



Zemědělská
fakulta
Faculty
of Agriculture

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Katedra krajinného managementu

Bakalářská práce

Porovnání nejnovějších metod pro výpočty vodní eroze

Autor práce: David Valenta

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.

České Budějovice
2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....

Podpis

Abstrakt

Obsahem této bakalářské práce je výklad, který se zaměřuje na erozi, především erozi vodní. V úvodní části je objasnění vodní eroze, její vznik, důsledek vodní eroze a možná protierozní opatření, kterými lze tento typ eroze potlačit nebo alespoň omezit její dopad.

Hlavním účelem této bakalářské práce je porovnání dostupných postupů při výpočtu vodní eroze. V této práci jsou uvedeny metody průměrného ročního odsunu zemin a další vybrané modely, které slouží jako základ k výpočtu okamžitého odsunu zemin. Mezi primární metody pro výpočet průměrného ročního odnosu zemin patří pak metody USLE a RUSLE. V této práci byli pro posouzení výpočtu okamžitého odnosu zemin vybrány pouze nejvíce dostupné modely.

Klíčová slova: vodní eroze, USLE, RUSLE, model

Abstract

The content of this bachelor thesis is an explanation that focuses on erosion, especially water erosion. The introductory part explains water erosion, its origin, the consequence of water erosion and possible anti-erosion measures, which can suppress this type of erosion or at least reduce its impact.

The main purpose of this bachelor thesis is to compare the available procedures for calculating water erosion. In this work, the methods of average annual land removal and other selected models are presented, which serve as a basis for calculating the immediate land removal. The primary methods for calculating the average annual soil distribution include the USLE and RUSLE methods. In this work, only the most available models were selected to assess the calculation of the instantaneous soil removal.

Keywords: water erosion, USLE, RUSLE, model

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Pavlu Ondrovi, CSc. za vedení mé práce, cenné rady a odborné připomínky, které mi při psaní této práce dal.

Obsah

Úvod.....	7
1 Literární přehled.....	8
1.1 Druhy a členění eroze.....	8
1.1.1 Větrná eroze.....	10
1.1.2 Větrná eroze.....	10
1.2 Vznik eroze.....	11
1.2.1 Hydrologické a klimatické.....	11
1.2.2 Morfologické.....	12
1.2.3 Geologické a půdní.....	12
1.2.4 Vegetační.....	13
1.2.5 Proces obhospodařování a využívání půdy.....	14
1.3 Dopady vodní eroze.....	15
1.3.1 Ztráta půdy.....	15
1.3.2 Transport a sedimentace půdy.....	16
1.3.3 Transport chemických částic.....	17
1.4 Prostředky proti erozi.....	17
1.4.1 Organizační.....	18
1.4.2 Agrotechnická.....	20
1.4.3 Technická.....	21
2 Cíl práce.....	26
3 Metodika.....	27
3.1 Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zeminy.....	27
3.1.1 Metoda USLE – univerzální rovnice pro výpočet průměrné dlouhodobé ztráty půdy.....	27
3.1.2 Metoda RUSLE – revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy.....	34

3.2	Metody výpočtu okamžitého odnosu zemin.....	37
3.2.1	Model SWRRB – Simulator for Water resources in Rural Basins	37
3.2.2	Model AGNPS – Agricultural NonPoint Source	37
3.2.3	Model SWAT – Soil and Water Assessment Tool.....	38
3.2.4	Model EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator.....	38
3.2.5	Metoda čísel odtokových křivek (CN).....	38
4	Výsledky a diskuse.....	40
4.1	Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zemin.....	40
4.2	Zhodnocení vhodnosti aplikace vybraných modelů	47
	Závěr	51
	Seznam použité literatury.....	52
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	56
	Seznam použitých zkratk.....	57
	Přílohy	58

Úvod

Půdní eroze je vlastně přirozený proces porušování a přepravy předmětů na zemském povrchu bez viditelných škodlivých dopadů. Například se jedná o skály, horniny, půdy apod. takto se nazývá eroze, která je zapříčiněná mechanickým působením okolních látek (obzvláště proudící vodou, větrem, ledem, zvětralinami a sněhem), které jsou v pohybu. Eroze jako taková byla vždycky existujícím procesem, v přírodních podmínkách probíhá bez evidentních škodlivých dopadů.

Půda je nenapravitelný zdroj a obnovuje se pomalu. Mělo by s ní být zacházeno jako s důležitou podstatou zemědělského hospodaření. Jeden centimetr půdy může být odnesen během jediného přívalového deště, avšak takovýto centimetr se podle lokálních podmínek může tvořit desítky až stovky let.

