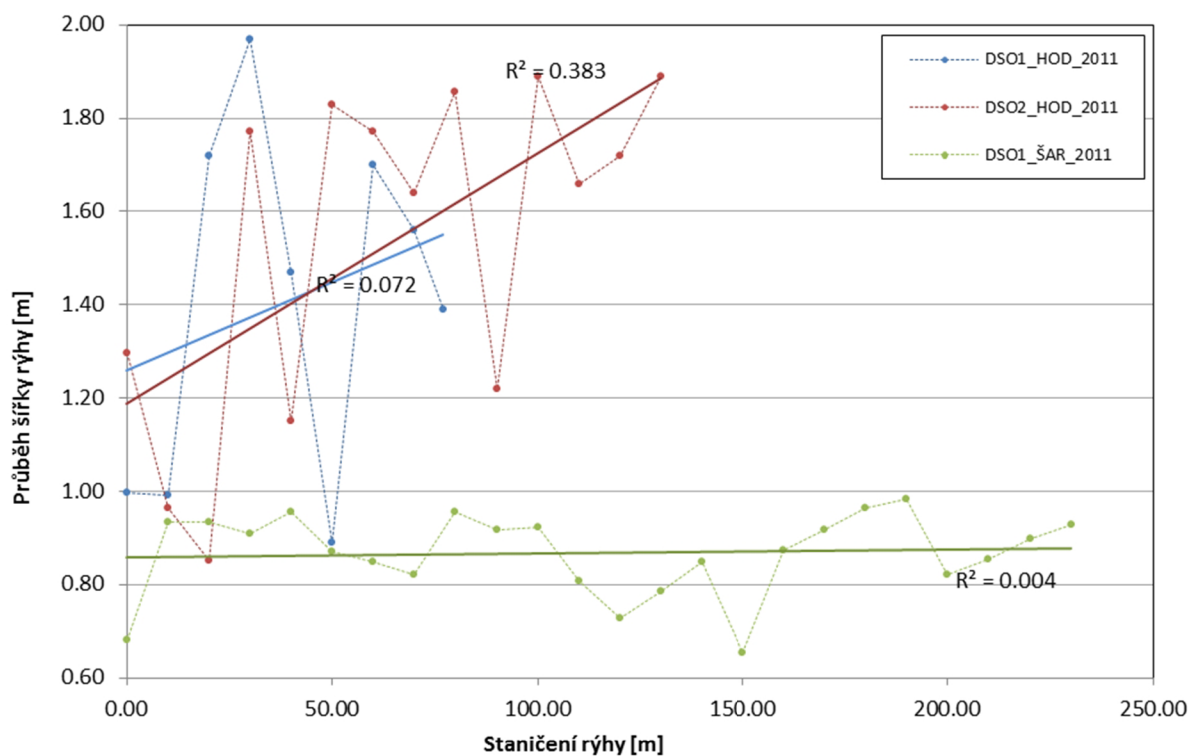
Z grafů je v převládajícím množství rýh viditelné snížení či ustálení šířky v posledních měřených příčných profilech. To je pravděpodobně způsobeno poklesem transportní kapacity povrchového odtoku, která v dolních partiích svahu, kde bývá menší podélný sklon, klesá.



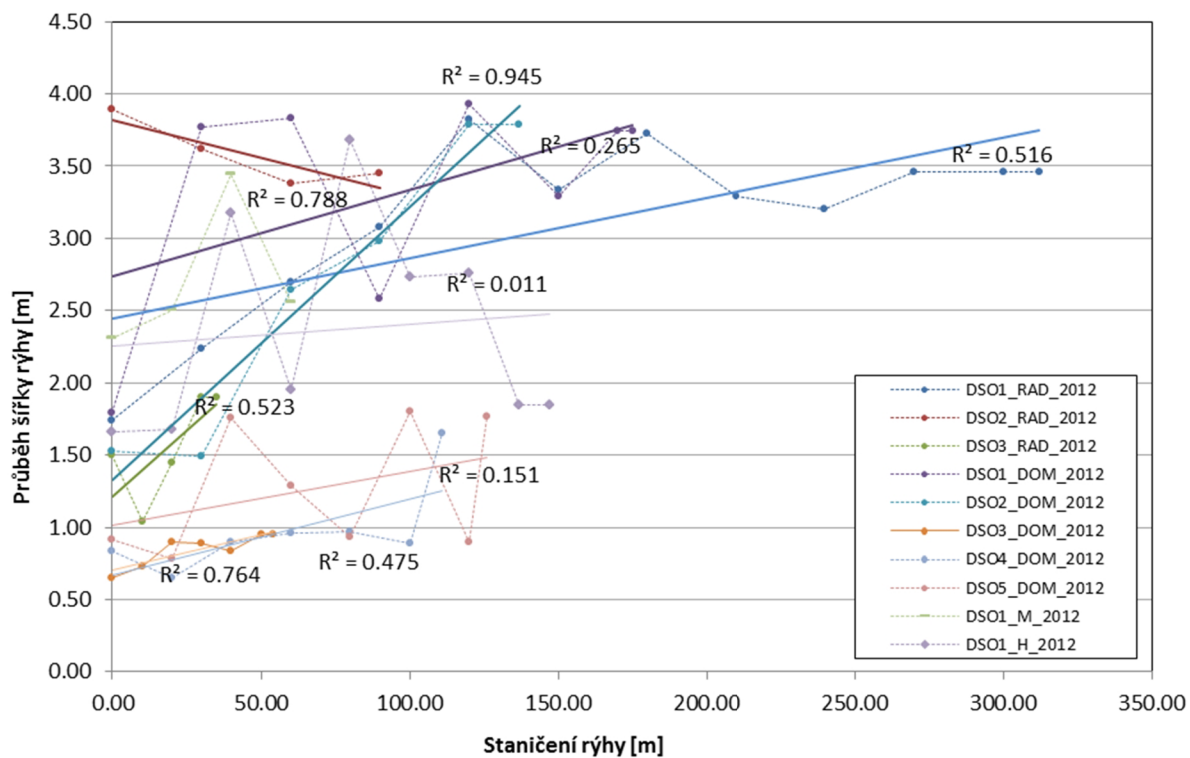
Graf 9: Průběh šířky rýhy po její délce u rýh zaměřených v roce 2009



Graf 10: Průběh šířky rýhy po její délce u rýh zaměřených v roce 2010



Graf 11: Průběh šířky rýhy po její délce u rýh zaměřených v roce 2011

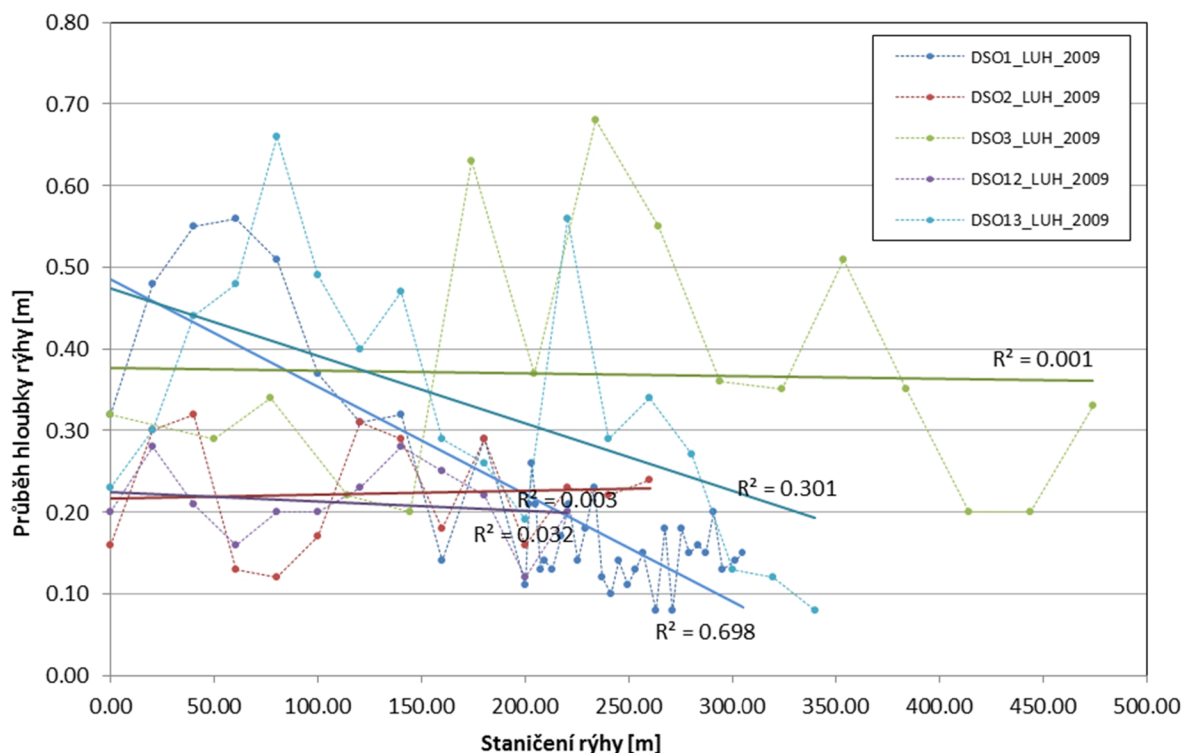


Graf 12: Průběh šířky rýhy po její délce u rýh zaměřených v roce 2012

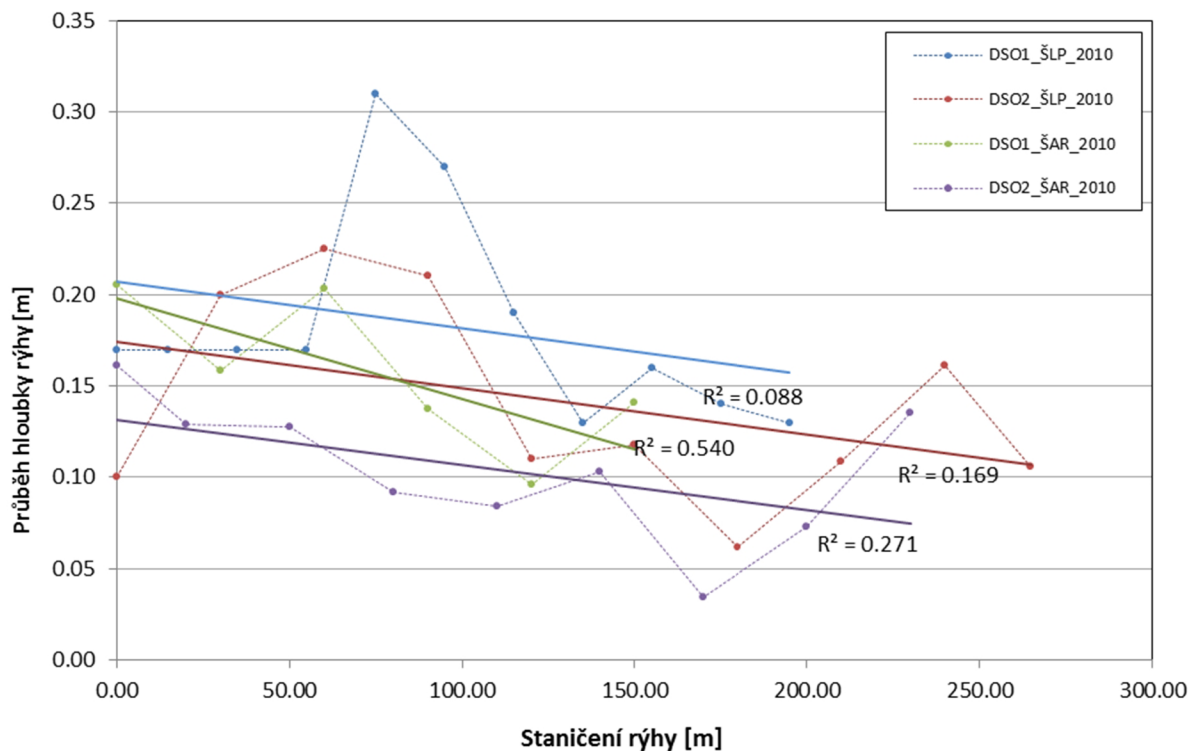
Průběh hloubky rýhy po délce

Jak bylo pozorováno při terénním měření, hloubka všech rýh byla po délce proměnlivá. Každá z rýh obsahovala poměrně hluboká místa – deprese pod svislou stěnou, kde dochází k tlumení kinetické energie proudu. Proměnlivost hloubky rýhy po její délce popisují i zahraniční autoři (např. Morgan (2005) či Gordon (2007)).

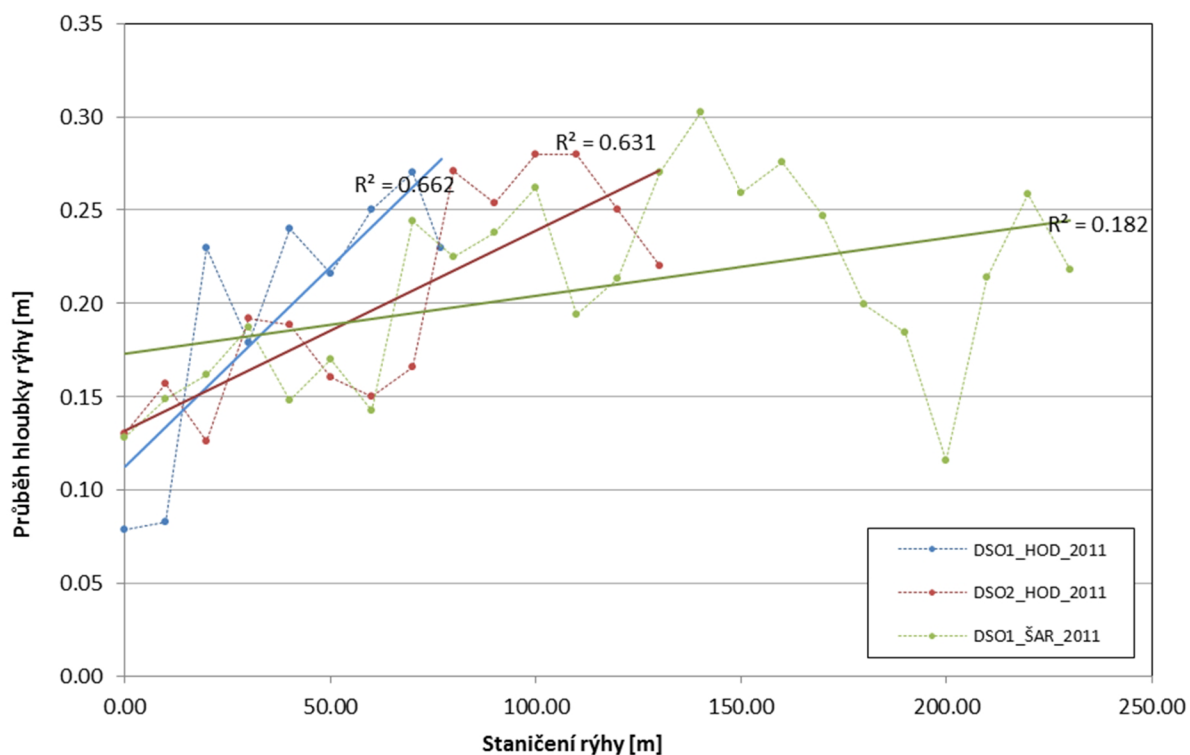
Bylo pozorováno, že větších hloubek dosahovaly rýhy s průměrným sklonem DSO a přispívajícího povodí nad 10%.



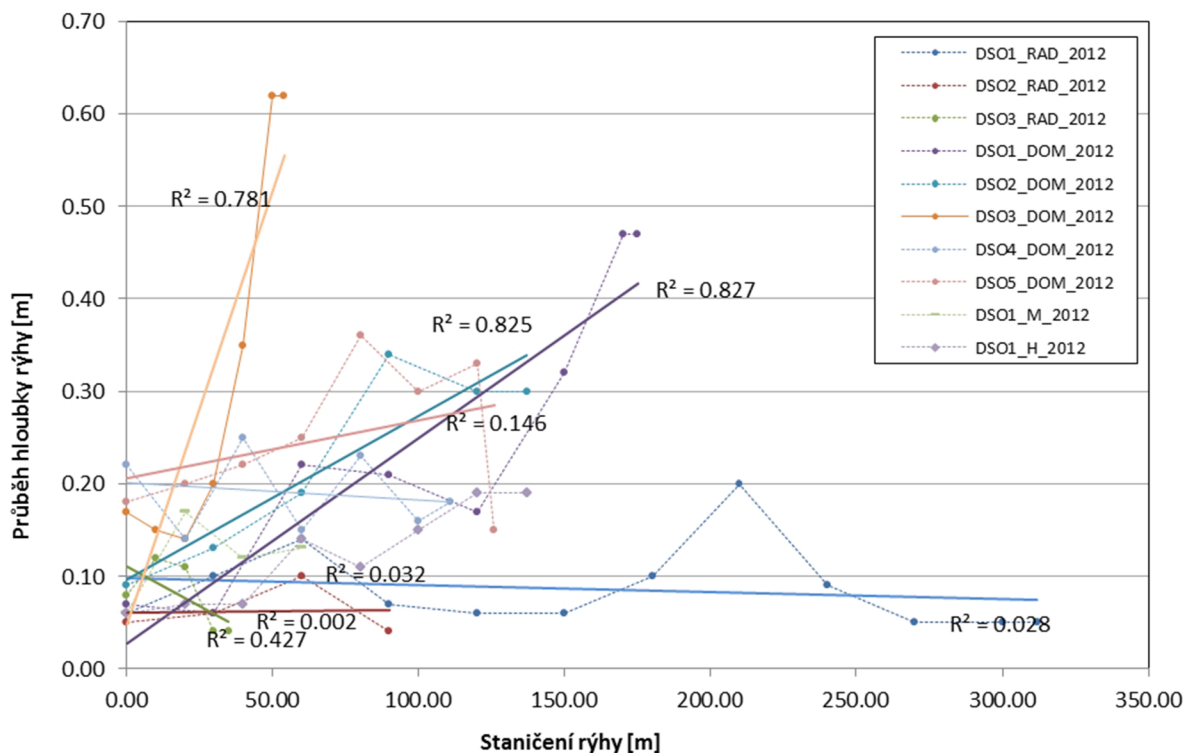
Graf 13: Průběh hloubky rýhy po délce rýh měřených v roce 2009



Graf 14: Průběh hloubky rýhy po délce rýh měřených v roce 2010



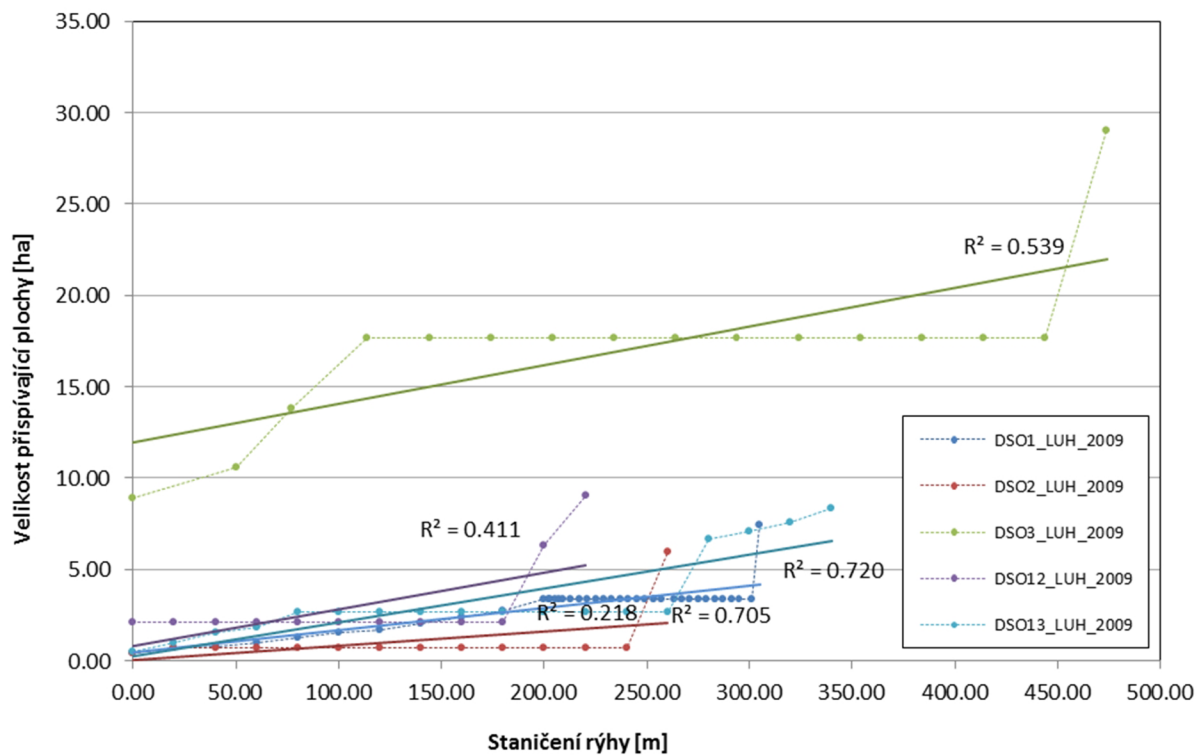
Graf 15: Průběh hloubky rýhy po délce rýh měřených v roce 2011