V intenzivní zemědělské výrobě se bohužel eroze rapidně zrychluje. V České republice je vodní erozí ohroženo přibližně 39 % orné půdy a skoro 10 % ohrožuje větrná eroze. Většina těchto zemědělských ploch nemá ochranu proti ztrátě půdy tak, aby nedošlo k překročení přijatelné hodnoty, kdy nejprve při erozi dojde k odnosu těch nejjemnějších půdních partikulí. Důsledek vlivu eroze je změna půdní struktury, úbytek vodního potenciálu půdy, snížení možnosti vázat živiny, kompenzovat pH, celková ztráta sorpční kapacity a ztráta organické složky. Tyto dopady registrují zejména zemědělci, protože pro ně to znamená zhoršení jakosti sklizně a snížení zisku. Poškození způsobené erozí půdy na zemědělské výrobě se ukazuje i ve zhoršení kvality vodních zdrojů, zvláště ve zhoršení kvality pitné vody splachem zeminy, pesticidů a hnojiv. Ujistit se o špatných vlivech eroze, můžeme po silných deštích nebo při jarním tání sněhu, kdy je půda z pozemků s neuspokojivou protierozní ochranou splachována na komunikace, eventuelně v zastavěných plochách obce, kde ohrožuje stavby.

1 Literární přehled

1.1 Druhy a členění eroze

Podle intenzity rozdělujeme erozi na:

- Normální
- Zrychlenou

Podle formy rozdělujeme:

- Plošnou erozi
- Proudovou erozi
- Výmolnou erozi

Podle erozních součinitelů rozdělujeme na:

- Erozi pocházející z působení větru – eolitická (větrná eroze)
- Erozi pocházející z působení vody – fluviální nebo akvatickou (vodní eroze)
- Erozi pocházející z působení ledu – glaciální (ledovcová) eroze (Janeček et al., 2008)
- Erozi nivální (sněhovou)

Podle časového stanoviska:

- Soudobá eroze
- Historická eroze

Podle mechanismu rozlišujeme erozi:

- Rýžkovou
- Mezirýžkovou

Další členění jsou:

- Eroze antropogenní
- Eroze zemní (Holý, 1978)

Tyto druhy eroze mohou být přítomny jednotlivě nebo ve sloučení, to znamená, že potom zapříčiňují různorodou sílu erozních procesů. Avšak celosvětově zcela největší škody způsobuje větrná a vodní eroze (Holý, 1978).

Glaciální eroze ledovcová

Vznik tohoto druhu eroze je zapříčiněn vlivem ledovců, které působí svou hmotností do údolí. Ledovec při svém pohybu vynakládá svou valnou část síly na erodování skalního podloží, tímto působením ledovec obrušuje a vyhlazuje skalní podloží. Působením unášeného horninového materiálu se rodí tzv. trogy (modelace údolí), charakteristikou tohoto jevu jsou ledovcová údolí, které mají tvar písmene U.

Jako dalším jevem je rýhování balvanů zamrzlých k ledu. Do nižších ploch ledovec sesouvá a unáší velké kvantum horninových zvětralin, po jejich uložení se tvoří morény. Poté vznikají morény svrchní, morény boční na okrajích a na dně ledovce morény spodní, tyto typy morén rozlišujeme podle způsobu dopravy. Jestliže dojde ke střetu dvou ledovcových proudů a dojde k jejich splynutí, vznikne střední moréna. Obloukovitá čelní moréna se tvoří u ledovcové paty. (Janeček et al., 2008).

Glaciální eroze sněhová

Sněhová eroze vzniká přesouváním sněhu v podobě lavin, obvykle úplně zničí zasažený pás území. Také zdoluhavý pohyb jednotlivých vrstev sněhu po půdním povrchu, který není umrzlý, v průběhu jarního tání, může vyvolat tuto erozi (Holý, 1978).

Antropogenní eroze

Značný dopad na vznik a průběh erozních procesů má, ale i člověk, a to zejména jeho zásahy do přírody. Významně tím tak přispívá k akceleraci eroze. Na erozní postupy má přímý a nepřímý vliv.

Přímý vliv se projevuje zvláště budováním technických stavení a urbanizací. Nepřímé vlivy se projevují zruinováním vrozeného vegetačního pokryvu půdy a jeho nahrazením vegetací s malým chránicím efektem a zhoršením vlastností půdy např. biologických, chemických i fyzikálních, hromaděním povrchového odtoku různorodými změnami území, znečištěním půdy pomocí odpadů atd. (Holý, 1978).

Zemní eroze

Jedná se o erozní pohyb suťových proudů, které jsou tvořeny suťovým materiálem prostoupeným vodou. Při svém pohybu do údolí narušují suťové proudy půdy a tvoří se hluboké brázdy. Hmota suťových proudů bezprostředně ohrožuje osady, komunikace v údolích a technické stavby (Janeček et al., 2008).

1.1.1 Větrná eroze

Větrná eroze má základ v rozrušování půdní hmoty kinetickou energií větru, transportu uvolněných částic a jejich následující ukládání při úbytku energie vzdušný proudů. Tato eroze ohrožuje především místa s průměrnými ročními srážkami, které nepřesáhnou více než 250 až 300 mm, s konstantními větry pouze s jedním převládajícím směrem, narážejícím na rovný či mírně zvlňený povrch půdy, a to nekrytý nebo nedostatečně chráněný vegetací (Holý, 1978).

Větrná eroze dále způsobuje obnažení kořínků rostlin, narušuje tenké stonky mladých rostlin větrem nesenými zrnky zeminy (Toman, 1995).

Tato eroze má dále vliv na snížení produktivity půdy pomocí ztráty půdy a jejich živin, rovněž zmenšuje potenciál půdy vázat uhlík z atmosféry (Tisdall et al., 2012).

Vědomosti o erozních druzích nám dávají představu o tom, že ačkoli větrná eroze způsobuje v rozlehlých oblastech podobně velké nebo i větší škody, v celosvětovém měřítku není tak závažným problémem jako je vodní eroze. Větrná eroze je příznačným úkazem v aridních eventuálně semiaridních zemích. Rovněž v humidních zemích se setkáme s náznaky větrné eroze, a to u sušších oblastí na půdách, které se vyznačují nepříznivými fyzikálními vlastnostmi (Holý, 1978).

1.1.2 Větrná eroze

Vodní eroze podle Holého (1978) a Tomana (1995) vzbuzuje pohybovou energii dešťových kapek, které dopadají na půdní povrch a mechanickou silou vody, která stéká na povrchu. Také Vrieling (2006) ve svém výzkumu poukazuje na tuto skutečnost a tvrdí, že vodní erozi regulují klimatické charakteristiky, vlastnosti půdy, vegetace, topografie a obhospodařování půdy. Také zmiňuje, že vodní eroze je naléhavý celosvětový problém, jenž zapříčiňuje degradaci půdy a má silný dopad na životní prostředí, s tím jsou spojené početné ekonomické výdaje v souvislosti se zemědělskou výrobou, kvalitou vody a infrastrukturou.

Na povrchu půdy se vodní eroze také projevuje, a to tvořením odtokových drah odlišných rozměrů (výmolů, rýh, rýžek) a výběrem půdních částic, na místech, kde je nápadné zhušťování povrchového odtoku je možnost tvoření strží. Dále pak v místech

sníženého sklonu a v depresích dochází na níže položených plochách ke střežení půdních částic. Částice, které jsou přemísťovány za hranice pozemku se dostávají do hydrografické sítě, kde tvoří splaveniny, ty se poté usazují v úsecích toků, které mají omezenou transportní schopnost a dále i v nádržích. Hlavním zdroje splavenin je smyv z orné půdy, avšak je nezbytné zařadit i erozi ploch stavenišť, erozi lesní půdy v průběhu mechanizovaného těžení dřeva, břehovou a dnovou erozi v tocích (Janeček et al., 2007).

1.2 Vznik eroze

Počátek erozních procesů, jejich intenzita a procesy jsou ovlivněny nejen sdruženým působením souborem přírodních podmínek ale i člověkem ovlivnitelných podmínek. Hlavní činitelé eroze jsou:

1.2.1 Hydrologické a klimatické

- zeměpisná poloha
- nadmořská výška
- teplota, výpar, odtok, oslunění
- intenzita srážek, množství, rozdělení
- intenzita větru, směr, přítomnost (Janeček et al., 2008)

Klíčový faktor při vodní erozi jsou srážky. Podstatný je jejich vliv ve vztahu množství k jeho síle. Zatímco voda nemůže proniknout do půdy a dostává se povrchový odtok, směřující po svahu dolů, tímto nastává eroze. Možnost pohlcovat vodu půda ztrácí v okamžiku, kdy síla srážek přesahuje infiltrační kapacitu půdy, dále jestliže srážky padají na saturovaný povrch (Bissonnais et al., 2002).

Podle Holého (1978) je zemědělství postihováno nejvíce půdním úbytkem. Ve velkém měřítku často dochází k odnosu a uvolňování půdních částic. Častokrát se obnaží půdní základ a smyje se plytká půdní vrstva, a to kvůli intenzivním srážkám. To má za následek nepříznivý dopad při dlouhodobém postupu utváření nově se tvořící půdy, a to jak v lesní produkci, tak v zemědělství (Holý, 1978).