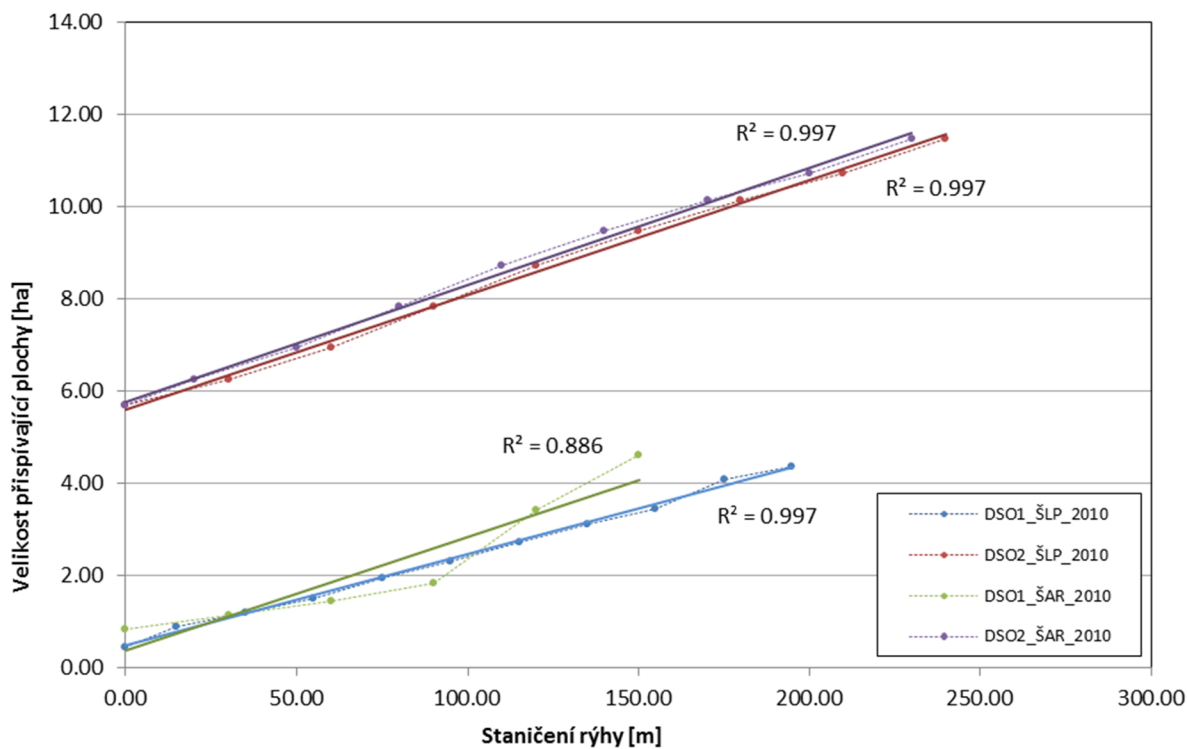
Graf 16: Průběh hloubky rýhy po délce rýh měřených v roce 2012

Velikost přispívající plochy po délce rýhy

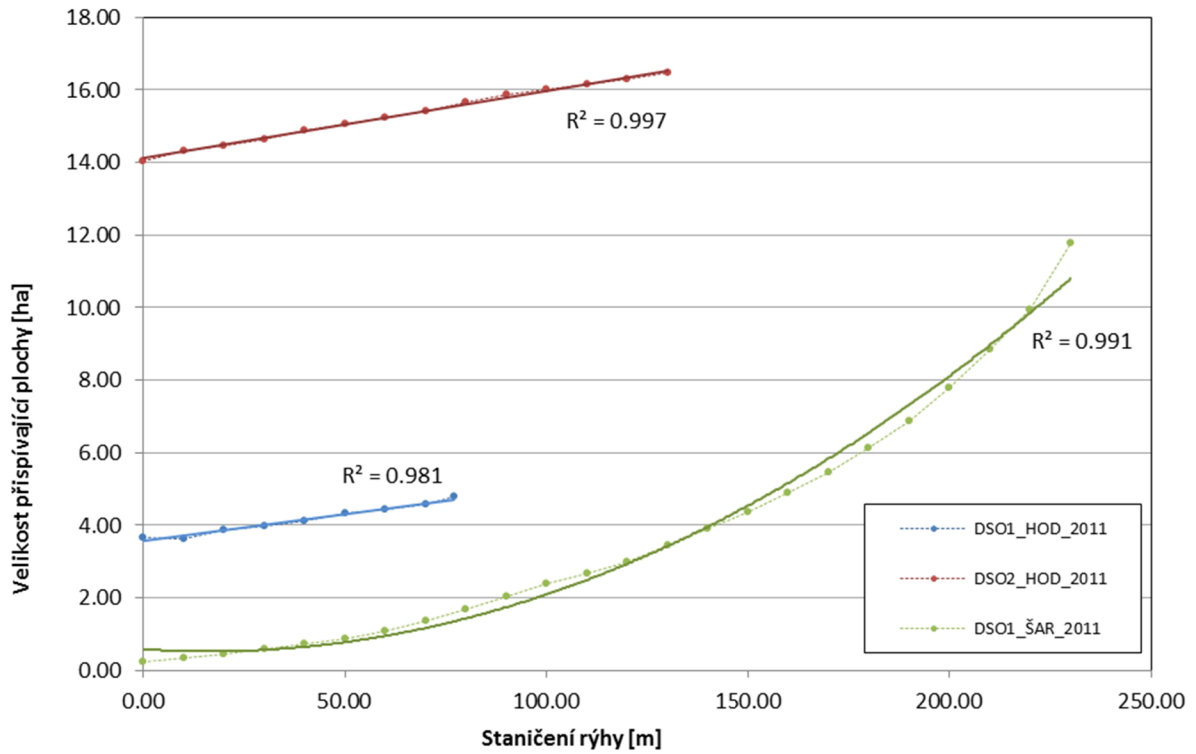
Mezi délkou rýhy a velikostí přispívající plochy rýhy v daném bodě staničení existuje ve většině měřených případů statisticky významná lineární závislost. U jediné z měřených rýh (DSO1_ŠAR_2011) byla zjištěná nelineární závislost a jako nejvhodnější byl zvolen polynomičtý typ regrese (2. stupně). Jednalo se o hlubokou efemérní rýhu, která byla zaměřena na hranici pozemku a která nebyla identifikována v přirozené dráze soustředěného povrchového odtoku. Přispívající plocha této rýhy byla určena na základě poznatků z terénního šetření a nejednalo se o hydrologicky vymezené povodí, jelikož rýha převáděla i část povrchového odtoku z vedlejšího povodí. Tento povrchový odtok byl do prostoru rýhy sváděn výše ležící polní cestou. Níže jsou zobrazeny grafy pro jednotlivá léta měření.



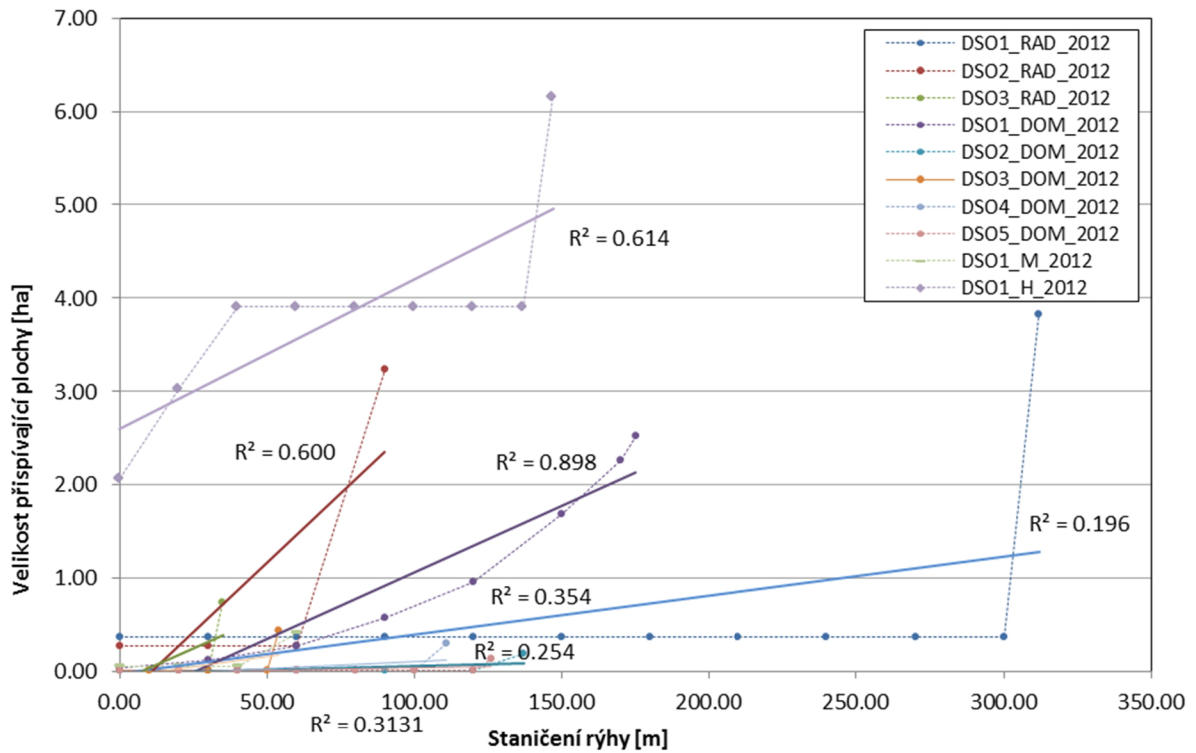
Graf 17: Nárůst velikosti přispívající plochy po délce u rýh měřených v roce 2009



Graf 18: Nárůst velikosti přispívající plochy po délce u rýh měřených v roce 2010



Graf 19: Nárůst velikosti přispívající plochy po délce u rýh měřených v roce 2011



Graf 20: Nárůst velikosti přispívající plochy po délce u rýh měřených v roce 2012

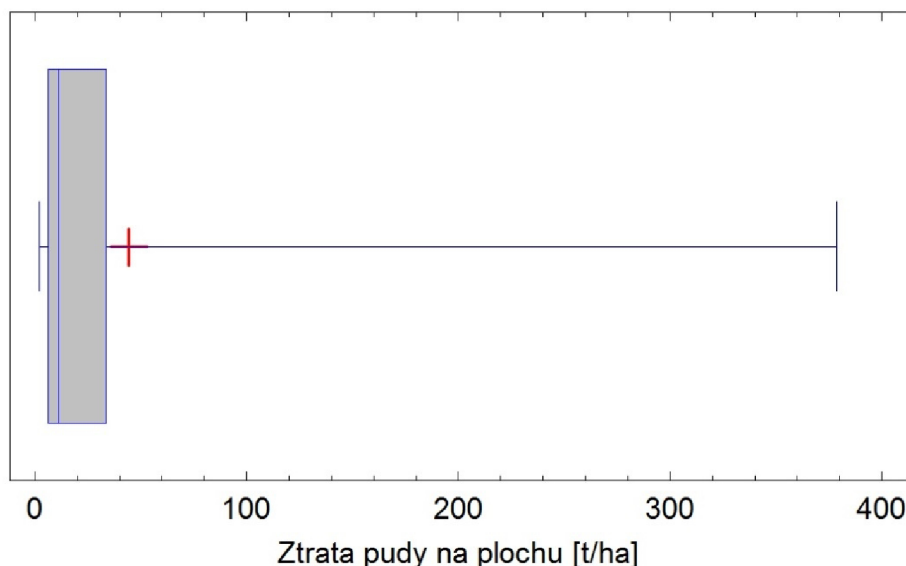
6.3.3. Objem rýh

Níže jsou uvedeny základní statistické charakteristiky vzorku identifikovaných rýh včetně zjištěného objemu. Objem rýh činil průměrně téměř 70 m^3 .

Tab. 16: 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
Rozsah	1116.0	5.0	0.3	328.4

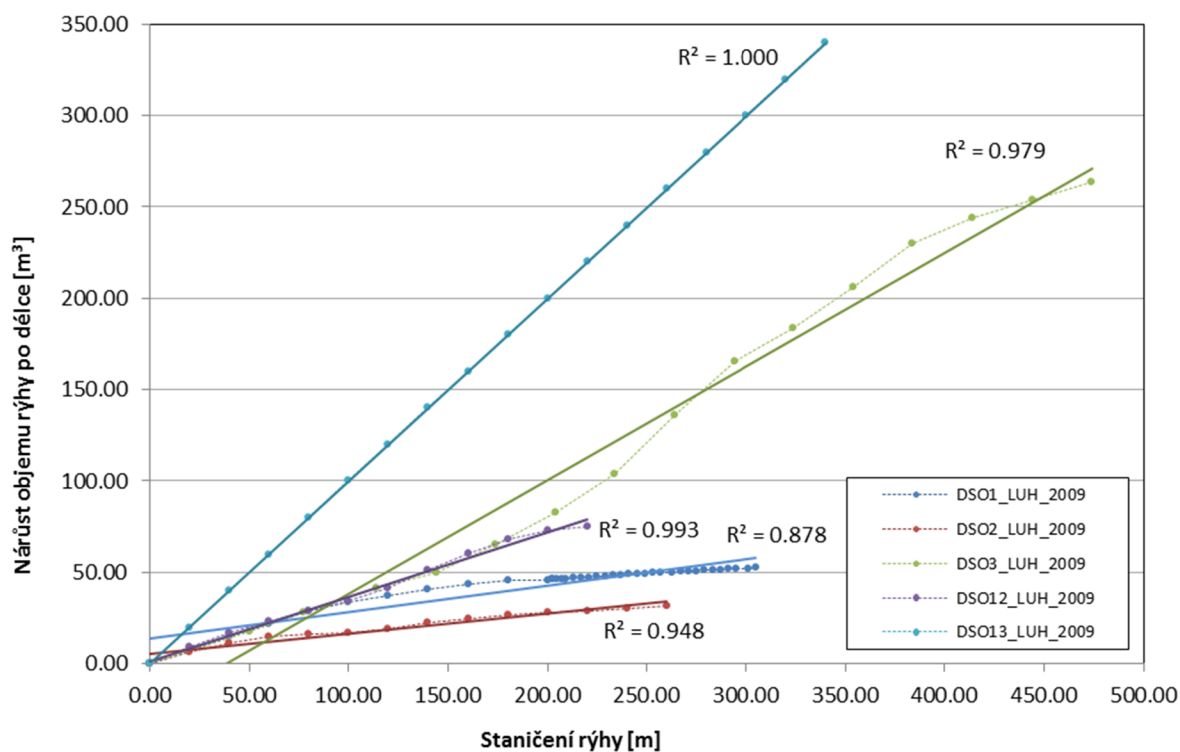
Pro představu o závažnosti problému byla zaměřená ztráta půdy přepočtena na přispívající plochu rýhy a bylo zjištěno, že průměrně tato ztráta dosahuje téměř $50 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, přičemž maximální přípustný smyv (u hlubokých půd) je stanoven na $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Tento limit je navíc často dosažen či překročen vlivem mezirýhové (plošné) vodní eroze. Níže uvedený Graf 21 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 červený křížek značí střední hodnotu (Drongová, 2013).



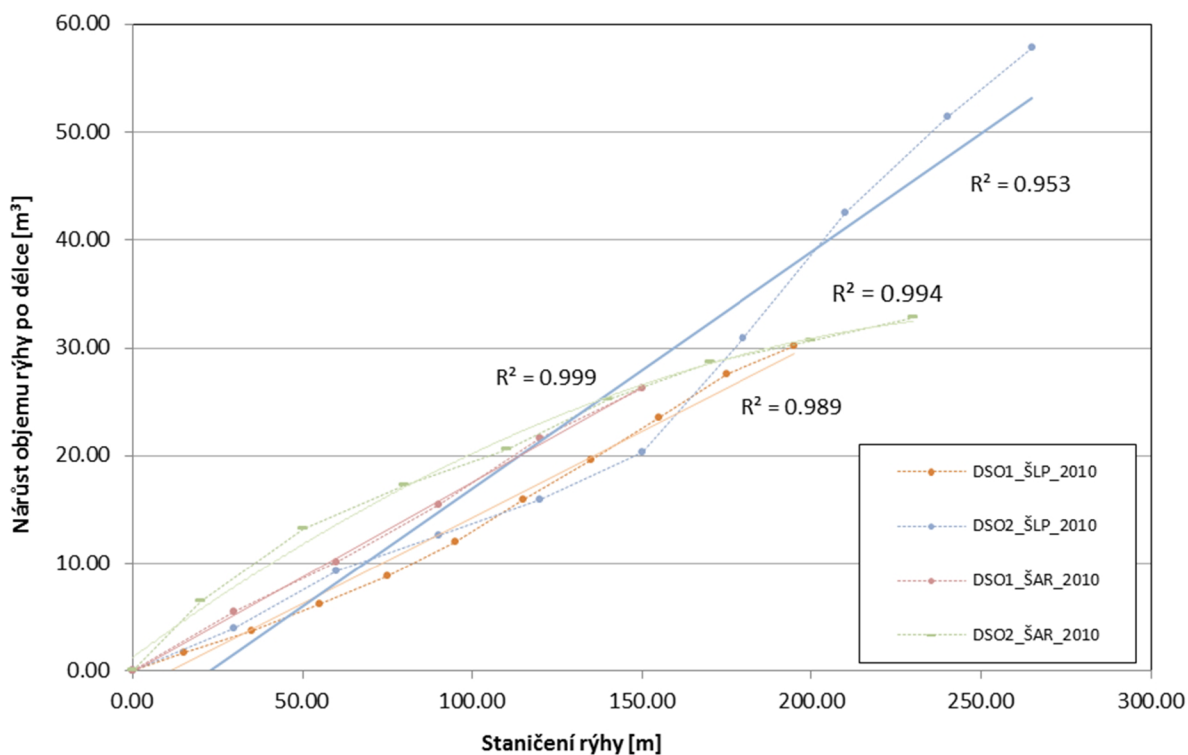
Graf 21: Krabicový graf – analýza vzorku měřených ztrát půdy přepočtené na přispívající plochu rýhy (Drongová, 2013)

Objem rýhy po její délce

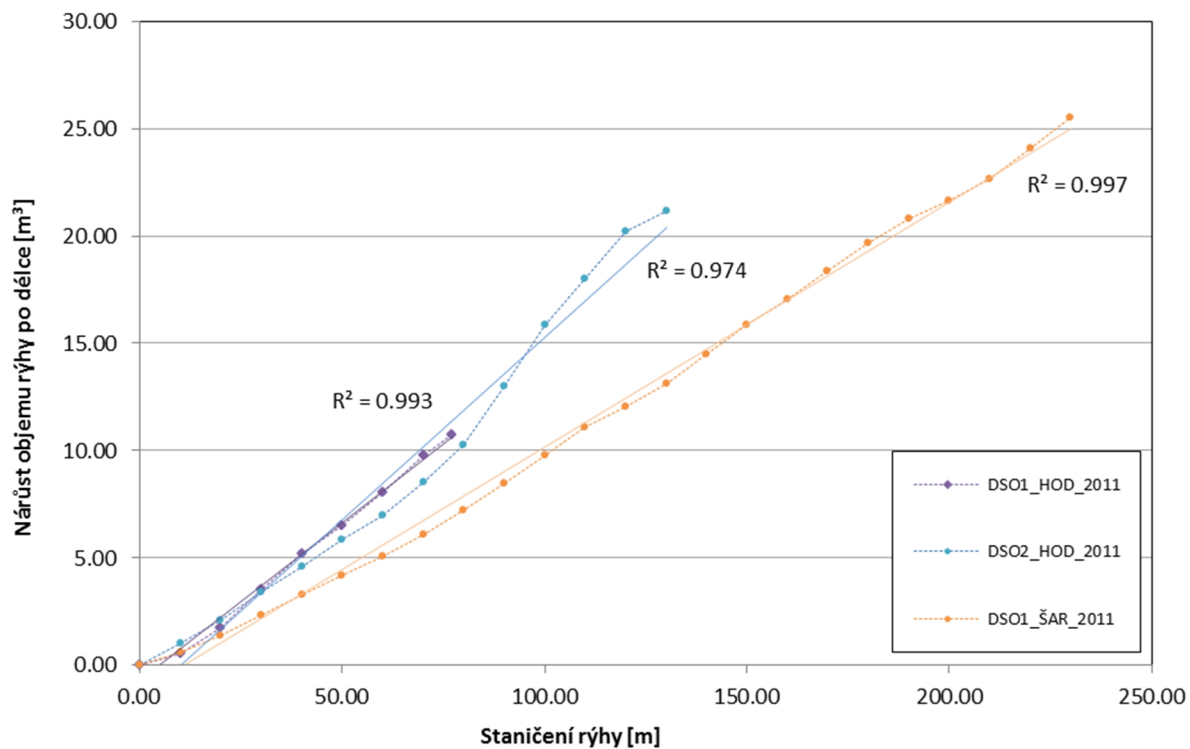
Nárůst měřeného objemu po délce rýhy lze u většiny z nich prohlásit za lineární. Pouze u DSO2_ŠAR_2010 byl průběh proložen polynomickým typem křivky (2. řádu).