Nepříznivého účinku eroze si můžeme všimnout i mimo plochy na kterých k erozi dochází, působením depozice a transportu materiálu. Pokles kapacit koryt vodních toků, kapacit nadržů, respektive zvýšení rizika povodní (Sklenička, 2003).

1.2.2 Morfologické

- sklon území
- délka a tvar svahu
- expozice a návětrnost

Janeček et al. (2008) ve svojí práci uvádějí, že díky nárůstu délky svahu se intenzita eroze zvětšuje. Ta je formulována jako vodorovná vzdálenost od zrodu místa povrchového odtoku části, kde je dispozice snižována tolik, že se ukládá erodovaný materiál.

Povrchový odtok vody po nakloněném území způsobuje vodní erozi. Za domnělého deště a se zvětšujícím se úkosem a délkou svahu nabývá stékající voda větší rychlost, a tím i mnohem větší ničivý vliv na povrch půdy. Síla erozních procesů se většinou snižuje se zmenšováním sklonu (Holý, 1978).

Forma svahů má dopad na účinnost a průběh erozních procesů. Svahy je možné rozdělit na přímé, vypuklé a kombinované. Rozdělené svahy poté zabezpečují rozdílné erozní procesy, protože sklon, který je převážným erozním koeficientem, získává na jednotlivých třídách svahů největší hodnoty v odlišné vzdálenosti od rozvodí a náleží mu tak odlišná velikost sběrného území. Erozní procesy ukazují svůj maximální vliv v místech svahu, kde jsou sklon a distance v optimálním poměru od daného rozvodí.

Expozice svahu je podmiňována jeho umístěním vzhledem ke světovým stranám. Rychlejší tání sněhu při proměňování nočních a denních teplot je zapříčiněna sluneční expozicí na jižních a západních svazích. Následkem tohoto tání je zvýšený povrchový odtok vznikající ze sněhových vod, potom vymrzání vegetace a intenzivnější oslabování půdního substrátu, což zvětšuje intenzitu eroze v porovnání se svahy zastíněnými nebo umístěnými k severu a západu. (Holý, 1978).

1.2.3 Geologické a půdní

- půdní typ, půdní druh
- struktura a textura půdy, její vlhkost a obsah humusu

-
- povaha horninového substrátu (Janeček et al., 2008)

Podle Holého (1978) je pro stanovení velikosti a časového průběhu infiltrace srážkové vody do půdy prvořadý vnitřní pořádek půdy a současně její vlhkost a zvrstvení, pro rezistenci půdy proti vodní a větrné erozi především obsah humusu a nasycenost sorpčního komplexu. Vlivem geologických poměrů na proces a vznik eroze se užívá přímo, a to imunitou obnaženého geologického podkladu podléhajícího styku s tekoucí vodou a ovzduším, nepřímo působením na povrchu půdního substrátu, jehož znaky jsou dány druhem geologického podkladu.

1.2.4 Vegetační

- hustota a období trvání pokryvu (Janeček et al., 2008)

Vegetace má vliv na sílu a směr erozních procesů tím, že chrání povrch půdy před účinky větru a dešťových kapek, které na ni přímo dopadají, zvyšuje biologické, chemické a fyzikální vlastnosti půdy a snižuje povrchový odtok. Kořenové systémy vegetace závisí na konsolidaci půdy, která je také důležitá. Vegetace způsobuje častý rozklad sněhové pokrývky, zejména v zimním období, a snižuje riziko zamrznutí půdy v závislosti na stupni růstu (Holý, 1978).

Půdu chrání před vodní erozí vegetace a pomáhá zvyšovat infiltrační schopnost půdy. Rostliny chrání půdu snížením energie dešťových kapek padajících na povrch půdy pomocí jejich listů a kořenů. Vegetace zároveň slouží jako fyzická bariéra, která brání sedimentům měnit tok na povrchu půdy. Co se týče vegetace, tak bereme v úvahu travní porosty, lesní a keřové porosty. Lesní porost tvořený hustým stromovým krytem, bohatým stavem houštiny a nepoškozenou vrstvou hrabanky má největší vliv na vývoj povrchového odtoku a zároveň na proces a intenzitu eroze. Les má zásadní vliv na tvorbu odtoku, kde snižuje celkový odtok prostřednictvím infiltrace srážkové vody, zachycením a zpomalením tekoucí vody na povrchu půdy (Nondedeu a Bédécarrats., 2007).

Podle Skleničky (2003) je významným faktorem, který ovlivňuje retenční potenciál lesů, jejich zdravotní stav a pak dodává, že nenápadný, ale v konečném důsledku velmi důležitý faktor, je také vznikající sekundární hydrologická síť v důsledku pojezdu těžké lesní mechaniky a odvozu dřeva. Stejně jako lesní porost má pozitivní

dopad na rozsah a postup povrchového odtoku také travní porost s přijatelně vyvinutým trávníkem (Holý, 1978).

1.2.5 Proces obhospodařování a využívání půdy

- střídání plodin
- směr obdělávání
- místo a tvar pozemku

Výběr vhodné velikosti pozemku je ovlivněn řadou faktorů a v některých případech je výsledkem kompromisu mezi dvěma navzájem si odporujícími faktory tedy, přírodními faktory, které mají tendenci vytvářet menší půdní jednotky a ekonomickými faktory, které upřednostňují produkci dostatečně velkých pozemků (Janeček et al., 2008).

Forma a rozsah pozemků zvolených pro rovinaté oblasti v oblastech ohrožených erozí musí odpovídat kritériím protierozní ochrany a musí být funkčně přizpůsobeny reliéfu, který má přímý dopad na vodní a větrný režim oblasti. Nemá být překročena maximální šířka pozemku, kterou dovolují meze. Na územích ohrožených erozí by měly být sklony pokrývající více než 5 % pozemku, s delší stranou ve směru vrstevnic a stejným směrem, ve kterém se mají kultivovat. Nejlepším tvarem pozemku je obdélník nebo rovnoběžník s vnitřními úhly 50 až 60 stupňů, s delší stranou obrácenou ke směru kultivace. Poměr stran by měl být mezi 1: 2 a 1: 3, ale ne více než 1: 6. Ekonomická mechanizace určuje poměr délek půdy v oblasti, která není ohrožena erozí. Nejvýhodnější délka je 500 až 1 000 metrů a šířka honu je násobkem zásobárny šířky záběru stroje (Holý, 1978).

Rozměr pozemku na orné půdě ve svahu nesmí překročit přípustnou délku, která je určena naměřenými přípustnými ztrátami půdy v důsledku eroze. Tento koncept platí pro pozemek, který je obděláván jako jedna část, i pro skupiny pozemků oddělených pouze nezachytitelnými hranicemi povrchového odtoku. (Janeček et al., 2007).

Hospodařením s půdou se mají vytvořit příznivé podmínky pro optimální sklizeň, zvýšit odolnost půdy vůči vodě a větru, což umožňuje vodě pronikat do půdy, aby zajistila bezpečný odtok dešťové vody na povrchu území a zajištění dodávky vláhy. Půda s příznivými fyzikálními, geologickými, chemickými a biologickými vlastnostmi, které určují vznik drobtovité struktury, odolává erozi nejlépe. Soudržnost a

propustnost vody jsou charakteristikou těchto půd. Přítomnost organické hmoty dodávané hnojením, zejména vápenatých hnojiv, kompostů a vhodného složení, je podporována přítomností sorpčně nasyceného komplexu v půdě. Související odborné publikace zahrnují systematické studium úpravy půdy.

1.3 Dopady vodní eroze

1.3.1 Ztráta půdy

K největšímu množství smyvu půdy na jednotku plochy nedochází jen na orné půdě, ale spíše kvůli velkému prostoru, kdy je celkové smyv větší než u jakéhokoli jiného zdroje (Janeček et al., 2008).

Když je vodní eroze intenzivnější, například když je velká část horního horizontu půdy odplavena, spodní horizont, který má menší obsah organické hmoty a nižší propustnost, není schopen absorbovat dostatek vody ze srážek a půdní typ je zbaven zdroje vlhkosti. A právě tento jev má zásadní vliv na růst vegetace v období sucha (Holý, 1978).

Celé zemědělství je postiženo vyčerpáním půdy v důsledku erozních procesů. Vodní eroze má za následek velké rýhy, výmoly a strže rozdělujících půdu do různých celků, což způsobuje zhoršení kultivačního procesu. Uvolňování a odstraňování částic půdy obvykle probíhá v širokém měřítku. Mělká vrstva půdy je často odplavena silnými srážkami, což odhaluje půdní základ. Tento jev má zásadní negativní důsledky v dlouhodobé fázi vývoje nových půd pro zemědělskou a lesnickou výrobu. Hodnoty tohoto půdního poměru jde obtížně vypočítat, protože jsou závislé na počtu, povaze a formě živin, které se dostanou do půdy, a také na vlastnostech půdy (Holý, 1978).