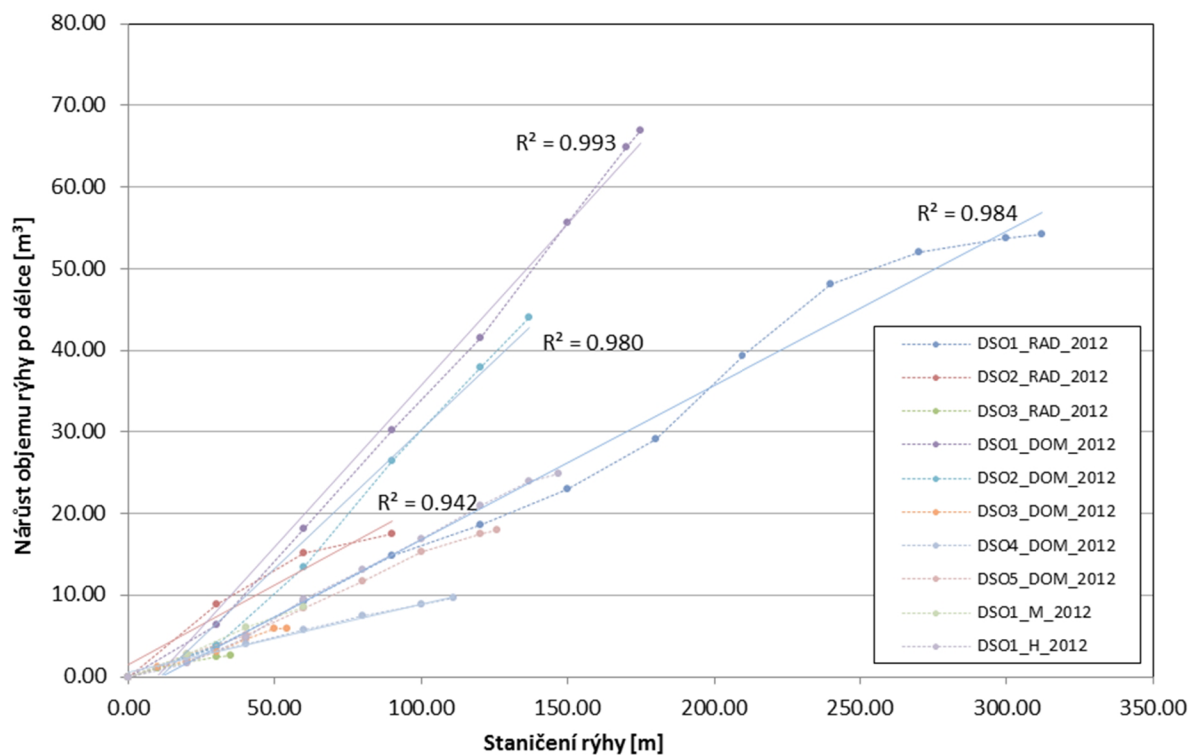
Graf 22: Nárůst objemu rýhy po její délce u rýh měřených v roce 2009



Graf 23: Nárůst objemu rýhy po její délce u rýh měřených v roce 2010



Graf 24: Nárůst objemu rýhy po její délce u rýh měřených v roce 2011



Graf 25: Nárůst objemu rýhy po její délce u rýh měřených v roce 2012

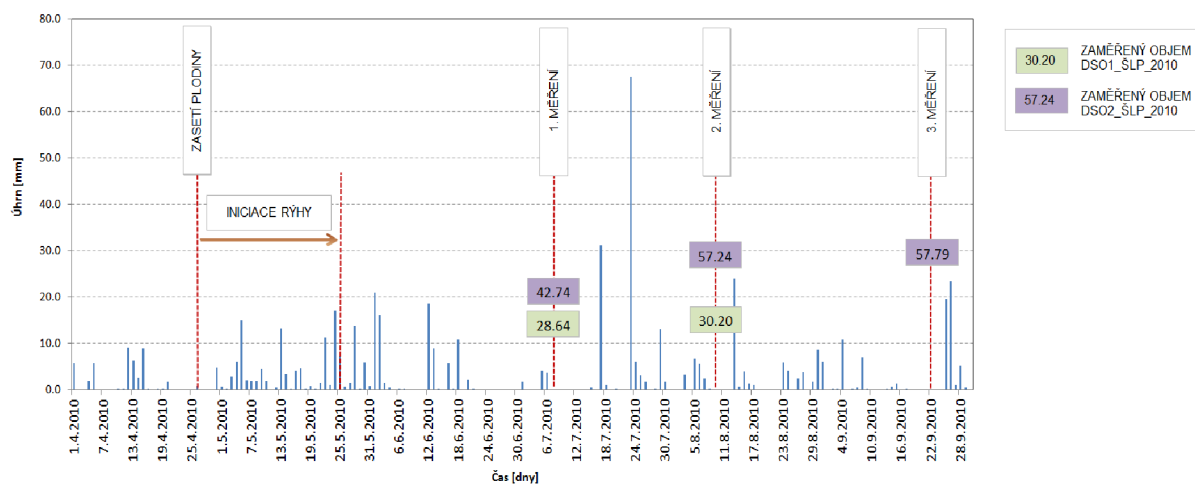
Dynamika vývoje rýh

Ve vegetační sezóně roku 2010 byly 3 rýhy zaměřeny, kromě období před sklizní, také v době výskytu přívalových srážek. Jednalo se o 2 rýhy u Šlapanic (v kú Bedřichovice a Šlapanice u Brna) a jednu v katastru obce Šardice. Cílem bylo postihnout vývoj hloubky a tvaru rýh v průběhu výskytu přívalových srážek.

Grafy níže znázorňují časovou řadu úhrnů denních srážek s vyznačením období zasetí plodiny (ve všech případech se jednalo o kukuřici) a dvou nebo tří provedených měření.

V prvním případě (viz Graf 26) je vidět poměrně velký nárůst objemu (mezi prvním a druhým měřením) u DSO2_ŠLP_2010, a to o cca 34%. Tento nárůst způsobila vydatná srážka, která byla zaznamenána mezi 1. a 2. měřením. U rýhy DSO1_ŠLP_2010 nedošlo k tak velkému nárůstu objemu. Tato rýha byla o 70 m kratší a je pravděpodobné, že zde již v období po prvním měření došlo k vyčerpání zdroje oderodovatelného materiálu a další (i když vydatné) srážky již rýhu nemohly podstatně zvětšit.

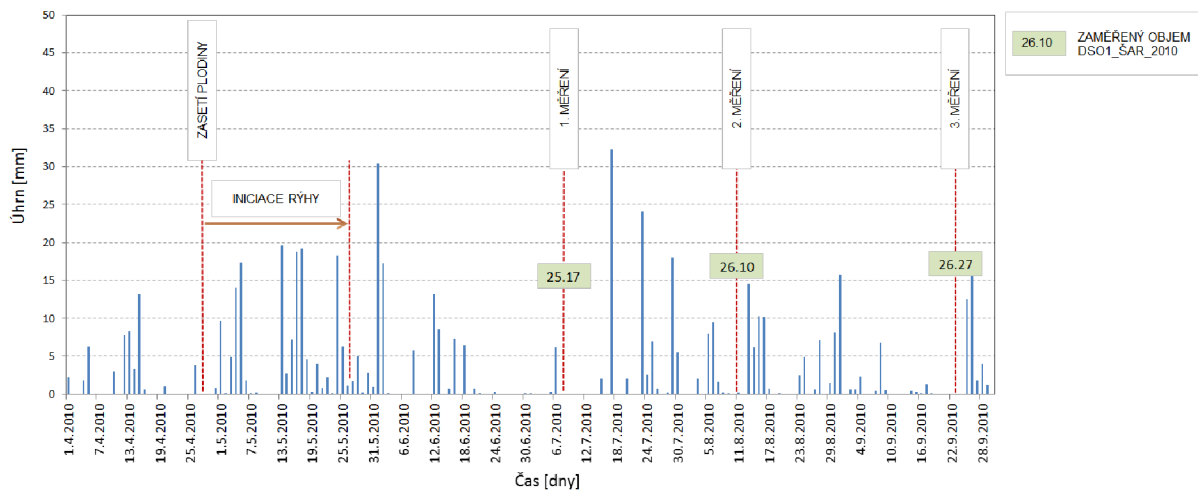
Za zmínku stojí fakt, že po druhém měření přišlo ještě několik srážek s úhrnem srovnatelných s těmi, které rýhu započaly na začátku sezóny, přesto již nedošlo ke zvětšení objemu DSO2_ŠLP_2010. S časem totiž narůstala odolnost půdy proti rozrušení povrchovým odtokem, tj. došlo k nárůstu kritického smykového napětí.



Graf 26: Průběh srážkových událostí ve vegetačním období roku 2010 u Šlapanic

U rýhy měřené v Šardicích je možné pozorovat podobný vývoj jako u DSO1_ŠLP_2010. Srážky zde sice nebyly tak vydatné jako ve Šlapanicích, denní úhrny dosahovaly poloviny maximálního úhrnu ve Šlapanicích.

Stejně vydatné srážky, jako přišly před prvním měřením, byly zaznamenány mezi jednotlivými měřeními, ale žádná z nich již nedokázala výrazněji zvětšit objem rýhy. Délka této rýhy byla o 50 menší než u DSO1_ŠLP_2010.



Graf 27: Průběh srážkových událostí ve vegetačním období roku 2010 v Šardicích

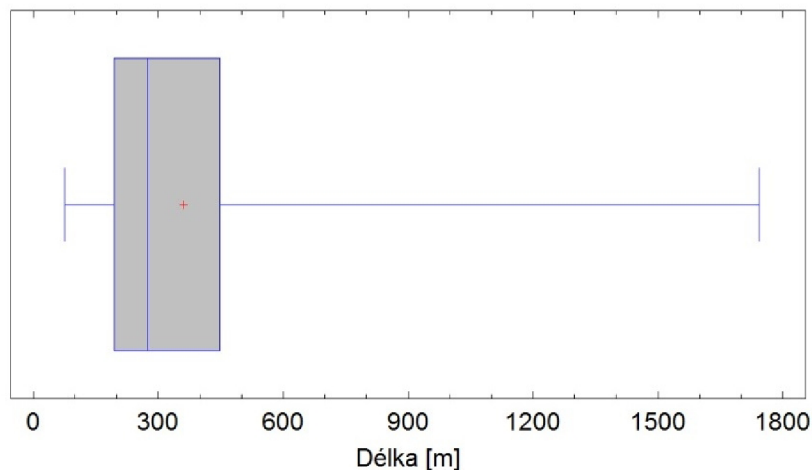
Bylo potvrzeno, že iniciace a největší nárůst objemu rýhy je realizován v období od přípravy pozemku k setí do jednoho měsíce po zasetí nebo sázení, kdy má půda malou smykovou odolnost vůči rozrušení povrchovým odtokem. V následujících obdobích popsaných Wischmeierem a Smithem (1978) dochází ke zvyšování kritického smykového napětí a v případě výskytu srážkového úhrnu překračujícího parametry iniciačního deště již nedochází k výraznějšímu nárůstu objemu rýhy.

6.4. Regresní modely

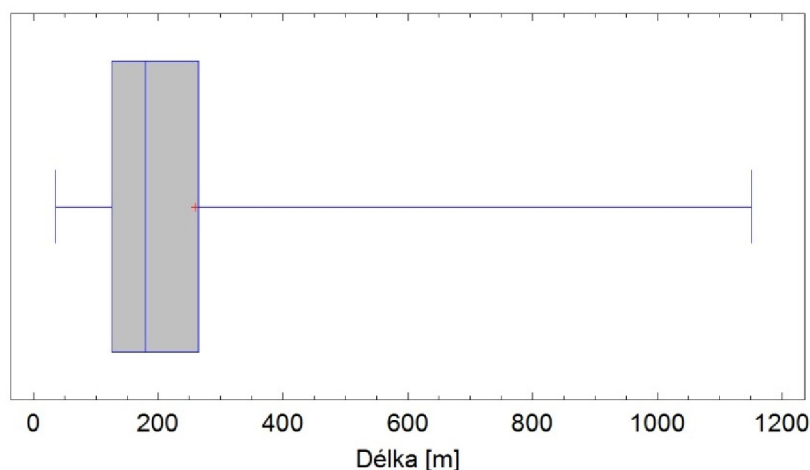
6.4.1. Porovnání souboru dat „Studie MZe“ a přímého měření

Byly porovnány soubory vzorku erozně ohrožených DSO (Ekotoxa, 2011) a měřených rýh. Níže jsou uvedeny krabicové grafy obou souborů. Ve vybarveném obdélníku je označen medián a interkvartilové rozpětí (25-75 %), další horizontální čáry označují minimální a maximální hodnotu vzorku.

Jak je vidět níže, střední hodnota je u měřených dat o více než 100 metrů nižší než u vymezených erozně ohrožených DSO. Směrodatné odchylky jsou téměř shodné a pohybují se okolo 270 m.



Graf 28: Krabicový graf – analýza vzorku délek erozně ohrožených DSO



Graf 29: Krabicový graf – analýza vzorku měřených délek rýhy

6.4.2. Regresní model z dat „Studie MZe“

Závěrem terénního průzkumu bylo konstatováno, že prověřené erozně ohrožené DSO identifikované v rámci „Studie MZe“ (Ekotoxa, 2011) mají (za současného výskytu erozně účinné srážky v období, kdy je povrch náchylný k erozi) erozní potenciál a tudíž je možné z tohoto podkladu vycházet a podrobit jej v metodice předepsaným analýzám.

Regresní model určující vztah mezi délkou DSO jako závisle proměnnou a deseti nezávislými proměnnými, které jsou uvedeny v Tab. 12, byl pomocí vícerozměrné lineární regrese popsán následovně:

$$Y = 195.098 - 85.085 \cdot X_1 + 74.3421 \cdot X_2 - 67.002 \cdot X_3 + 1.32549 \cdot X_4 - 68.7738 \cdot X_5 - 31.975 \cdot X_6 + 17.2812 \cdot X_7 + 466.463 \cdot X_8 - 413.68 \cdot X_9 + 2359.25 \cdot X_{10}, \quad (6.1)$$

kde:

Y délka rýhy [m];

X_1 až X_{10} nezávisle proměnné – viz Tab. 12 [jednotky viz Tab. 12].

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:

$$Y = 192.111 - 127.913 \cdot X_5 + 482.38 \cdot X_8 - 429.667 \cdot X_9 + 2369.19 \cdot X_{10}, \quad (6.2)$$

kde:

Y délka rýhy [m];

X_5 až X_{10} nezávisle proměnné – viz Tab. 12 [jednotky viz Tab. 12].

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.

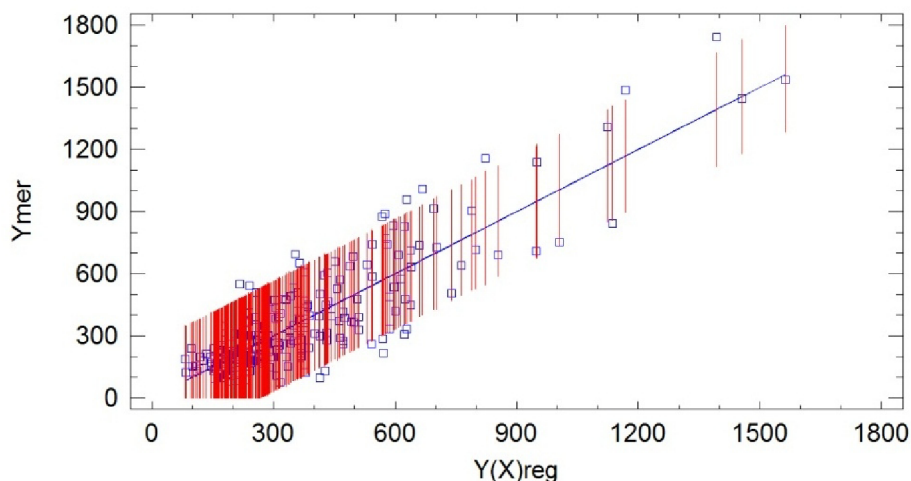
Koeficient determinace R^2 je 0.748 tzn., že model popisuje 74.8% variability Y . Průměrná absolutní chyba odhadu (MAE) je 100.38 m.

Ze vztahu 6.2 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 tabulce níže.

Tab. 17: Popis nezávisle proměnných z regresní rovnice (6.2)

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

Graf 30 znázorňuje porovnání měřených délek DSO (Y_{mer}) získaných ze „Studie MZe“ s jejich odhady pomocí výše uvedené regresní funkce (6.2) se znázorněním 95% intervalů spolehlivosti odhadů $Y(\mathbf{X})$. Měřené délky i odhady délek jsou uvedeny v metrech.



Graf 30: Porovnání měřených délek DSO získaných ze „Studie MZe“ s jejich odhady pomocí regresní funkce se znázorněním 95% intervalů spolehlivosti odhadů $Y(X)$.

6.4.3. Regresní model – data z přímého měření

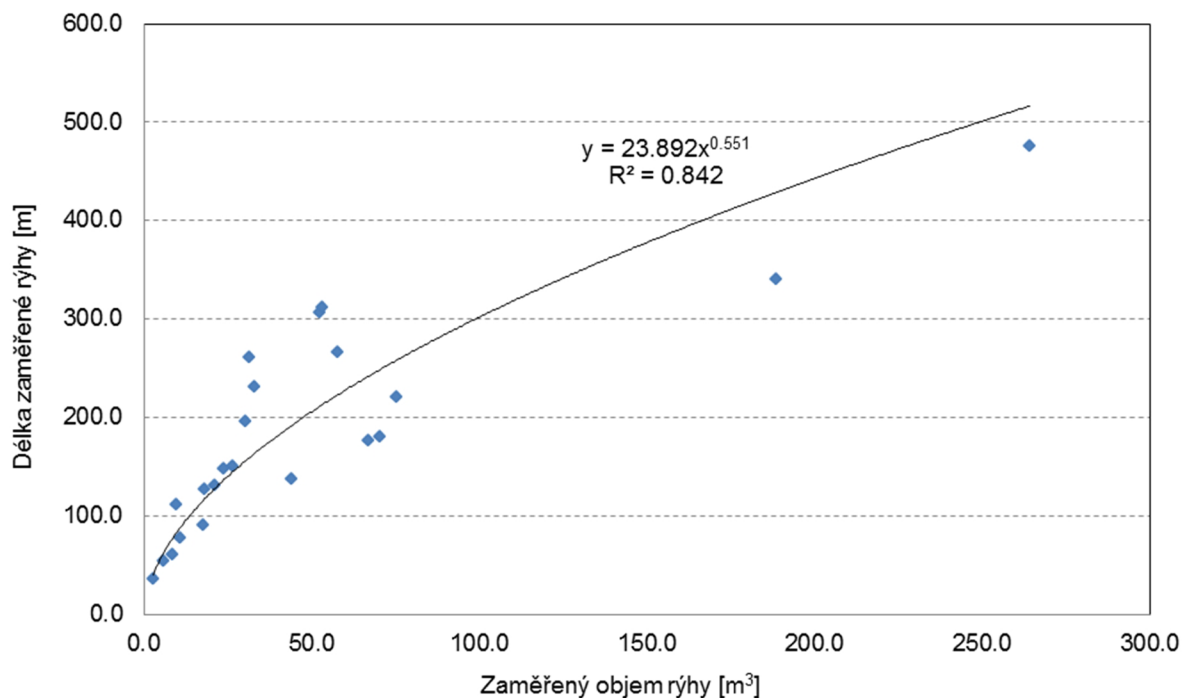
Závislost délky rýhy na jiných faktorech

Podobně jako v případě analýzy erozně ohrožených DSO identifikovaných ve „Studii MZe“ (Ekotoxa, 2011) byly i v rámci měřených rýh hledány závislosti mezi jejich délkou a jinými charakteristikami a činiteli. V případě měřených dat bylo k dispozici větší množství nezávisle proměnných, které vzešly z přímého měření. V rámci přípravy analýzy byla sestavena množina 32 nezávisle proměnných, které byly podrobeny výzkumu jejich korelace s délkou měřených rýh (závisle proměnnou). Dále je uvedena tabulka obsahující seznam všech nezávisle proměnných včetně typu použité regrese a výsledného koeficientu determinace (R^2) jako ukazatele síly lineární (příp. mocninné) závislosti. Nezávisle proměnné jsou seřazeny dle velikosti koeficientu determinace.