Nedostatek rostlinných živin vede ke snížení výnosu i ke snížení kvality sklizně. Jemné částice půdy se ztrácejí při procesech eroze s nižší intenzitou. To mění strukturu a složení půdy a snižuje vodní kapacitu půdy. Úbytek živin na zemědělské půdě je vážný a také nákladný ekonomickým problémem v rozvoji zemědělství (Holý, 1978).

Pokles půdy je dalším následkem vodní eroze. Produkční potenciál půd se snižuje v důsledku dopadu dalších negativních faktorů. Ztráta půdy, která ohrožuje produkční schopnost ekosystému, je jedním z nejzávažnějších problémů. Degradace přispívá k sociálním a politickým nepokojům v mnoha zemích po celém světě a ohrožuje samotný život lidstva v důsledku jeho vlivu na životní prostředí a produkční potenciál

půd. To je obecně známé jako zhoršení kvality a produktivity půd způsobené lidským zneužitím. Slovo degradace označuje negativní změny v cyklu živin a organické hmoty v půdě, jakožto i změny v textuře a struktuře, popřípadě negativní změny ve fyzikálních, biologických a chemických vlastnostech půdy. Jelikož je půda nejdůležitějším přírodním zdrojem, musí být chráněna (Janeček et al., 2008).

1.3.2 Transport a sedimentace půdy

Na úpatí svahů se ukládají částice půdy uvolněné během povrchového odtoku. Splaveniny se vytvářejí v důsledku transportovaných částic půdy. Tyto sedimenty ucpávají přírodní i umělé vodní toky, stavby na tocích a vodní nádrže. Snižují ještě potřebnou potencialitu toků a kanálů, ovlivňují zásobování vodou v různých odvětvích národního hospodářství vodou a někdy omezují funkci kanálů. Tento problém je obzvláště problematický, pokud jde o snížení průtokové kapacity toků. Splaveniny v tocích zvedají nivelitu dna, což vede ke škodlivým povodním a ke zvýšení hladiny podzemní vody v okolí, což způsobuje zamokření. Splaveniny ohrožují provoz a životnost staveb na tocích, zejména sacích zařízení (Holý, 1978).

Během přepravy půdních částic dochází ke značnému rozměrovému výběru. Složení sedimentu je určeno jemným materiálem ve formě suspenze určeného pro transport, který je samostatně k dispozici (Janeček et al., 2008).

Usazeniny obsažené ve vodních nádržích představují velkou hrozbu, protože vliv ucpávání snižují prostorovou kapacitu a během běžného provozu způsobuje celkové překážky. Ztráty způsobené ucpáním velkého počtu nádrží jsou celosvětovým problémem. Malé vodní nádrže v horní části povodí se velmi snadno ucpávají a v důsledku toho jsou často během několika let vyřazeny z provozu. Jakékoli ucpání ve vodní nádrži má zásadní ekonomický dopad. Náklady na čištění toků a plavebních kanálů jsou obvykle velmi vysoké a značně zdražují plavební chod. Jedním z nejnebezpečnějších jsou bystřiny s transportem štěrku, který vedou do splavného toku. Sutinové proudy v horských oblastech, které jsou způsobeny přívalovými srážkami, představují nebezpečí pro technické stavby a města (Holý, 1978).

1.3.3 Transport chemických částic

V současné době půda přichází do styku s velkým množstvím chemicky odvozených sloučenin a mnoha organismy s různou toxicitou. Přeprava těchto látek znamená pro společnost velkou hrozbu. Chemikálie jsou do chodu uváděny velmi jednoduše, to jim umožňuje rychle cestovat a také procesy eroze probíhají v širokém měřítku. Tento jev ztěžuje navrhování účinných a nákladově efektivních protierozních opatření.

Chemikálie, které vstupují do povrchových a podzemních vod, významně ohrožují do-dávky vody (Holý, 1978).

Po ztrátě organické hmoty následuje ztráta základních živin, zejména dusíku a fosforu, v důsledku eroze (Janeček et al., 2008). Eutrofizace mnoha vodních nádrží, zejména rybníků, je způsobena vysokým obsahem dusíku v kombinaci s fosforem, což snižuje jejich rekreační a jiné využití (Holý, 1978). Na 1 tunu organické hmoty ztra-cené v důsledku eroze ztratí půda asi 60 kilogramů dusíku, nebo díky smyvu jednoho centimetru půdy na 1 hektar se ztratí 300 kilogramů dusíku (Janeček et al., 2008).