Tab. 18: Seznam nezávisle proměnných seřazených podle velikosti koeficientu determinace

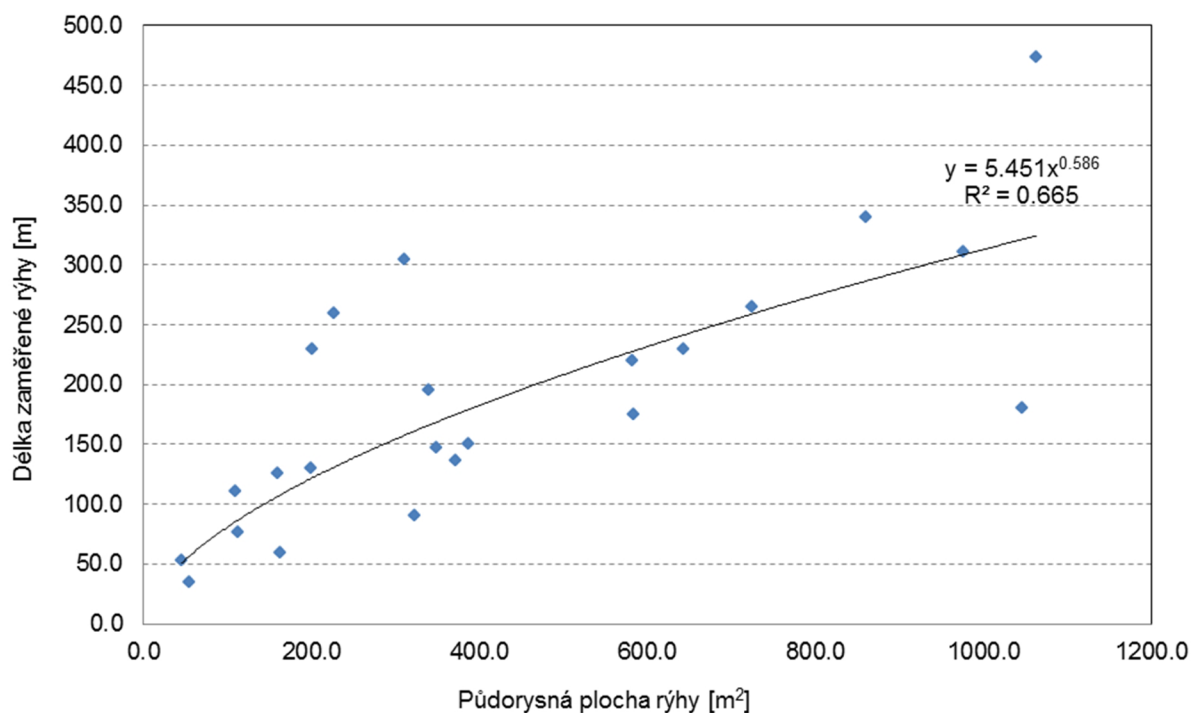
Jednoduchá regrese - závislost délky na jiných faktorech		
Nezávisle proměnná	Typ regrese	R ²
Objem rýhy	mocninný	0.842
Plocha rýhy	mocninný	0.665
Q _{max} , N=100 (při IPS 2)	lineární	0.496
CN	lineární	0.430
Max. délka údolnice	lineární	0.382
HSP	lineární	0.292
Plocha sběrného povodí	lineární	0.246
Střední profilová rychlost při Q _{max}	lineární	0.230
Q _{max} při max. úhrnu za veg. období	lineární	0.195
Průměrná hloubka DSO	lineární	0.175
KG - tvar povodí	lineární	0.133
Prům. nadm. výška povodí	lineární	0.099
Úhrn maximální srážky ve vegetačním období	lineární	0.093
Průměr 1. čísla BPEJ v ploše povodí	lineární	0.091
AS index	lineární	0.090
Prům. sklon rýhy	lineární	0.066
Prům. sklon povodí	lineární	0.051
Průměr 5. čísla BPEJ v povodí	lineární	0.045
Sklon max. délky údolnice	lineární	0.028
Hydraulický poloměr R	lineární	0.024
K faktor	lineární	0.024
Průměr 4. čísla BPEJ v povodí	lineární	0.018
Charakteristika povodí	lineární	0.017
Úhrn srážky, která iniciovala vznik DSO	lineární	0.009
Reliéfový poměr Rp	lineární	0.009
Průměrná šířka rýhy	lineární	0.007
Max. sklon rýhy	lineární	0.006
Tangenciální napětí vyvolané povrchním odtokem	lineární	0.002
Max. denní úhrn, N=100	lineární	0.001
Omočený obvod O	lineární	0.001

Nejtěsnější vztah byl prokázán mezi délkou rýhy a jejím zaměřeným objemem. Byl zvolen mocninný typ regrese a koeficient determinace je zde roven 0.842. Níže je uveden graf pro všechny měřené rýhy. Této závislosti je podrobněji věnována následující kapitola.



Graf 31: Závislost délky rýhy na jejím měřeném objemu

Významná je také závislost délky rýhy na její půdorysné ploše. Byl zvolen mocninný typ regrese a koeficient determinace je zde roven 0.665.



Graf 32: Závislost délky rýhy na její půdorysné ploše

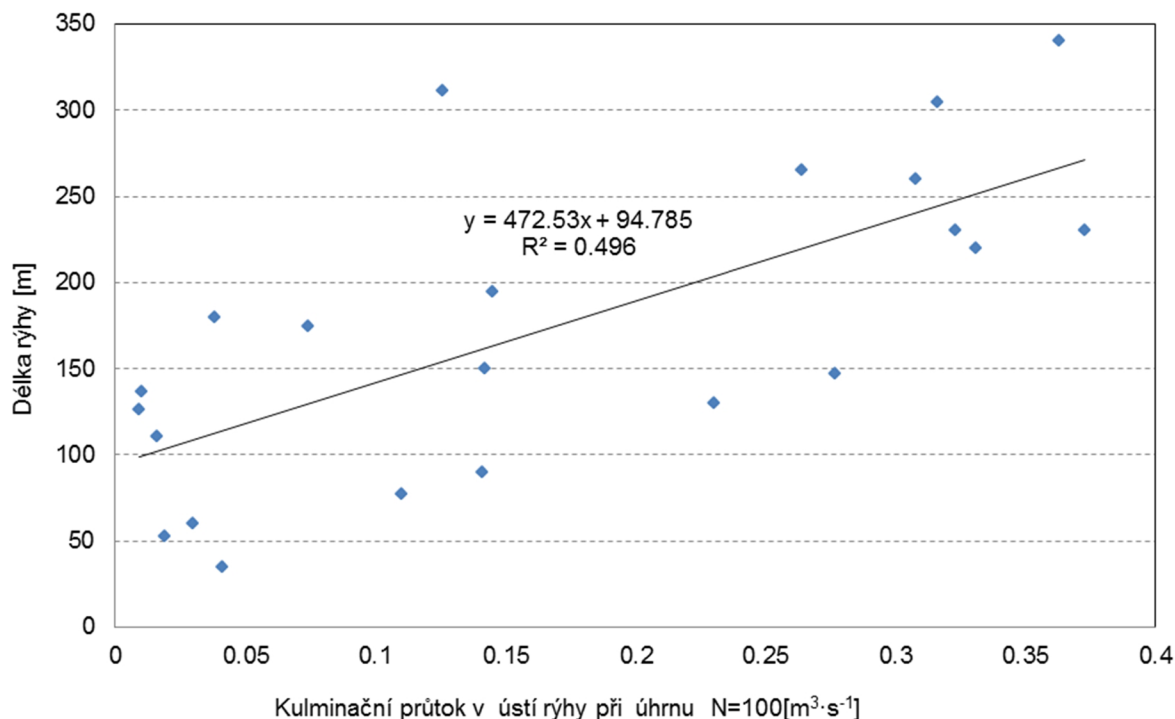
Pro měřené rýhy byly vypočteny kulminační průtoky způsobené maximálním denním srážkovým úhrnem s dobou opakování 100 let a dále i kulminační průtoky způsobené maximálním denním úhrnem, který nastal v období od přípravy půdy k zasetí plodiny po den zaměření rýhy. Tato srážka byla dána do souvislosti s konečnými parametry rýhy. Níže je seznam všech měření a k nim zjištěných maximálních denních úhrnů. Navíc je pro porovnání v tabulce uveden i úhrn, který pravděpodobně inicioval vznik rýhy, protože nastal v období, kdy je půda nejzranitelnější.

Tab. 19: Seznam rýh a srážkových událostí

Označení DSO	Parametry rýhy		Srážkové události			
	Délka [m]	Objem [m ³]	Srážka, která rýhu iniciovala [mm]		Max. denní úhrn srážky od přípravy k zasetí po zaměření rýhy [mm]	
DSO1_LUH_2009	305	52.42			24.6.2009	48.2
DSO2_LUH_2009	260	31.35			24.6.2009	91.5
DSO3_LUH_2009	474	263.95			24.6.2009	77.7
DSO12_LUH_2009	220	75.28			24.6.2009	167.6
DSO13_LUH_2009	340	188.55			24.6.2009	167.6
DSO1_ŠLP_2010_1.měření	195	28.64	24.5.2010	17	1.6.2010	21.0
DSO1_ŠLP_2010_2.měření	195	30.20	24.5.2010	17	23.7.2010	67.5
DSO2_ŠLP_2010_1.měření	265	42.75	24.5.2010	17	1.6.2010	21.0
DSO2_ŠLP_2010_2.měření	265	57.24	24.5.2010	17	23.7.2010	67.5
DSO2_ŠLP_2010_3.měření	265	57.79	24.5.2010	17	23.7.2010	67.5
DSO1_ŠAR_2010_1. měření	150	25.17	5.5.2010	17.3	1.6.2010	30.5
DSO1_ŠAR_2010_2. měření	150	26.10	5.5.2010	17.3	17.7.2010	32.3
DSO1_ŠAR_2010_3. měření	150	26.27	5.5.2010	17.3	17.7.2010	32.3
DSO2_ŠAR_2010_1. měření	230	32.85	5.5.2010	17.3	1.6.2010	30.5
DSO1_HOD_2011	77	10.73	27.5.2011	24.4	24.8.2011	44.8
DSO2_HOD_2011	130	21.18	27.5.2011	24.4	24.8.2011	44.8
DSO1_ŠAR_2011	230	25.51	27.5.2011	17	21.7.2011	41
DSO1_RAD_2012	311	53.09	4.5.2012	16.7	12.6.2012	30.5
DSO2_RAD_2012	90	17.43	4.5.2012	16.7	12.6.2012	30.5
DSO3_RAD_2012	35	2.57	4.5.2012	16.7	12.6.2012	30.5
DSO1_DOM_2012	175	66.91	20.6.2012	20.2	6.8.2012	29.1
DSO2_DOM_2012	137	44.08	20.6.2012	20.2	6.8.2012	29.1
DSO3_DOM_2012	53	5.88	20.6.2012	20.2	6.8.2012	29.1
DSO4_DOM_2012	111	9.60	20.6.2012	20.2	6.8.2012	29.1
DSO5_DOM_2012	126	18.01	20.6.2012	20.2	6.8.2012	29.1
DSO1_M_2012	60	8.53	8.6.2012	19.6	6.8.2012	29.7
DSO2_M_2012	180	70.35	8.6.2012	19.6	6.8.2012	29.7
DSO1_H_2012	147	23.74	12.6.2012	69.2	12.6.2012	69.2
DSO1_T_2012	1151	231.45	6.8.2012	30.6	6.8.2012	30.6
DSO1_DZ_2012	1039	330.96	6.8.2012	34.6	6.8.2012	34.6

Pro výpočet prvně jmenovaných průtoků byla použita metoda čísel odtokových křivek CN v modifikaci dle Hrádka. Hodnota maximálního denního úhrnu s dobou opakování 100 let ($N=100$) byla převzata z tabulek dle Šamaj, Valovič, Brázdil. Byla použita varianta výpočtu se 2 svahy. Index předchozích vláhových podmínek byl volen = 2.

Závislost mezi délkou rýhy a kulminačním průtokem způsobeným úhrnem s dobou opakování 100 let ($N=100$) pro rýhy kratší než 350 m je statisticky významná i na malém vzorku námi měřených rýh (viz Graf 33).



Graf 33: Závislost délky rýhy na kulminačním průtoku v ústí rýhy při úhrnu $N=100$

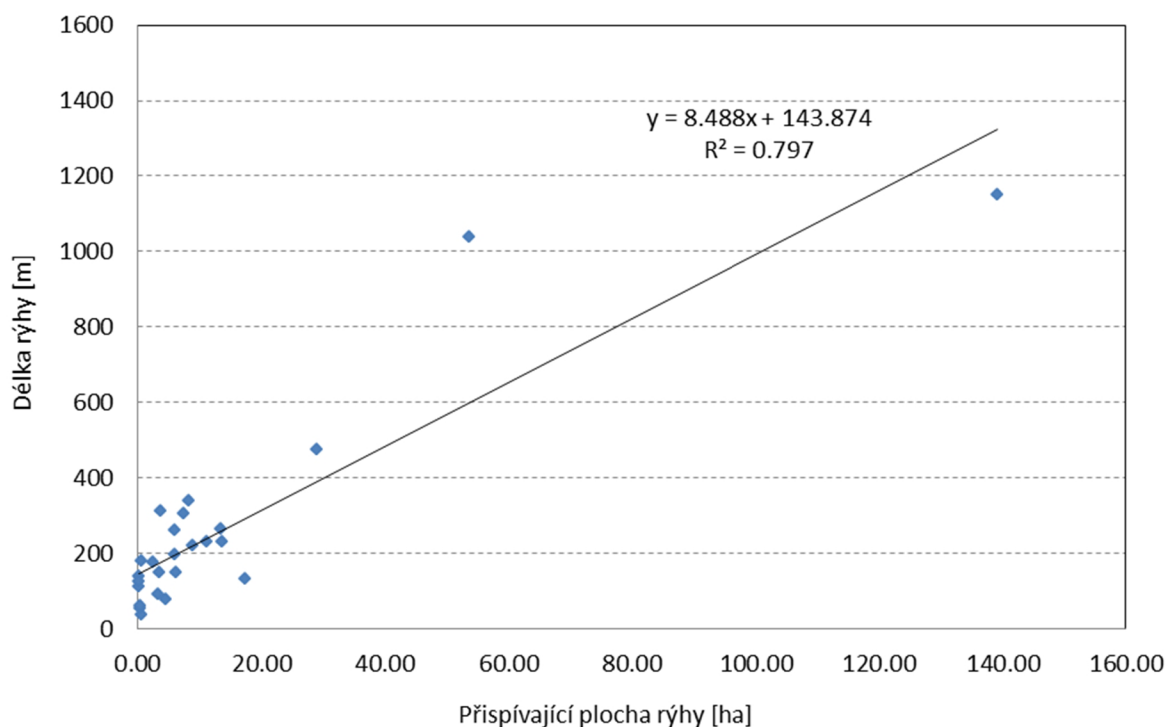
Jelikož metoda DesQ_MAXQ dle Hrádka neumožňuje spolehlivý výpočet průtoku způsobeného konkrétním denním úhrnem srážky bez známé intenzity a doby opakování, byla pro výpočet průtoků způsobených skutečnou maximální denní srážkou ve vegetačním období použita klasická metoda čísel odtokových křivek CN (U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service, 1989). Index předchozích srážek (IPS) byl volen dle reálného stavu. V 80% případů byl roven hodnotě 1, ve zbylých 20% byl roven 2. Tuto skutečnost potvrzuje i Kozlovská s Tomanem (2010). Zjistili, že ve vybraných klimatologických stanicích v ČR je při příchodu srážky s úhrnem nad 30 mm z 90% IPS=1.

Závislost délky rýhy na kulminačním průtoku způsobeném reálnou srážkou nebyla na měřeném vzorku prokázána, koeficient determinace = 0.097.

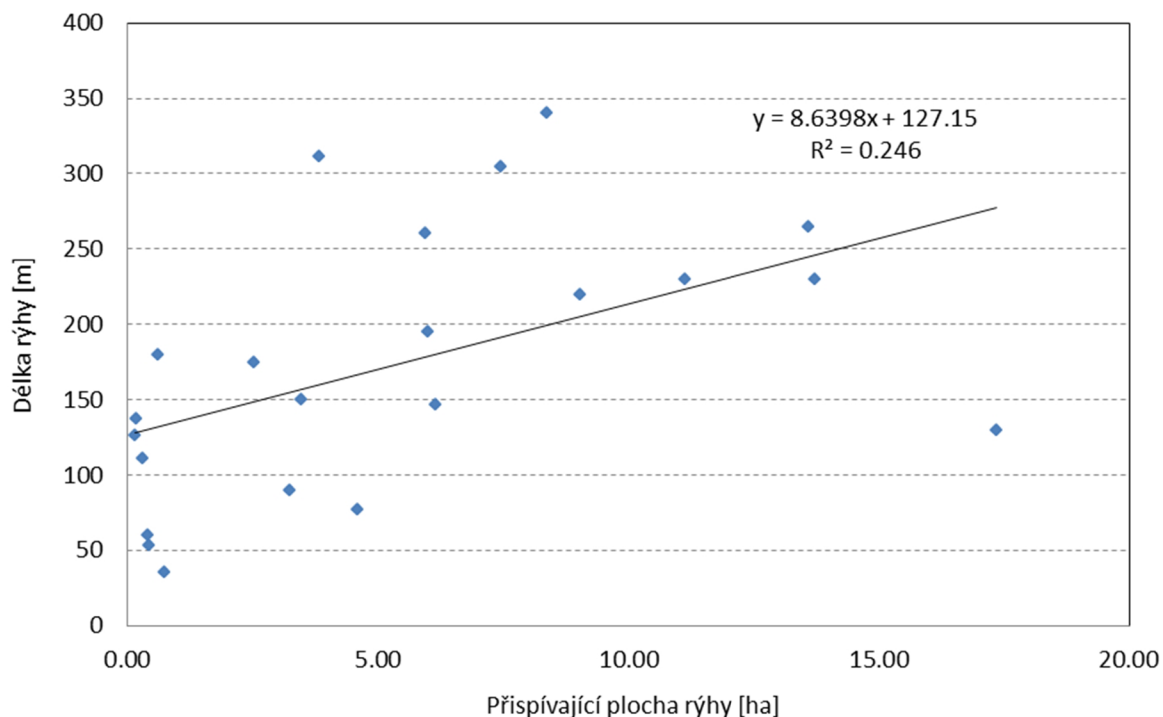
Ze „Studie MZe“ vyplývá i statisticky významná závislost délky rýhy na průměrném čísle odtokových křivek CN v ploše sběrného povodí rýhy. Tato závislost byla potvrzena i v rámci testování měřených rýh pomocí jednoduchých regresí (viz Tab. 18). Koeficient determinace zde byl roven 0.430. V případě početnějšího vzorku rýh by byl pravděpodobně vyšší. Vzhledem k faktu, že byla prokázána závislost délky na kulminačním průtoku, bylo možné předem předpokládat i tuto závislost na čísle CN, jelikož čísla CN jsou používána k výpočtu hodnoty kulminačního průtoku.

Na měřeném vzorku dat nebyla prokázána závislost délky rýhy na její přispívající ploše. V případě, že byly do analýzy zahrnuty všechny identifikované rýhy, dosahoval koeficient determinace hodnoty 0.797 (viz Graf 34). Jak je ale vidět na tomto grafu, silná korelace je zapříčiněna především dvěma oddálenými body. Jedná se o dvě nejdelší rýhy, které byly

zaznamenány na holé půdě po sklizni obiloviny. Povodí i rýha měly oproti rýhám zaměřeným v širokořádkových plodinách netypické parametry. V případě, že dojde k odstranění dvou zmíněných prvků ze vzorku, hodnota koeficientu determinace klesá a vztah už nelze považovat za těsný (viz Graf 35). Na vzorku měřených rýh tedy 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.



Graf 34: Závislost délky rýhy na přispívající ploše – vzorek všech identifikovaných rýh



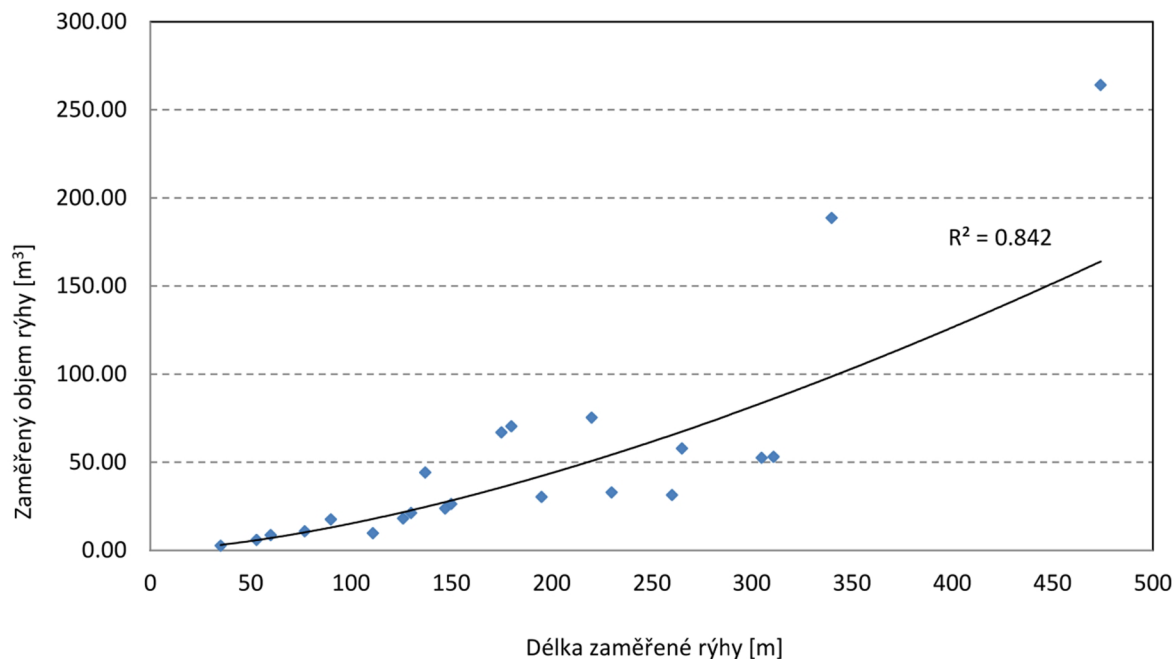
Graf 35: Závislost délky rýhy na přispívající ploše – vzorek rýh měřených v širokořádkových plodinách

Dále byla zkoumána závislost délky identifikované erozní rýhy na celkové maximální délce údolnice v daném povodí rýhy. Byly tedy vymezeny linie spojující závěrný profil (ústí měřené rýhy) s průsečíkem údolnice a rozvodnice na horním okraji povodí. Těsnost vztahu pro všechny identifikované rýhy je velká. Při odstranění tří vlivných bodů, které představují 3 rýhy neobvykle velké délky (větší než 350 m) dochází k zániku statisticky významné závislosti. Jelikož 88% všech identifikovaných rýh má délku menší než 350 m a navíc delší rýhy vykazovaly i jiné neobvyklé parametry, je možné říci, že závislost u měřeného vzorku rýh není signifikantní.

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.

Nejdříve byly posuzovány všechny rýhy měřené erodoměrem bez ohledu na jejich délku (viz Graf 36).



Graf 36: Závislost délky rýhy na jejím objemu – všechny rýhy měřené erozním mostem

Pro všechny erozním mostem měřené DSO má regresní vztah tento tvar:

$$V = 0.0133L^{1.5282}, \quad (6.3)$$

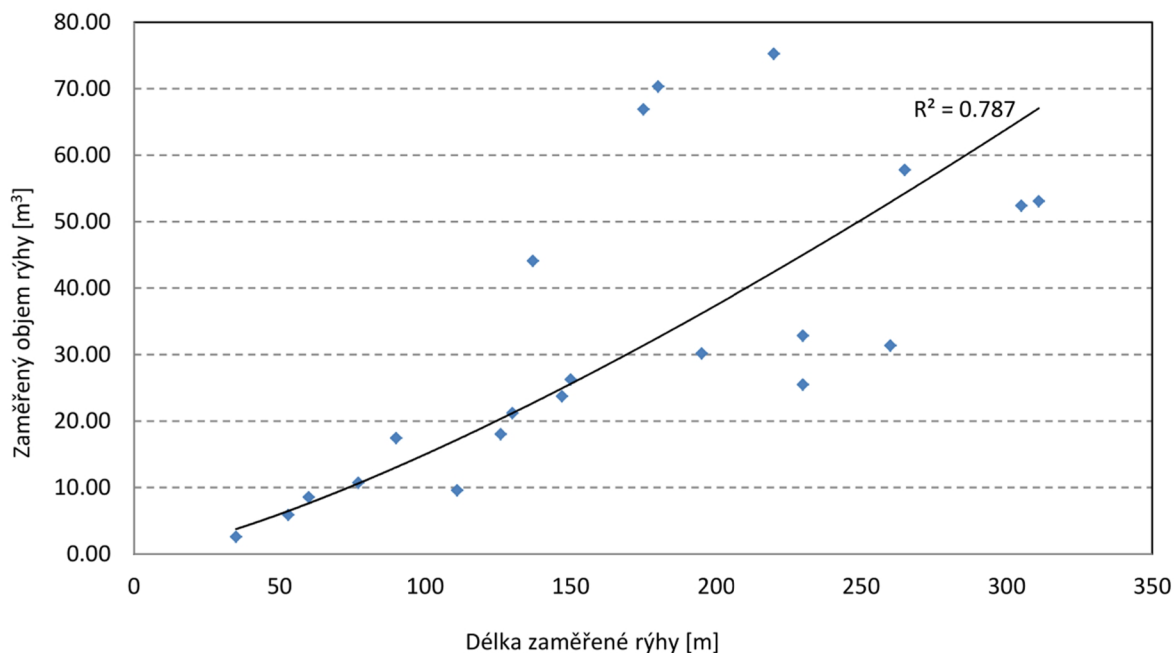
kde:

L délka rýhy [m];

V objem rýhy [m³].

V případě označení parametrů dle Capry je pro námi měřené rýhy parametr $a = 0.0133$ a parametr $b = 1.5282$.

Vzhledem k přítomnosti odlehlých bodů byl stejný typ závislosti testován ještě pro výběr měřených rýh kratších než 350 m (viz Graf 37).



Graf 37: 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:

$$V = 0.342L^{1.3208}, \quad (6.4)$$

kde:

L délka rýhy [m];

V objem rýhy [m³].

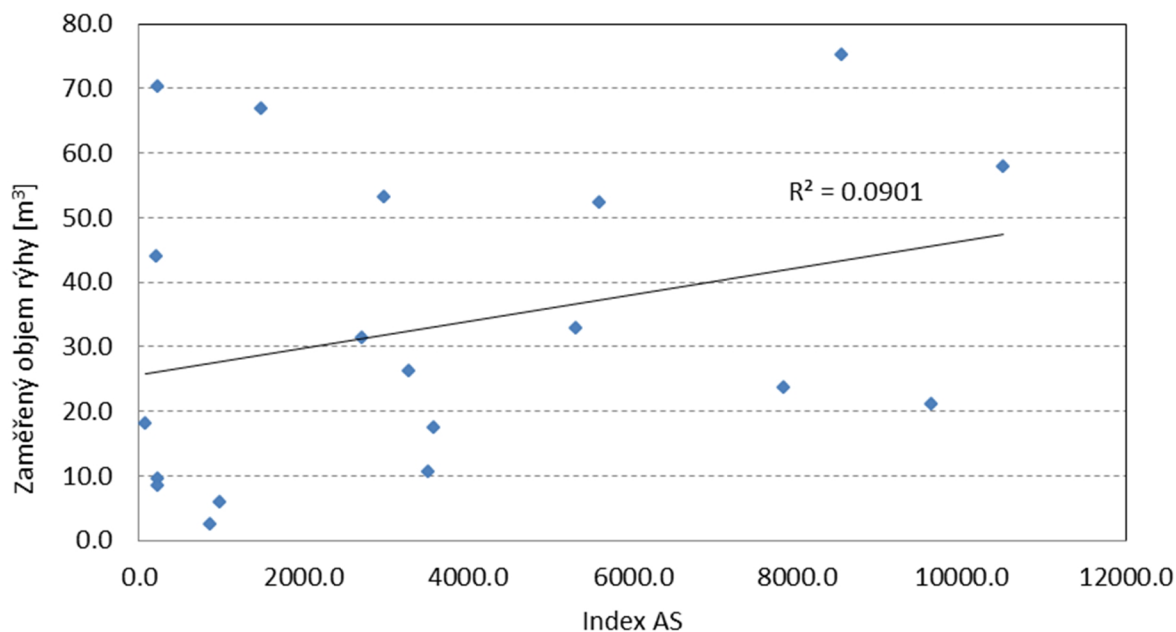
V případě označení parametrů dle Capry je pro námi měřené rýhy parametr $a = 0.0342$ a parametr $b = 1.3208$ (Drongová a Sobotková, 2013).

Závislost objemu a délky rýhy na srážkovém úhrnu

Tyto Caprou popsané závislosti nebyly u měřených rýh prokázány. Koefficient korelace dosahoval hodnoty pouze 0.023 (pro závislost délky na úhrnu) a 0.008 (pro závislost objemu na úhrnu). Důvodem je pravděpodobně malý počet rýh ve vzorku a navíc skutečnost, že na jednom pozemku byly často identifikovány 2 nebo více rýh o rozdílné délce. Byla jim ale přiřazena stejná příčinná srážka. Vztahy by bylo vhodné ověřit na větším vzorku rýh lokalizovaných po celé ČR.

Casalího index AS

Na vzorku měřených dat byla ověřena platnost Casalího indexu AS, jak je popsán v kapitole 2.4.3. Bylo zjištěno, že odhadnutý regresní vztah není těsný a shluk bodů nelze uspokojivě proložit jednoduchou regresní funkcí.



Graf 38: Závislost měřeného objemu rýhy na indexu AS

Nachtergaeleho závislost šířky rýhy na kulminačním průtoku

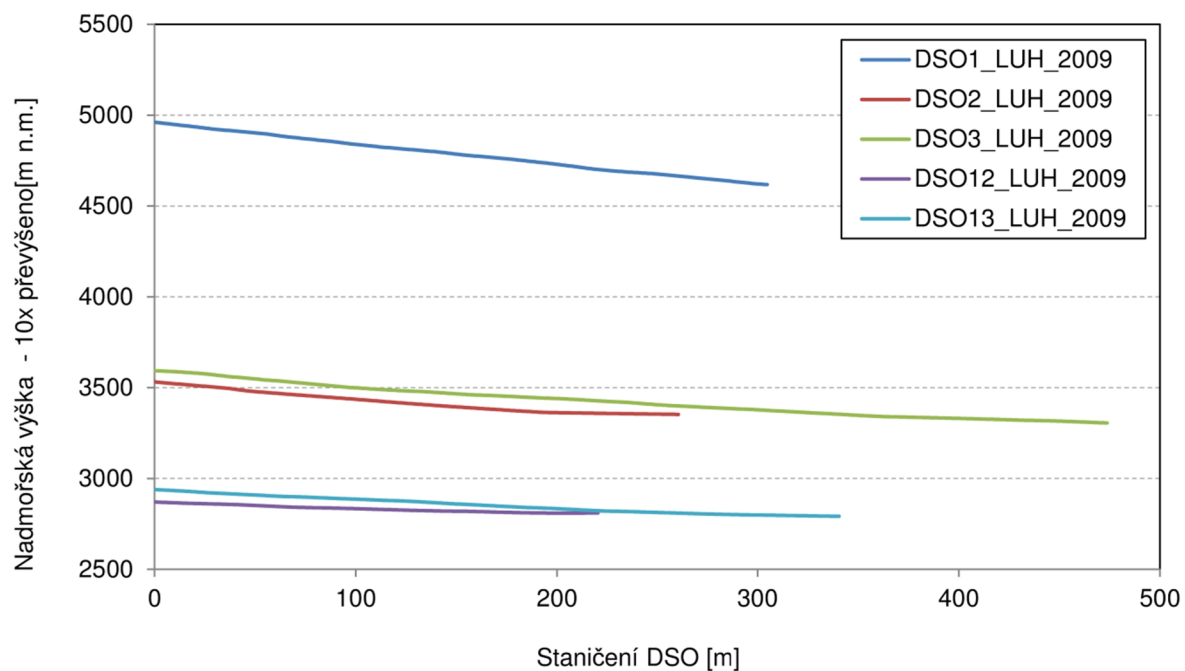
Nachtergaelem (2002) byla popsána závislost šířky rýhy na kulminačním průtoku. Jak je uvedeno v rešeršní části této práce, Nachtergaele ve vztahu používá průměrnou šířku rýhy.

Tento vztah byl otestován na vzorku měřených rýh a nebyla zjištěna žádná závislost, přičemž jako nepříliš vhodné se jevílo použití průměrných hodnot šířky rýhy. Alternativně proto byla prozkoumána závislost jednotlivých měřených šířek rýh na dílčích kulminačních průtocích k jednotlivým měřeným profilům. Ani v tomto případě nebyla pozorována relevantní závislost.

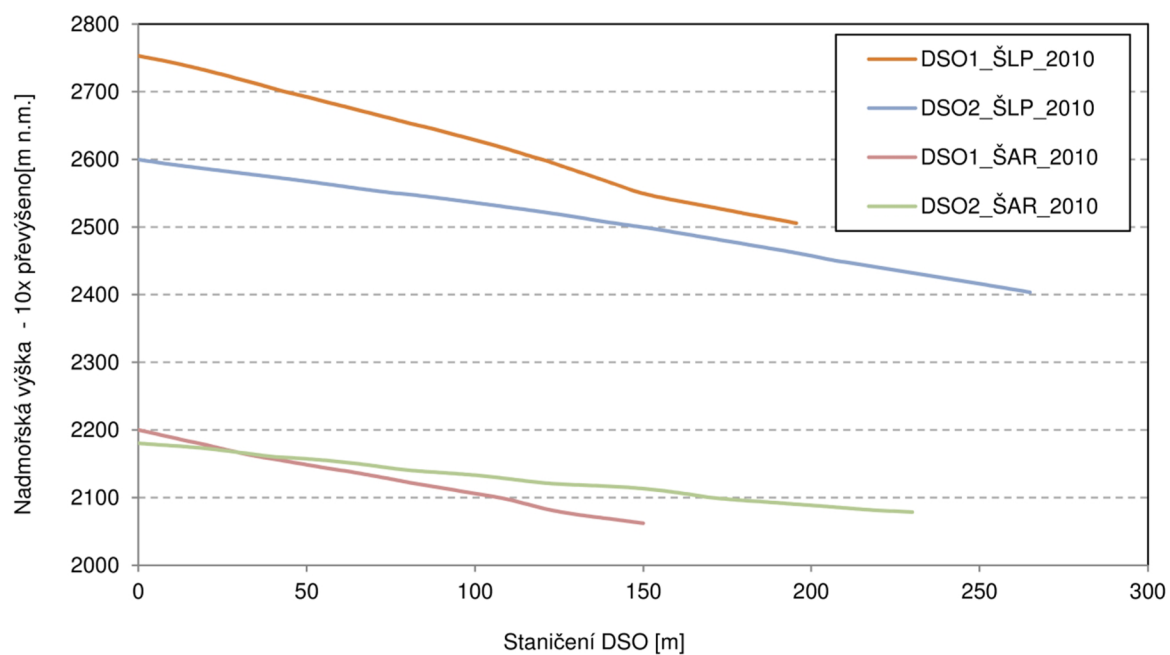
Vandaeleho kritický sklon svahu

Jedním z cílů této práce je ověření platnosti Vandaelem popsaného vztahu pro určení kritického sklonu DSO, při jehož překročení dochází k tvorbě rýhy. V příspěvku Vandaele 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.

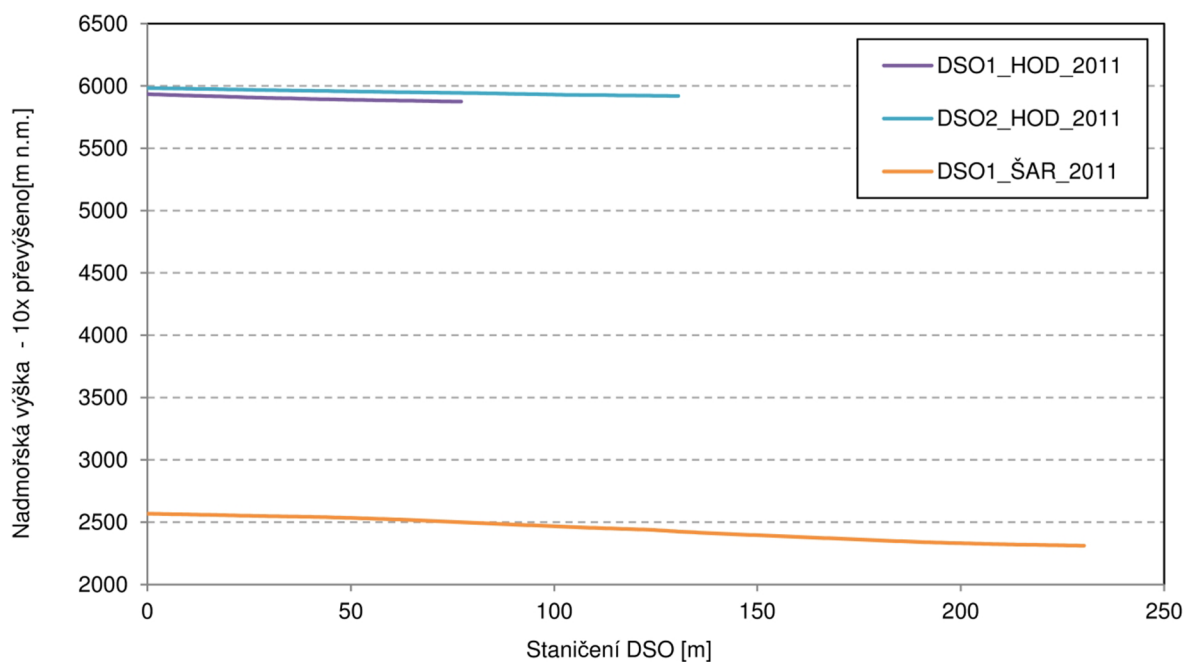
V případě měřených rýh ale nebyly v podélném profilu zjištěny výraznější změny sklonu svahu a proto nemohl být jasně určen bod v podélném profilu původního terénu, od kterého započal rozvoj rýhy. Na níže uvedeném obrázku jsou v 10x převýšeném měřítku znázorněny podélné profily terénu v místě rýh, ze kterého je patrná homogenita sklonu terénu po délce většiny rýh.



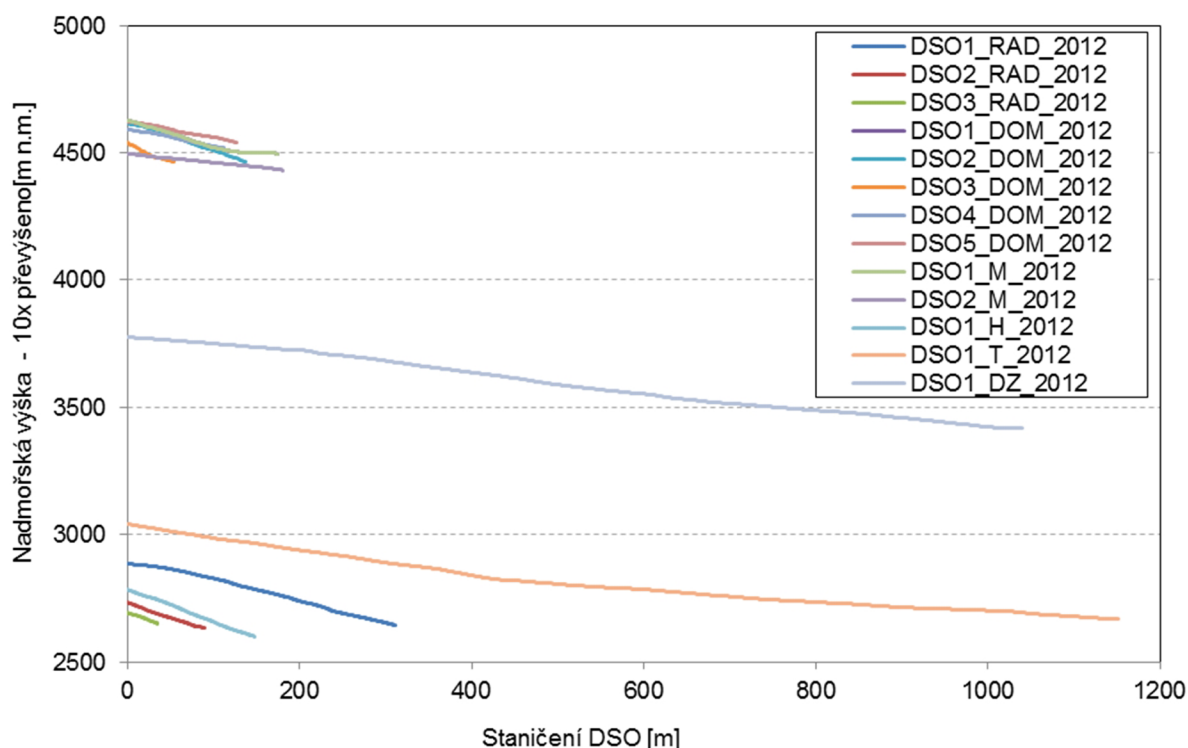
Graf 39: Převýšený podélný profil původního terénu v místech DSO měřených rýh v roce 2009



Graf 40: Převýšený podélný profil původního terénu v místech DSO měřených rýh v roce 2010



Graf 41: Převýšený podélný profil původního terénu v místech DSO měřených rýh v roce 2011



Graf 42: Převýšený podélný profil původního terénu v místech DSO měřených rýh v roce 2012

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

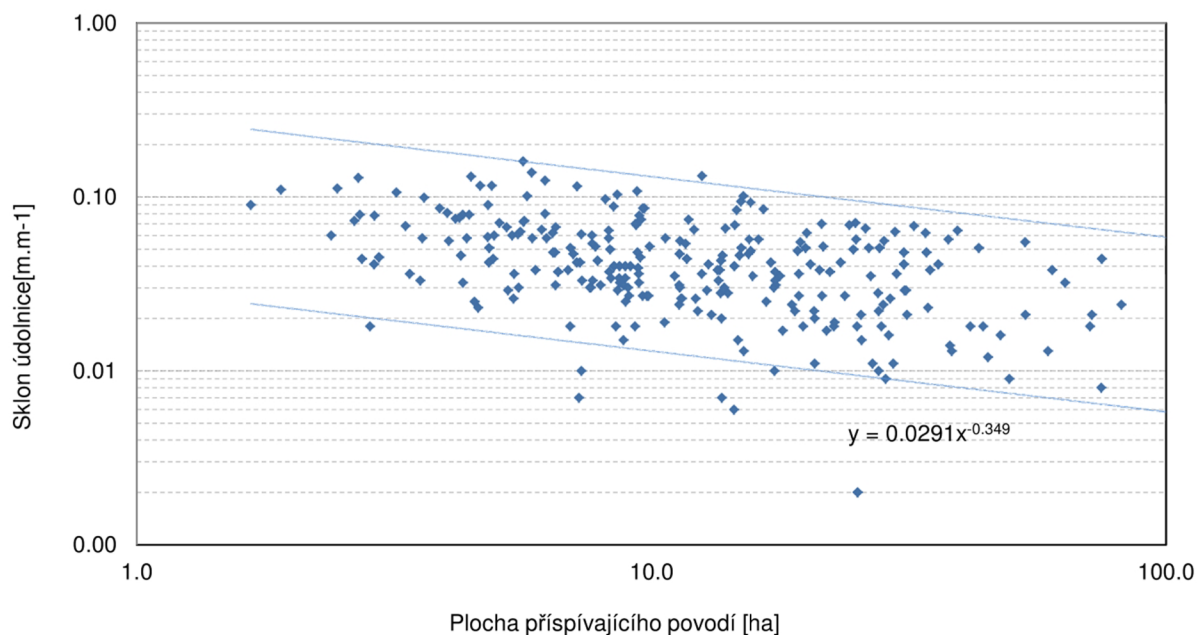
Do vztahu byla zahrnuta celková přispívající plocha rýhy a průměrný sklon původního terénu v délce měřených rýh.