Nejdůležitějšími původcem těchto látek jsou průmyslová hnojiva a různé druhy pesticidů používaných ve velkém množství v zemědělské výrobě, jakožto i různé druhy zemědělského odpadu a průmyslového odpadu ukládaného na půdu nebo v půdě. Chemické látky jsou primárně transportovány vodou a větrem z místa jejich umístění nebo použití (Holý, 1978). I když jsou herbicidy aplikovány ve správných dávkách, má úbytek organické hmoty zásadní dopad na účinnost herbicidů, které často poškozují plodiny na půdách, kde došlo k erozi, a tím je obsah organických látek nižší (Janeček et al., 2008).

1.4 Prostředky proti erozi

Zemědělská půda na svazích vyžaduje nutnou ochranu před vodní erozí, čehož lze do-sáhnout použitím pečlivě zvolených protierozních prostředků. Konkrétní metody ochrany jsou vybírány na základě jejich účinnosti, potřeby minimalizovat smyv z půdy a potřeby zachování nutné ochrany, jako jsou zásoby vody, potoky, nádrže a intravi-lány měst a obcí, prostřednictvím společného vnímání vlastníků půdy a zájmy uživa-telů půdy o ochranu životního prostředí a ztvárnění krajiny (Janeček et al., 2008).

Při plánování protierozních prostředků využíváme hydrologické hodnocení celého povodí, od stávajícího rozložení pozemku a jeho využití, jakožto i odhad aktuálního

smyvu půdy. Pokud naměřený smyv na daném pozemku překročí tolerované smývání půdy, jsou navržena protierozní opatření (Toman, 1995).

Většinou se jedná o směs provozních, agrotechnických a technologických opatření, které se oboustranně doplňují při současném respektování základních požadavků a schopností zemědělské výroby. V procesu výběru protierozních opatření se rovněž zohledňují náklady na implementaci a veškerá příslušná legislativa tzn. právní předpisy (Podhrázská, Dufková, 2005).

1.4.1 Organizační

Podstatou organizačních protierozních prostředků je umístění pozemků na delší straně ve směru vrstevnic, výběr vhodné velikosti a tvaru pozemku a vymezení pozemků vhodných pro změnu typů pozemků (Janeček et al., 2007).

Organizační zásahy na orné půdě jsou v projektech komplexní pozemkové úpravy navrhovány v kombinaci s dalšími protierozními prostředky a předpokládají silnou koordinaci a účast hospodářských subjektů (Janeček et al., 2008).

Plodiny se člení do skupin na základě stupně ochrany půdy před vodní erozí:

- plodiny se silným protierozním účinkem po celé vegetační období – jeteloviny, travní porosty, jetelotrávy,
- plodiny s příznivými protierozními vlastnostmi převážnou část vegetačního období – meziplodiny, obilniny, luskoviny,
- plodiny s nevyhovujícími protierozními účinky převážnou část vegetačního období – cukrovka, kukuřice, brambory (Dumbrovský, Mezera, Střítecký, 2004).

Teorie ochrany proti erozi organizačními zásahy závisí na porozumění příčinám procesů eroze a norma jejich rozvoje. Protierozní podstata:

- plodiny vysazující se ve správný čas,
- výsev víceleté pícniny do krycí plodiny, přesun podmínky do období, kdy jsou přívalové deště méně pravděpodobné tzn. září,
- začleňování bezkrevně seté meziploidy,
- rozložení plodin dle ohrožení pozemku (Janeček et al., 2007).

Vymezení hranic pozemků, zatravněním a zalesněním:

Vymezení hranic pozemků je popsáno jako prostorová a funkční optimalizace pozemků používaná k rozvoji konkrétních kultur. Představuje rozdělení zemědělského půdního fondu na ornou půdu, zahrady, louky, pastviny, vinice, ovocné sady a chmelnice (Janeček et al., 2007).

Plošné zalesňování nebo obranné lesní pásy jsou nejběžnějšími typy ochranného zalesňování. Husté smíšené lesy, které se vyznačují bohatým bylinným patrem, jenž je pokryto hustou vrstvou vytvořenou hrabankou, nabízejí vysoce účinnou protierozní ochranu půdy (Janeček et al., 2007).

Forma a rozloha pozemku:

Požadovaná velikost pozemku je dána řadou faktorů a v některých situacích je výsledkem rovnováhy mezi dvěma konkurenčně působícími faktory, přírodními faktory, které upřednostňují tvorbu menších půdních jednotek, a ekonomickými faktory, které podporují rozvoj dostatečně velký pozemků.