Grafy byly vyneseny, stejně jako v příspěvku Vandaeleho, 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, 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.

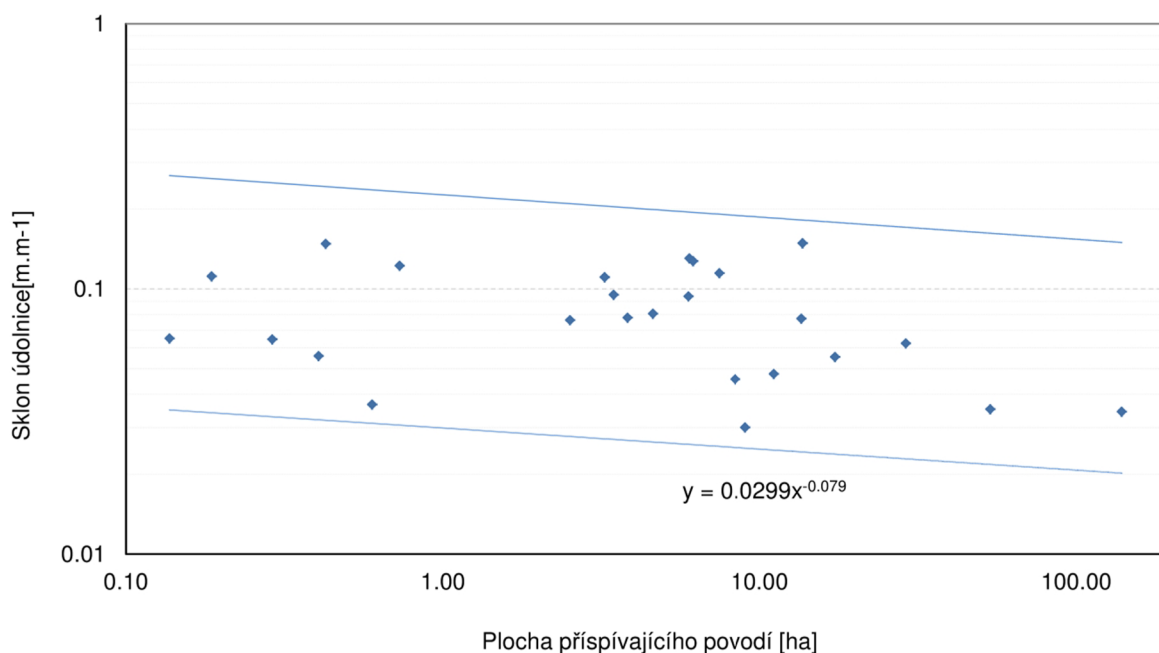


Graf 43: Znázornění 95% intervalu spolehlivosti pro data erozně ohrožených DSO – „Studie MZe“

Stejně byl vyhodnocen i vzorek měřených rýh. Koeficient a je roven 0.0299, což je hodnota pohybující se v intervalu zjištěného pro rýhy měřené v Evropě a navíc velmi blízká číslu zjištěnému pro erozně ohrožené DSO („Studie MZe“). Koeficient $-b$ byl -0.079, tedy mimo Vandaelem zjištěný interval pro evropská měření.

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 popsany výše. Pro úplnost je ale níže uveden i graf získaný z měřených dat včetně odhadu regresní rovnice dolního prahu.

Vzhledem k tvaru funkce dolního prahu, dochází se zvětšováním koeficientu $-b$ ke zvětšování hodnoty kritického sklonu svahu.



Graf 44: Znázornění 95% intervalu spolehlivosti pro vzorek měřených rýh

Rozdíly mezi zde zjištěnými hodnotami koeficientů a jinými autory udávanými hodnotami jsou pravděpodobně způsobeny jinými půdními a klimatickými podmínkami a dále také odlišnou metodikou vyhodnocení kritického sklonu rýhy. Jak bylo zjištěno, původní Vandaeleho metodika byla pro vyhodnocení efemérních rýh převzata z metodiky pro hodnocení permanentních strží, kde je zřejmě jednodušeji určitelný maximální sklon svahu.

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 nezávisle proměnných, které jsou uvedeny v Tab. 12, byl testován pomocí vícerozměrné lineární regrese.

Vzhledem k množství nezávisle proměnných, musely být před samotným výpočtem vyřazeny proměnné, u kterých se už předem nedala předpokládat jejich dobrá korelace s délkou rýhy nebo které byly kombinací jiných nezávisle proměnných. Jednalo se o např. o:

- X5 – vážený průměr nadmořské výšky přispívající plochy rýhy (souvisí s prvním číslem BPEJ);
- X6 – vážený průměr hlavní půdní jednotky v přispívající ploše DSO (nedá se předpokládat jeho korelace s délkou);

- X8 – vážený průměr 4. čísla BPEJ v přispívající ploše rýhy (souvisí se sklonem svahu);
- X10 – vážený průměr hodnoty K-faktoru v přispívající ploše rýhy (nedá se předpokládat jeho korelace s délkou);
- X28 – charakteristika povodí (je kombinací jiných proměnných obsažených v modelu);
- X29 - K_G – součinitel tvaru povodí – podíl plochy povodí a délky rozvodnice (je kombinací jiných proměnných obsažených v modelu).

Byl vytvořen regresní model ze všech nezávisle proměnných (kromě výše uvedených vyřazených) a níže je zobrazena tabulka s výčtem nejvlivnějších proměnných. Tento model popisoval 100% variability. Vzhledem k vysokým číslům p-hodnoty bylo možné pokračovat ve zjednodušování modelu.

Tab. 20: Seznam nejvlivnějších nezávisle proměnných

Nezávisle proměnná	koeficienty – $\beta_1 \dots \beta_i$	chyba	p-hodnota
X18	4240.5	3168.56	0.409
X19	2614.9	3100.07	0.554
X16	1251.32	1679.22	0.592
X15	285.28	400.426	0.606
X9	254.167	266.607	0.515
X13	104.12	120.166	0.546
X20	-263.157	443.908	0.659
X14	-529.32	618.013	0.549
X26	-995.55	1256.94	0.574
X30	-1465.96	1671.64	0.542
X23	-4101.66	4553.98	0.533

Cílem bylo vytvořit co nejjednodušší model popisující zkoumanou závislost, a proto 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 "forward" (vpřed), kdy jsou postupně po jedné do modelu přidávány ty proměnné, které jsou významné.

Do modelu byly nejdříve zařazeny všechny identifikované rýhy, ale vzhledem k faktu, že byly v modelu identifikovány odlehlé body, které měly značný vliv na regresní model, byly tři rýhy z analýzy odstraněny. Jejich neobvykle velká délka (v porovnání s většinou prvků v měřeném vzorku) způsobila vznik zkreslujících koncových bodů, které by mohly měnit sklon regresní přímky. Do modelu byly tedy zahrnuty rýhy s délkou menší než 350 m. Navíc byly označeny dva další vlivné body, které byly také odstraněny. Jednalo se o rýhu, kterou nebylo možné, pro její rozměry, měřit erodoměrem, ale pouze pásmem. Dále se jednalo o rýhu, která měla jiné parametry než zbytek vzorku, a to především z důvodu, že se jednalo

o efemérní rýhu vyskytující se na hranici pozemku, nikoliv v přirozené údolnici. Výsledný vzorek pro analýzu tedy čítal 20 rýh, tj. 80% všech identifikovaných rýh.

Před samotnou analýzou bylo potřeba hodnoty všech nezávisle proměnných normalizovat, a to podle vztahu 5.2.

Upravený regresní model má pak tvar:

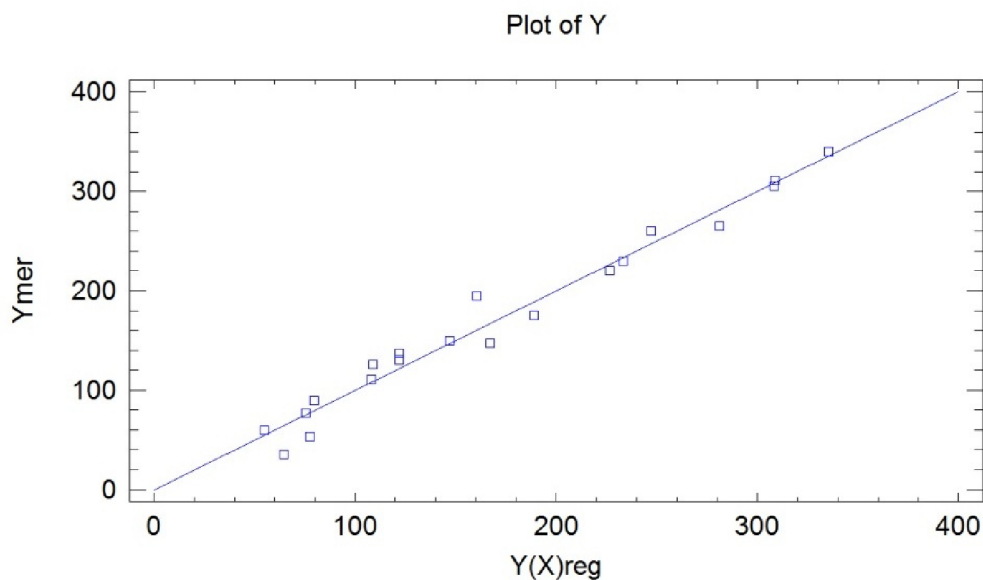
$$Y = 74.8089 + 140.385 \cdot X_{13} - 111.094 \cdot X_{16} + 318.452 \cdot X_{18} + 36.7925 \cdot X_{19} - 116.19 \cdot X_{20}, \quad (6.5)$$

kde:

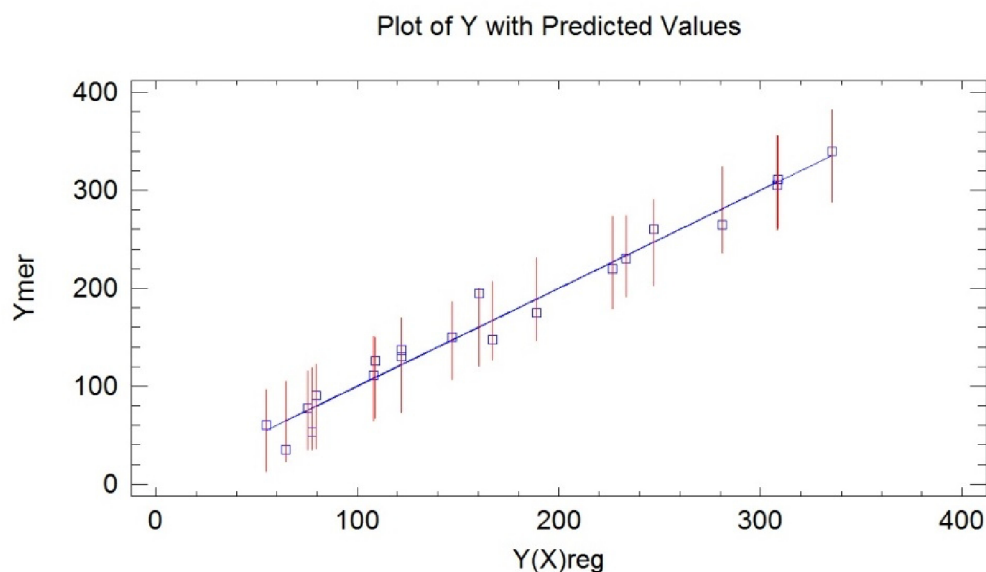
Y délka rýhy [m];

X_{13} až X_{20} nezávisle proměnné – viz Tab. 12 [jednotky viz Tab. 12].

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



Graf 45: Porovnání měřené délky rýh s jejím odhadem pomocí regresní funkce



Graf 46: Porovnání měřené délky rýh s jejím odhadem pomocí regresní funkce se znázorněním 95% intervalů spolehlivosti odhadu $Y(X)$.

Ze vztahu nebo z Tab. 21 je viditelná významnost jednotlivých nezávisle proměnných.

Tab. 21: Popis nezávisle proměnných z regresní rovnice (6.5)

Význam nez. proměnné	Označení nez. proměnné	Koeficient β	Významnost nez. proměnné [%]
CN	X13	140.39	19.4
Q_{\max} při max. úhrnu za veg. období	X16	111.09	15.4
Plocha rýhy	X18	318.45	44.1
Plocha sběrného povodí	X19	36.79	5.1
Omočený obvod	X20	116.19	16.1

Délka rýhy dle vztahu 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 jednoduchou regresí nebyla závislost prokázána a projevila se až při vícerozměrné regresí. 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 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. Koeficient determinace činil 0.496.

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. Vzhledem k hodnotě vypočteného koeficientu determinace je nutné uvažovat s větší odchylkou vypočtené délky a tuto hodnotu považovat za orientační.

6.5. Ověření výstupů erozních modelů na základě přímého měření

Jak bylo uvedeno v kapitole CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE, jedním z cílů této práce je porovnání měřených výsledků s hodnotami predikovanými prostřednictvím erozních modelů. V následujících podkapitolách je uveden popis výsledků a vyvozených závěrů o použitelnosti jednotlivých modelů pro predikci ohrožení pozemků erozí z efemérních rýh.

6.5.1. Model EGEM

V prvním kroku bylo přistoupeno k testování model EGEM (Ephemeral gully erosion model), jenž byl vyvinut v USA. Krátce je tento model přiblížen v kapitole 2.8.1.

Záměrem bylo provedení kalibrace na větší části měřených dat a dále verifikace modelu zbylou částí vzorku.

Již v první fázi 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.

Predikční program EGEM byl testován v rámci několika výzkumů. Bylo jim simulováno mnoho reálně naměřených rýh v jižním Španělsku, jižním Portugalsku, severní Belgii a na Sicílii.

Podle Gordona a kol. (Gordon, 2007) 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 (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 ($R^2 = 0.88$). Vztah mezi měřenou a predikovanou plochou příčného profilu rýhy nebyl významný ($R^2=0.27$).

Závěrem autor výzkumu shrnuje dva nejdůležitější poznatky:

- i přes optimální podmínky, za nichž byla získaná vstupní data pro výzkum, není EGEM schopný predikce příčných parametrů profilů posuzovaných rýh;
- délka efemérní rýhy je klíčovým parametrem podmiňujícím vypočtené množství eroze. Další výzkumy by se proto měly zaměřit na tuto charakteristiku rýhy (Nachtergaele, 1999).

6.5.2. 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, software má mnohem větší nároky na vstupní data a jejich úpravu do programem požadovaných formátů.

Podobě jako v modelu EGEM, jsou bohužel i zde používány některé koeficienty závislé na klimatických podmínkách jednotlivých regionů USA.

Jak bylo popsáno v rešerši (kapitola 2.8.2), existují publikace, které popisují nepřiliš uspokojivé výsledky při testování tohoto modelu. 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.

6.5.3. Model SHETRAN

Posledním z testovaných byl model SHETRAN, jehož funkčnost je popsána v kapitole 2.8.3.

V rámci této práce byly vytvořeny programem požadované vstupní soubory a byly simulovány předmětné srážkoodtokové události, které nastaly v měřených lokalitách v příslušných 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. 9). 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.

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.

6.6. 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 návrhu vlastní metodiky pro predikci výskytu a predikci základních parametrů efemérních rýh. Podkladem pro model byla přímá terénní měření.

6.6.1. 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.

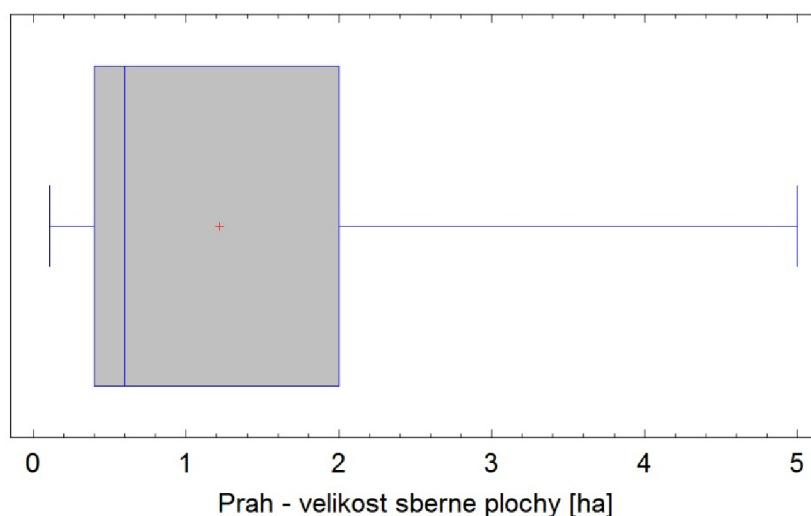
Hydrologické nástroje prostředí ArcMap

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 47) je grafické znázornění vlastností vzorku prahových hodnot sběrných ploch u měřených rýh.



Graf 47: Krabicový graf – analýza vzorku prahových hodnot velikostí sběrných ploch u měřených rýh

Na základě výše uvedeného bylo konstatováno, že pro lokalizaci potenciálního výskytu erozních projevů je vhodné za prahovou hodnotu přispívající plochy uvažovat již 1 ha.

Vymezení DSO na základě „Studie MZe“

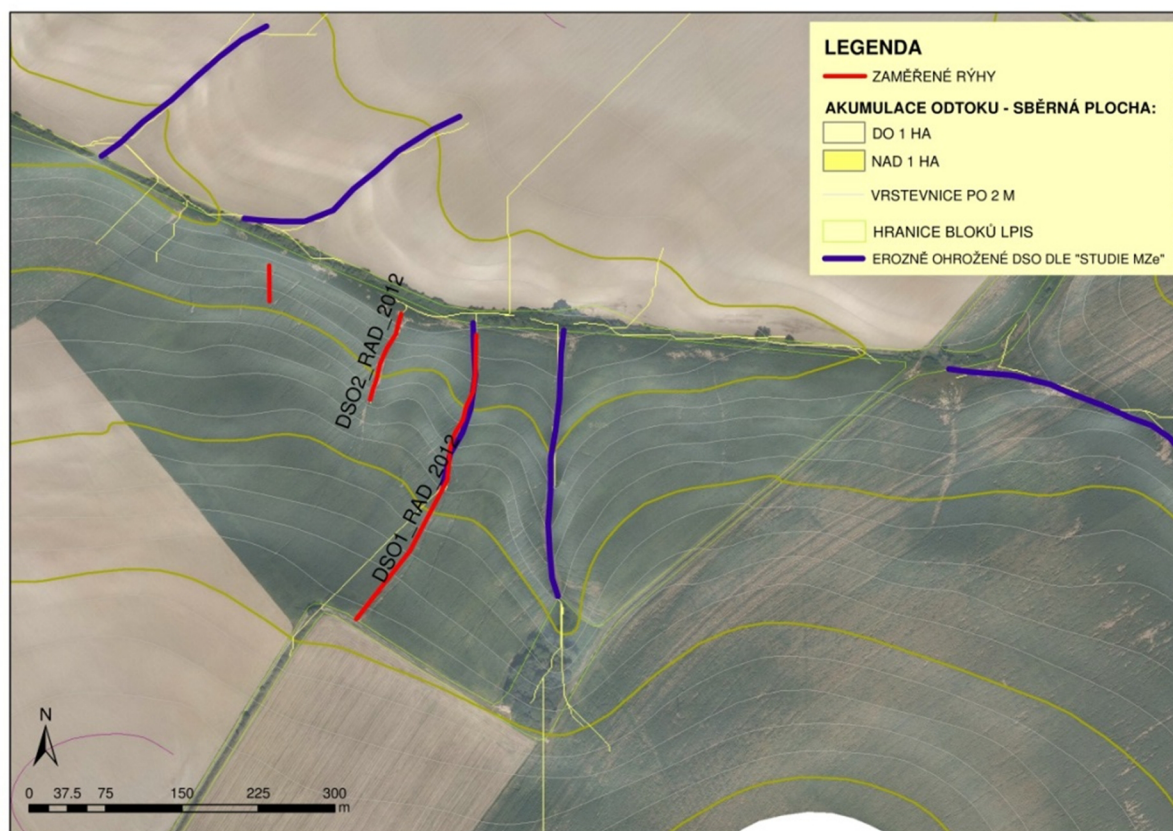
Společnost Ekotoxa v rámci „Studie MZe“ také provedla vymezení erozně ohrožených DSO. Toto vymezení bylo taktéž prováděno na základě analýzy velikosti přispívající plochy rýhy. Limity přispívající plochy byly stanoveny na 300 buněk. Při použité velikosti buňky 10×10 m byl limit roven 3 ha. Takovýto profil 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 disertační práce došlo k porovnání lokalizace a délky měřených rýh s erozně ohroženými DSO vymezenými ve „Studii MZe“. Byly zjištěny odchylky v délce, půdorysném tvaru osy atd. Konkrétní případy jsou ilustrovány na následujících obrázcích i s popisem pravděpodobné příčiny zjištěných odchylek. Pro ilustraci jsou ve všech mapkách znázorněny dráhy soustředěného odtoku generované v prostředí ArcMap. Žlutě jsou zvýrazněny buňky se sběrnou plochou 1 ha a více.

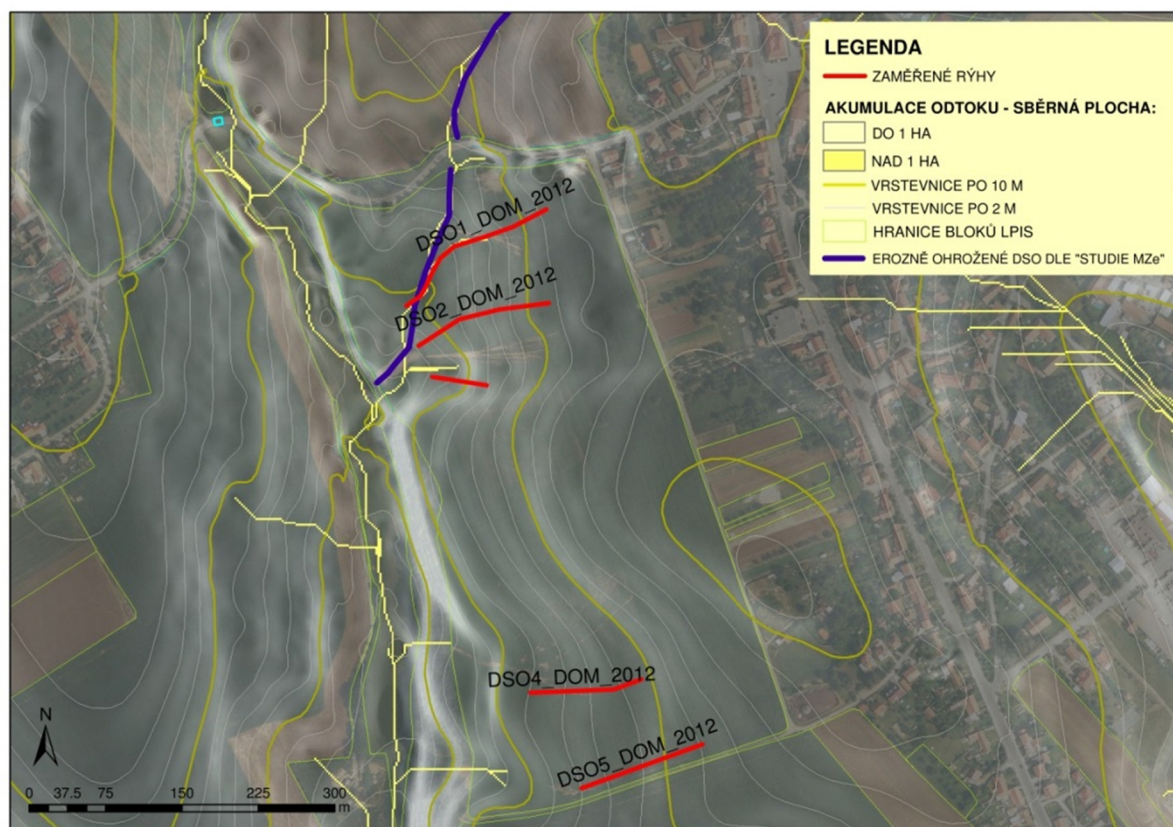
V katastru obce Lipová u Přerova byly zaměřeny 3 rýhy. Na daném pozemku byly ve „Studii MZe“ lokalizovány 2 erozně ohrožené DSO, z nichž jedna byla v jiné délce zaměřena jako reálně existující rýha ve vegetačním období roku 2012.

Eroze v dráze odtoku, která je na obrázku napravo od rýhy označené jako DSO1_RAD_2012, nebyla při terénním průzkumu identifikována, a to z důvodu, že tato DSO nebyla oseta širokořádkovou plodinou a zřejmě nebyla na začátku vegetačního období nijak zemědělsky upravena. Zemědělci se rozhodli, pravděpodobně na základě špatných zkušeností z minulých let, pro ponechání pásu zemědělské půdy v údolnici ladem.



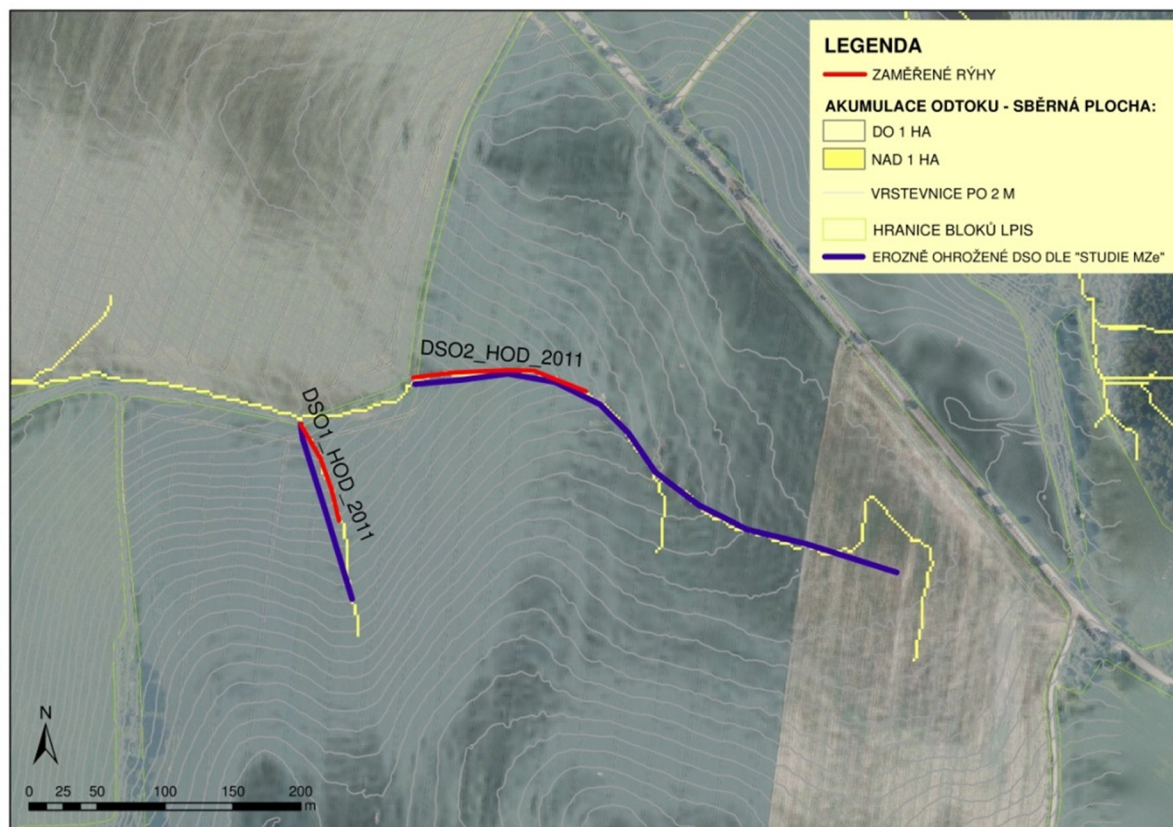
Obr. 27: Odchylky měřených rýh a potenciálně ohrožených DSO – Lipová u Přerova

V obci Domašov bylo zaměřeno 5 rýh, z nichž pouze část jedné byla (dle „Studie MZe“) označena jako erozně ohrožená DSO. Nad silnicí se v sezóně roku 2012 rýha nevyvinula, a to z důvodu, že na bloku půdy nad silnicí nebyla pěstovaná širokořádková plodina. V dolní části (pod silnicí) ovšem rýha vznikla. Byl zde pěstován čirok. Další rýhy zaměřené na tomto bloku nebyly ve „Studii MZe“ označeny jako erozně ohrožené, a to především z důvodu jejich malé sběrné plochy. Srážka, která rýhy způsobila, přišla krátce po zasetí plodiny, kdy byla rezistence půdy vůči erozi tak malá, že zde vzniklo několik dalších rýh, a to i v méně výrazných údolnicích.



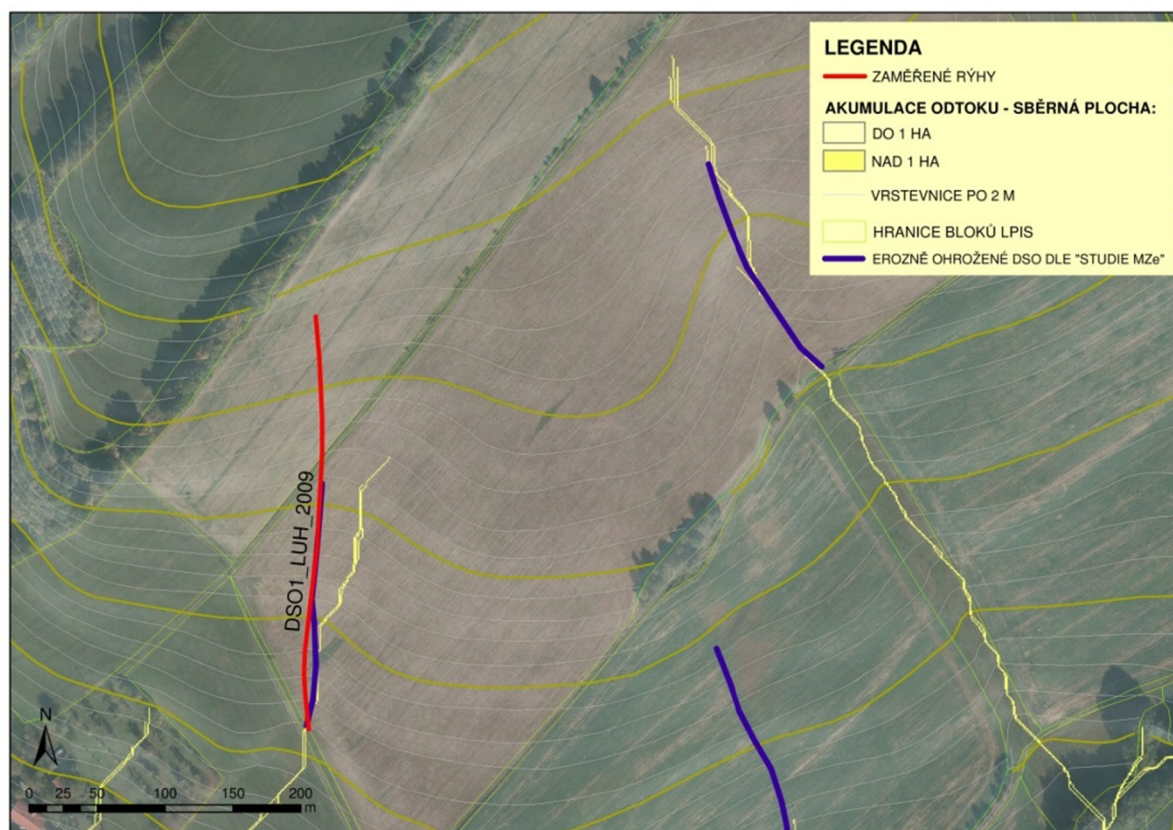
Obr. 28: Odchytky měřených rýh a potenciálně ohrožených DSO – Domašov

V obci Hodice byly rýhy měřené v roce 2011 o mnoho kratší než vymezené erozně ohrožené DSO („Studie MZe“). Důvodem byl zřejmě fakt, že v tomto roce byla k pěstování širokořádkové plodiny určena pouze spodní část svažitého pozemku, takže povrchový odtok neměl možnost získat energii potřebnou ke způsobení větší škody (vytvoření delší rýhy). O rok později, v roce 2012 zde rýhy nebyly identifikovány vůbec, jelikož byla na pozemku pěstována obilovina, která půdě poskytovala dostatečnou ochranu.



Obr. 29: Odchylky měřených rýh a potenciálně ohrožených DSO – Hodice

Naopak v Jindřichově u Hranic byla měřená rýha delší než erozně ohrožená DSO určená „Studii MZe“. V roce 2009 zde byly zaznamenány několikadenní vydatné srážky s velkou intenzitou a úhrnem.



Obr. 30: Odchytky měřených rýh a potenciálně ohrožených DSO - Jindřichov u Hranic

Určení délky rýhy na základě regresních vztahů

Další alternativou je využití lineárního regresního vztahu pro určení délky rýhy. V rámci této práce byly sestaveny 2 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 6.5) má sice velkou statistickou významnost, ale jako nezávisle proměnné do něj vstupují parametry rýhy – její plocha a průměrná velikost omočeného obvodu.

Byla provedena vícerozměrná regrese bez použití parametrů rýhy jako nezávisle proměnných. Nebyla 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. Koeficient determinace činil 0.496.

Vztah pro určení délky rýhy vycházející z dat „Studie MZe“ (viz rovnice 6.2) předpokládá znalost takových vstupních parametrů, jako jsou číslo BPEJ nebo číslo CN v ploše povodí. Navíc vychází ze studie, která nabízí i grafický výstup, který kromě určení délky umožňuje i polohovou lokalizaci rýhy (viz předchozí kapitola).

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. Vzhledem k hodnotě vypočteného koeficientu determinace je nutné uvažovat s větší odchylkou vypočtené délky a tuto hodnotu považovat za orientační.

Výběr vhodného nástroje pro lokalizaci rýhy a určení 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 popsaných regresních vztahů, možné i jejich využití.

6.6.2. Empirický model pro predikci objemu rýh

Empirický model sloužící pro odhad objemu rýhy vychází z přímých měření projevů vodní eroze v hlubokých efemérních rýhách. Níže je 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 nutnosti terénního šetření v místě, kde již došlo ke vzniku rýhy. Takovýto model by byl použitelný pro predikci objemu rýh např. při zemědělské výrobě či při projekci protierozních a protipovodňových opatření v krajině.

Před započítáním práce musela být provedena selekce dat tak, že byly z testovacího souboru odstraněny měřené rýhy s extrémně velkým objemem a ty, jejichž charakter byl odlišný od majoritní části vzorku. Byly odstraněny rýhy s objemem nad 100 m^3 , což byly zároveň ve dvou případech i rýhy, jež díky svým extrémním rozměrům nemohly být zaměřeny erodoměrem. Dále byla odstraněna také rýha zaměřená na hranici pozemku. Celkově bylo ze vzorku odstraněno 5 rýh. Vzorek pro testování závislosti objemu na příčinných faktorech tedy čítal 20 prvků. Následovalo provedení normalizace dat dle vztahu 5.2.

Byl sestaven regresní model, kde závisle proměnná byla objem rýhy a seznam nezávisle proměnných je uveden níže. Pro přehlednost došlo k jejich uspořádání do tematických skupin:

- Údaje o srážce:
 - Denní úhrn – maximální za vegetační období;
 - Maximální denní úhrn stoletý;
- Údaje o morfologii povodí:
 - Maximální délka údolnice;
 - Průměrný sklon údolnice;
 - Průměrný sklon povodí;
 - Nadmořská výška;
 - Charakteristika povodí;
 - Reliéfový poměr;
- Charakteristiky půdy a odtoku:
 - Podíl jílu v půdě – dle nejbližších výběrových sond;
 - K-faktor;
 - Číslo CN;
 - HSP;
 - 4. a 5. kód čísla BPEJ.

Při použití výše popsaných 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 údaje jako: 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 dle Capry, který je v modifikaci pro měřené rýhy podrobněji popsán v kapitole 6.4.3.

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

$$V = 0.342L^{1.3208}, \quad (6.6)$$

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 $b=1.3208$.

Koeficient determinace R^2 je 0.787 tzn., že model popisuje 78.7% variability Y .

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 měl pak tvar:

$$Y = -4.36581 + 42.7249 \cdot X_1 + 48.9561 \cdot X_{17} + 24.7623 \cdot X_{26}, \quad (6.7)$$

kde:

Y objem rýhy [m³];

X_1 až X_{26} nezávisle proměnné – viz Tab. 12 [jednotky viz Tab. 12].

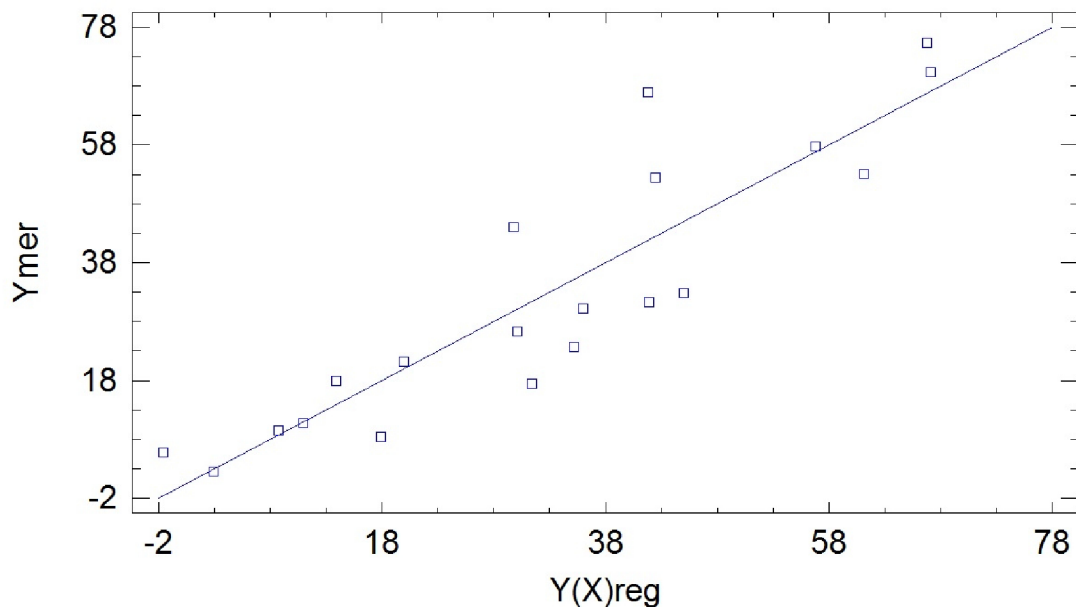
Jedná se o statisticky významný vztah mezi proměnnými na hladině významnosti 95.0%. Koeficient determinace R^2 je 0.810 tzn., že model popisuje 81.0% variability Y . Směrodatná chyba odhadu je 10.832 m³.

Tento model popisuje testovaný vzorek dat lépe než model vycházející pouze z délky rýhy. Vyžaduje však více vstupních dat než výše uvedený vztah závislosti objemu rýhy na její délce. V tabulce níže jsou uvedeny jednotlivé nezávisle proměnné použité ve vztahu 6.7.

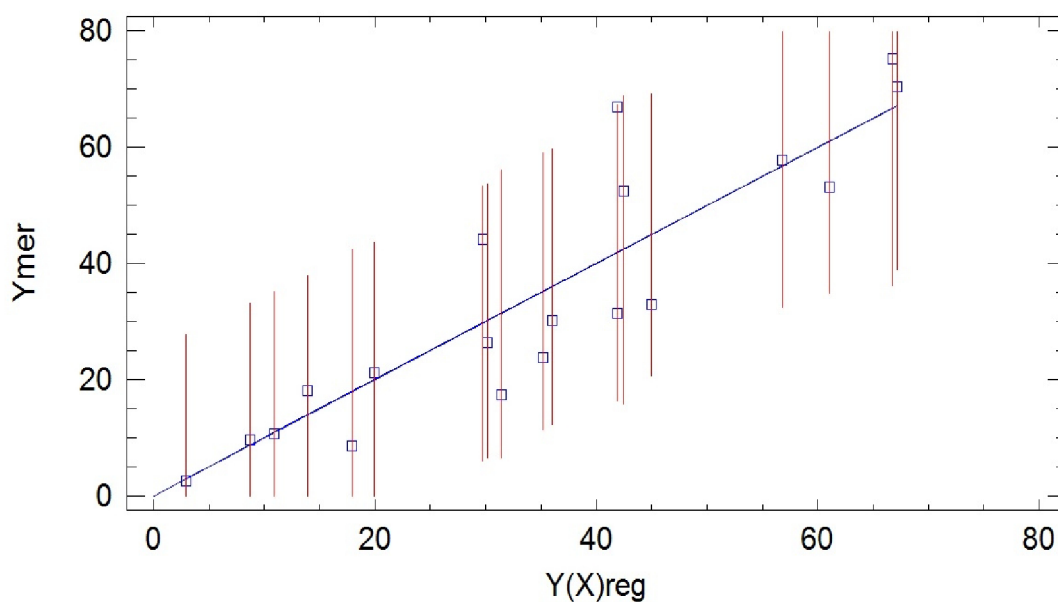
Tab. 22: Popis nezávisle proměnných z regresní rovnice 6.7

Význam nez. proměnné	Označení nez. proměnné	Koeficient β	Významnost nez. proměnné [%]
Délka rýhy	X1	42.72	36.7
Průměrná šířka rýhy	X17	48.96	42.0
Maximální denní úhrn ve vegetačním období	X26	24.76	21.3

Níže je graficky znázorněno porovnání měřeného objemu rýhy s jeho odhadem pomocí regresní funkce.



Graf 48: Porovnání měřeného objemu rýhy s jeho odhadem pomocí regresní funkce.



Graf 49: 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.

7. 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 také 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*“.

8. SEZNAMY

8.1. Seznam použité literatury

Auzet, V. a kol. 1993. Rill erosion as a function of cultivated catchment in the North of France. *Catena*. 1993, 20, stránky 41-62.

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. 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. 2006, stránky 128-138.

Casalí, J. a kol. 2000. Processes of ephemeral gully erosion. *International Journal of Sediment Research*. 2000, stránky 31-41.

Committee on Conservation Needs and Opportunities. 1986. *Soil Conservation*. Washington, D.C. : National Academy Press, 1986. 0-309-03675-5.

ČSN EN ISO 14688-1. 2003. Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařídování zemín - Část 1: Pojmenování a popis. Praha: Český normalizační institut, 2003.

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.

Dumbrovský, M. a kol. 2010. Návrh metodického postupu pro stabilizaci drah soustředěného odtoku. MZe ČR. 2010

eAGRI: Portál farmáře. 2004. Veřejný registr půdy LPIS. [Online] 2004. [Citace: 1. 10 2012.] <http://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny>.

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.

Foster, G.R. 1986. *Soil Conservation: An Assessment of the National Resources Inventory, Volume 2*. 1986.

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. 1978. *Protierozní ochrana*. Praha : SNTL, 1978. str. 288.

Holý, M. a kol. 1982. *Modelování erozních procesů*. Praha : Academia, 1982.

- Holý, M. 1994.** Eroze a životní prostředí. Praha: ČVUT, 1994.
- Horton, R.E. 1945.** Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin. 1945, Sv. 56, stránky 275-370.
- Chahor, Y. a kol. 2012.** Testing AnnAGNPS model in predicting ephemeral gully erosion in Navarre (Spain). EGU General Assembly 2012. 2012.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. a Mays, L. W. 1988.** Applied Hydrology. McGraw-Hill, 1988. ISBN 0-07-010810-2.
- Janeček, M. a kol. 2012.** Ochrana zemědělské půdy před erozí - metodika. Praha : Česká zemědělská univerzita Praha, 2012.
- Kozlovská, S., Toman, F. 2010.** Vyhodnocení indexu předchozích srážek u vybraných klimatologických stanic. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendeleianae Brunensis. 2010.
- Laflen J. M. a kol. 1985.** Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. Soil Conservation and Productivity. 1985, stránky 3-8.
- Lukey, B.T. a kol. 1995.** SHETRAN sediment transport component: equatinsand algorithms. Newcastle upon Tyne : autor neznámý, 1995.
- Morgan, R.P.C. 2005.** Soil Erosion and Conservation. Third Edition. Malden : Blackwell Publishing, 2005. 1-4051-1781-8.
- Münster, P. 2007.** Stržová eroze v jižní části Brněnské vrchoviny. Diplomová práce. Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Geografický ústav, 2007.
- Nachtergaele, J. a kol. 1999.** Testing the Ephemeral Gully Erosion Modle (EGEM) in Mediterranean Environments. [pdf] West Lafayette, Indiana, 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.
- Poesen, J.W.A. a kol. 2011.** Gully Erosion: Procedures to Adopt When Modelling Soil Erosion in Landscapes Affected by Gullyng. [autor knihy] R.P.C. Morgan. Handbook of Erosion Modelling. Oxford: John Wiley and Sons Ltd, 2011.
- Römkens a kol. in Münster, P. 2007.** Stržová eroze v jižní části Brněnské vrchoviny. Diplomová práce. Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Geografický ústav, 2007.

Toman, F., Podhrázská, J. 2002. Vliv klimatických podmínek na vznik eroze. 2002, stránky 456-464.

Toy, T.J. a kol. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement and control. New York: Wiley, 2002. ISBN 0-471-38369-4.

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., 1992. User Manual.

Vandaele, K., a kol. 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.

Zhang, G.H. a kol. 2008. Applicability of WEPP Sediment Transport Equation to Steep Slopes. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2008.

8.2. Seznam publikovaných prací

8.2.1. 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.

8.2.2. 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.

8.3. Seznamy zkratk

A	přispívající plocha svahu [m^2 , ha]
a, b, c.....	regresní koeficienty, konstanty [-]
a_3, b_3	konstanty závislé na Reynoldsově čísle pro půdní částice [-]
A_{p_i}	dílčí část přispívající plochy s homogenním sklonem [m^2]
A_i	plocha příčného profilu rýhy [m^2]
A_{i-1}	plocha předcházejícího příčného profilu rýhy [m^2]
AnnAGNPS.....	Annualized Agricultural Non-Point Source model
BPEJ	Bonitovaná půdně ekologická jednotka
CN.....	číslo odtokových křivek
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČSN	Česká technická norma (Československá státní norma)
D_c	maximální intenzita oddělování částic půdy proudem [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
$D_{(dj)}$	tloušťka uloženého sedimentu [m]
D_f	intenzita oddělování částic půdy [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
d_g	průměr zrna půdní částice [m]
d_{ij}	hloubka proudící vody v rýze v buňce ij [m]
DMT	Digitální model terénu
DSO	dráha soustředěného odtoku
D_{50}	střední velikost zrna půdního materiálu [m]
EGEM.....	Ephemeral Gully Erosion Model
F_1	tíha vody v elementárním úseku [N]
F_2	tlaková síla působící na vodu v element. úseku ve vzdálenosti $x+\Delta x$ [N]
F_3	tlaková síla působící na vodu v elementárním úseku ve vzdálenosti x [N]
F_4	třecí síla [N]
F_5	síla vyvolaná dopadem dešťových kapek [N]
F_c	třecí síla potřebná pro pohyb částic půdy [N]
F_G	gravitační síla [N]
g	tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
G	aktuální množství materiálu neseného v povrch. odtékající vodě [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
h	výška povrchového odtoku [m]
HPJ	hlavní půdní jednotka

HSP.....	hydrologická skupina půd
IPS	Index předchozích srážek
$i_r(t)$	intenzita srážek vztažená k jednotkové ploše svahu [$m \cdot s^{-1}$]
$i_v(t)$	intenzita vsaku [$m \cdot s^{-1}$]
k.ú.	katastrální území
K_c	faktor erodovatelnosti půdy vlivem proudění vody [-]
K_t	koeficient transportu půdního materiálu [$N \cdot m^{-2}$]
KC.....	odolnost půdy v rýze (z hlediska eroze) [-]
L	celková délka rýhy [m]
l	vzdálenost mezi jednotlivými příčnými profily[m]
MAE	Mean absolute error – prům. absolutní chyba odhadu [dle záv. prom.]
max	maximální hodnota ve vzorku
MZe	Ministerstvo zemědělství ČR
n.....	Manningův drsnostní součinitel [$m^{-1/3} \cdot s$]
n_m	počet výpočtových kroků, během nichž probíhá migrace čela rýhy
okr.....	Okres
P_c	procentuální obsah jílu v dané půdě [%]
Q	kulminační průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$]
Q_{ij}	průtok u výpusti buňky ij [$m^3 \cdot s^{-1}$]
R	hydraulický poloměr [m]
r.....	poloměr částic půdy [m]
R^2	Koeficient determinace
Re^*	Reynoldsovo číslo pro půdní částice [-]
r_f	součinitel ve vztahu pro odhad kritického smykového napětí
RUSLE.....	Revised Universal Soil Loss Equation
s	sklon svahu [-, $m \cdot m^{-1}$]
S_{cr}	kritický sklon svahu [$m \cdot m^{-1}$]
s_{ij}	sklon dna výpočetní buňky [-]
SCS	Soil Conservation Service
SHE.....	Système Hydrologique Européen
SHETRAN	SHE-Transport

S_i	sklon dílčí části přispívající plochy [-]
t	čas [s]
T_c	transportní kapacita [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
t_c	transportní kapacita pro konstantní šířku rýhy [$\text{t} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
\bar{u}	průměrná rychlost povrchového odtoku ve směru osy x [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
USA.....	United States of America
USDA.....	U.S. Department of Agriculture
USLE.....	Universal Soil Loss Equation
ÚVHK.....	Ústav vodního hospodářství krajiny
V	objem rýhy [m^3]
v_s	sedimentační rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
VÚMOP.....	Výzkumný ústav meliorace půdy
VÚT.....	Vysoké učení technické
W	průměrná šířka rýhy [m]
w_{ij}	šířka rýhy ve výpočetní buňce ij [m]
W_{\max}	maximální šířka rýhy [m]
x	osa souř. ve směru povrchu svahu; n-tá hodnota souboru nez. proměnné
X	nezávisle proměnná
x_1	první hodnota souboru nezávisle proměnné
x_i	poslední hodnota souboru nezávisle proměnné
Y	závisle proměnná
\emptyset	úhel sklonu povrchu v době, kdy jsou částice půdy v klidu [$^\circ$]
μ	dynamická viskozita vody [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$]
ρ	objemová hmotnost vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
ρ_d	objemová hmotnost sedimentu uloženého na dně rýhy [$\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$]
ρ_s	objemová hmotnost půdy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
τ	smykové napětí vyvolané proudící vodou [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]
τ_{cr}	kritické smykové napětí potřebné k oddělení částic půdy [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]

8.4. Seznam ilustrací a tabulek

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Síly působící na částice půdy při zahájení jejich pohybu (Morgan, 2005)</i>	10
<i>Obr. 2: Kritická rychlost při rozrušování, transportu částic a sedimentaci částic jako funkce velikosti zrn</i>	12
<i>Obr. 3: Znázornění rozdílu mezi běžnými rýhami a efemérními rýhami (U.S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service, 1992)</i>	18
<i>Obr. 4: Stádia iniciace rýhy (Morgan, 2005)</i>	19
<i>Obr. 5: Schéma tvorby svislých stěn v podélném profilu efemérní rýhy (Gordon, 2007)</i>	20
<i>Obr. 6: Příklad jednoho ze zařízení sloužícího pro provedení volumetrické kvantifikace jak ho publikoval De Santisteban (2006)</i>	36
<i>Obr. 7: Zadávání vstupních hodnot programu EGEM</i>	38
<i>Obr. 8: Výstupy z modelu EGEM</i>	39
<i>Obr. 9: Schematizace povodí a prostorová lokalizace soustředěného povrchového odtoku v modelu SHETRAN</i>	45
<i>Obr. 10: Vymezený rozsah osetí</i>	47
<i>Obr. 11: Postupový krok 1</i>	48
<i>Obr. 12: Postupový krok 2</i>	49
<i>Obr. 13: Postupový krok 3</i>	49
<i>Obr. 14: Příklad paralelních rýh podél údolnice</i>	49
<i>Obr. 15: Výrazný erozní smyv před realizací stabilizace DSO v k.ú. Dušejov</i>	50
<i>Obr. 16: Stav po stabilizaci DSO v k.ú. Dušejov</i>	50
<i>Obr. 17: Lokalizace prověřovaných erozně ohrožených DSO</i>	55
<i>Obr. 18: Ústí jedné ze zaměřovaných rýh</i>	56
<i>Obr. 19: Nákras erodoměru (Pavlík, Sobotková, Dumbrovský, Drongová, Uhrová, 2013)</i>	57
<i>Obr. 20: Zaměřování příčného profilu erozní rýhy Erodoměrem</i>	58
<i>Obr. 21: Neupravené foto erodoměru</i>	61
<i>Obr. 22: Ořezané a natočené foto erodoměru</i>	61
<i>Obr. 23: Automatizovaná identifikace hlaviček jehel</i>	62
<i>Obr. 24: Situace analyzovaných DSO v KÚ Šardice</i>	63
<i>Obr. 25: Lokalizace erozně ohrožených DSO vybraných do regresní analýzy</i>	64
<i>Obr. 26: Lokalizace prověřených erozně ohrožených DSO</i>	68
<i>Obr. 27: Odchytky měřených rýh a potenciálně ohrožených DSO – Lipová u Přerova</i>	110
<i>Obr. 28: Odchytky měřených rýh a potenciálně ohrožených DSO – Domašov</i>	111

Obr. 29: Odchytky měřených rýh a potenciálně ohrožených DSO – Hodice 112

Obr. 30: Odchytky měřených rýh a potenciálně ohrožených DSO - Jindřichov u Hranic..... 113

Seznam grafů

Graf 1: Graf zjištěných maximálních sklonů svahů a velikostí přispívajících ploch (Vandaele a kol., 1996)	21
Graf 2: Závislost parametrů rýhy na max. 3denním kumulativním úhrnu (Capra, 2009)	24
Graf 3: Srovnání vývoje objemu rýhy při bezorebných postupech a při použití orby.....	28
Graf 4: Průběh změny množství transportovaného materiálu a velikosti transportní kapacity podél konkávních svahů (Foster, 1986).....	30
Graf 5: Průběh změny množství transportovaného materiálu a transportní kapacity podél efemérní rýhy s konvexním tvarem podélného profilu (Foster, 1986).....	31
Graf 6: Změna smykového napětí v čase (Foster, 1986).....	32
Graf 7: Četnost zastoupení identifikovaných DSO dle nadmořských výšek (Ekotoxa, 2011)	34
Graf 8: Porovnání výstupů z modelu AnnAGNPS při různě zadaných scénářích (Gordon, 2007)	43
Graf 9: Průběh šířky rýhy po její délce u rýh zaměřených v roce 2009.....	73
Graf 10: Průběh šířky rýhy po její délce u rýh zaměřených v roce 2010.....	74
Graf 11: Průběh šířky rýhy po její délce u rýh zaměřených v roce 2011.....	74
Graf 12: Průběh šířky rýhy po její délce u rýh zaměřených v roce 2012.....	75
Graf 13: Průběh hloubky rýhy po délce rýh měřených v roce 2009.....	76
Graf 14: Průběh hloubky rýhy po délce rýh měřených v roce 2010.....	77
Graf 15: Průběh hloubky rýhy po délce rýh měřených v roce 2011	77
Graf 16: Průběh hloubky rýhy po délce rýh měřených v roce 2012.....	78
Graf 17: Nárůst velikosti přispívající plochy po délce u rýh měřených v roce 2009.....	79
Graf 18: Nárůst velikosti přispívající plochy po délce u rýh měřených v roce 2010.....	79
Graf 19: Nárůst velikosti přispívající plochy po délce u rýh měřených v roce 2011.....	80
Graf 20: Nárůst velikosti přispívající plochy po délce u rýh měřených v roce 2012.....	80
Graf 21: Krabicový graf – analýza vzorku měřených ztrát půdy přepočtené na přispívající plochu rýhy (Drongová, 2013).....	81
Graf 22: Nárůst objemu rýhy po její délce u rýh měřených v roce 2009	82
Graf 23: Nárůst objemu rýhy po její délce u rýh měřených v roce 2010.....	82
Graf 24: Nárůst objemu rýhy po její délce u rýh měřených v roce 2011	83
Graf 25: Nárůst objemu rýhy po její délce u rýh měřených v roce 2012	83
Graf 26: Průběh srážkových událostí ve vegetačním období roku 2010 u Šlapanic	84
Graf 27: Průběh srážkových událostí ve vegetačním období roku 2010 v Šardicích	85

Graf 28: Krabicový graf – analýza vzorku délek erozně ohrožených DSO.....	86
Graf 29: Krabicový graf – analýza vzorku měřených délek rýhy.....	86
Graf 30: Porovnání měřených délek DSO získaných ze „Studie MZe“ s jejich odhady pomocí regresní funkce se znázorněním 95% intervalů spolehlivosti odhadů $Y(X)$	88
Graf 31: Závislost délky rýhy na jejím měřeném objemu.....	90
Graf 32: Závislost délky rýhy na její půdorysné ploše.....	91
Graf 33: Závislost délky rýhy na kulminačním průtoku v ústí rýhy při úhrnu $N=100$	93
Graf 34: Závislost délky rýhy na přispívající ploše – vzorek všech identifikovaných rýh.....	94
Graf 35: Závislost délky rýhy na přispívající ploše – vzorek rýh měřených v širokořádkových plodinách.....	95
Graf 36: Závislost délky rýhy na jejím objemu – všechny rýhy měřené erozním mostem.....	96
Graf 37: Závislost délky rýhy na jejím objemu – jen rýhy měřené erodoměrem a kratší než 350 m.....	97
Graf 38: Závislost měřeného objemu rýh na indexu AS.....	98
Graf 39: Převýšený podélný profil původního terénu v místech DSO měřených rýh v roce 2009.....	99
Graf 40: Převýšený podélný profil původního terénu v místech DSO měřených rýh v roce 2010.....	99
Graf 41: Převýšený podélný profil původního terénu v místech DSO měřených rýh v roce 2011.....	100
Graf 42: Převýšený podélný profil původního terénu v místech DSO měřených rýh v roce 2012.....	100
Graf 43: Znázornění 95% intervalu spolehlivosti pro data erozně ohrožených DSO – „Studie MZe“	101
Graf 44: Znázornění 95% intervalu spolehlivosti pro vzorek měřených rýh	102
Graf 45: Porovnání měřené délky rýh s jejím odhadem pomocí regresní funkce.....	104
Graf 46: Porovnání měřené délky rýh s jejím odhadem pomocí regresní funkce se znázorněním 95% intervalů spolehlivosti odhadu $Y(X)$	105
Graf 47: Krabicový graf – analýza vzorku prahových hodnot velikostí sběrných ploch u měřených rýh	109
Graf 48: Porovnání měřeného objemu rýhy s jeho odhadem pomocí regresní funkce.....	117
Graf 49: Porovnání měřeného objemu rýhy s jeho odhadem pomocí regresní funkce se znázorněním 95% intervalů spolehlivosti odhadu $Y(X)$	117
Seznam tabulek	
Tab. 1: Charakteristiky jednotlivých typů eroze (Laflen J. M. a kol., 1985).....	16
Tab. 2: Srovnání zjištěných koeficientů dosazovaných do rovnice pro výpočet kritického sklonu svahu	22
Tab. 3: Parametry regresních vztahů pro jednotlivá vegetační období (Capra, 2009).....	23
Tab. 4: Základní parametry erozně ohrožených DSO (Ekotoxa, 2011).....	33
Tab. 5: Rozdělení DSO dle vyústění (Ekotoxa, 2011).....	35

<i>Tab. 6: Směs s vysokým protierozním účinkem, vhodná na stanoviště s dostatkem vláhy, dobře zásobené živinami</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 7: Směs s vysokým protierozním účinkem, vhodná na stanoviště sušší, s nižší zásobou živin.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 8: Směs s vysokým protierozním účinkem, vhodná na stanoviště ve vyšších polohách s drsnějšími klimatickými podmínkami.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 9: Směs s vysokým protierozním účinkem, vhodná na stanoviště ve vysokých polohách s drsnými klimatickými podmínkami.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 10: Chyba zaměření vlivem změny vzdálenosti příčných profilů – DSO1_Šardice_2011.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 11: Chyba zaměření vlivem změny vzdálenosti příčných profilů – DSO3_Domašov_2012.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 12: Výčet nezávisle proměnných testovaných v rámci vícerozměrné lineární regrese – „Studie MZe“</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 13: Výčet nezávisle proměnných testovaných v rámci vícerozměrné regrese – měřená data</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 14: Seznam zaměřených rýh.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 15: Základní charakteristiky měřených rýh.....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 16: Základní statistické parametry vzorků průměrných rozměrů rýhy</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 17: Popis nezávisle proměnných z regresní rovnice (6.2).....</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 18: Seznam nezávisle proměnných seřazených podle velikosti koeficientu determinace.....</i>	<i>89</i>
<i>Tab. 19: Seznam rýh a srážkových událostí.....</i>	<i>92</i>
<i>Tab. 20: Seznam nejlivnějších nezávisle proměnných.....</i>	<i>103</i>
<i>Tab. 21: Popis nezávisle proměnných z regresní rovnice (6.5).....</i>	<i>105</i>
<i>Tab. 22: Popis nezávisle proměnných z regresní rovnice 6.7</i>	<i>116</i>