Protierozní umístění plodin:

Tvorba a zrod povrchového odtoku, stejně jako protierozní odolnost půdy, jsou ovlivněny umístěním plodin. Kulture, které mají řadu dispozic pro pronikání vody do půdy, a tím pro průběh povrchového odtoku, posilují půdu individuálními podzemními skladbami, zlepšují fyzikální, chemické a ekologické vlastnosti půdy, zabraňují zbytečnému odpařování a ovlivňují proudění větru. Výsledkem je, že v oblasti náchylné k erozi by mělo být umístění plodin primárně určeno potřebou protierozní ochrany (Holý, 1978).

Janeček et al. (2007) tvrdí, že pěstování plodiny, která neuspokojivě chrání půdu před erozí (kukuřice, okopaniny, a další širokořádkové plodiny) na rovné nebo částečně svažité půdě, je základním konceptem, který zaručuje ochranu půdy před vodní erozí. Při běžném pěstování můžeme třídít plodiny od nejvyšší po nejnižší protierozní produktivitu např. travní porosty, ozimé obilniny, vojtěšky, jetel, jarních obilovin, okopanin (kukuřice, cukrovka, brambory), hrách, ozimá řepka.

Pásové střídání plodin:

Výsadba pásových plodin využívá erozně-ochranný účinek vegetace na půdu a její erozně příznivý účinek na vak do půdy smícháním pásů s plodinami, které nedostatečně chrání půdu před pásy chráněnými proti erozi jako obiloviny, okopaniny, a ochrannými pásy (travní porosty), které chrání pás plodin položený níže.

Ochranné pásy členíme do dvou skupin:

- vrstevnicové plodinové pásy, které poskytují ochranu proti vodní erozi,
- protideflační plodinové pásy, jenž chrání půdu proti větrné erozi (Holý, 1978).

Šířka pásů je dána úhlem a délkou svahu, propustností půdy, její náchylností k erozi a šířkou záběru stroje. Konkrétně se doporučuje šířka pásu 20 až 40 metrů, v závislosti na sklonu pozemku. Počet potřebných pásů je často určen délkou svahu, který je mnohdy nutno přerušit příkopy nebo průlehy (Janeček et al., 2008).

1.4.2 Agrotechnická

Nejvážnější jsou agrotechnické postupy, protože ovlivňují významnou část zemědělské půdy, včetně orné půdy a dlouhodobých kultur, jako ovocné sady, vinice a chmelnice. To představuje téměř 4/5 zemědělského půdního fondu to je 82 %, téměř 46 % představují plochy v oblastech se sklonem větším než 8 %. Vzhledem k tomu, že tyto oblasti byly po dlouhou dobu bez pokryvu vegetace, jsou náchylnější k erozi (Pasák et al., 1974).

Erozi s největší pravděpodobností podlehne půda, jenž nemá znaky vegetačního pokryvu. Agrotechnické kroky většinou závisí na zkrácení doby, po kterou je půda zbavena vegetačního pokryvu. Pro ochranu půdy proti erozi můžeme použít posklizňové zbytky plodin. Nejzranitelnější doba u vodní eroze je, když taje sníh, dále pak doba přívalových dešťů od června do srpna (Janeček et al., 2007).

Agrotechnická protierozní opatření se používají ke zvýšení schopnosti vsakování půdy, k navýšení protierozní odolnosti půdy a dále pak k zajištění ochrany jejího povrchu, zejména v obdobích přívalových dešťů, kdy jsou to zejména širokořádkové plodiny např. kukuřice, slunečnice, cukrová řepa, brambory atd. svou výškou a začleněním stále nedostatečně chrání půdu (Janeček et al., 2008).

Protierozní osevní postupy:

Osevní postupy jsou důležité z mnoha důvodů, včetně intenzifikace rostlinné produkce, produktivity půdy, uspořádání a hospodárnost zemědělských firem, jakož i ochranu půdy, zásobování vodou a krajiny (Kokolia a kol., 1989).

Protierozní osevní postupy představují umístování zemědělských kultur do honu tak, aby docházelo k pravidelnému střídání po řadu let. Obiloviny, píce, okopaniny a technické plodiny rotují v otáčení tak, že je udržována úrodnost půdy a zajišťována vysoká úroveň výnosů s ohledem na předplodinu. V našich podmínkách je zahrnována vhodná základní skladba polního osevního postupu tj. 45-50 % obilovin, 25-30 % okopanin a 25-30 % procent pícnin a luštěnin. Pokud je osevní postup řádně proveden, pomáhá chránit půdu před erozí. Osevní postupy však musí být zvoleny tak, aby se střídalo co nejvíce plodin s ochranným dopadem, který mají pícniny, zvláště pak trávy a vojtěška. Metody osevních postupů mají ochranný účinek, který je úměrný množstvím několikaletých pícnin. Plodiny okopaninového typu s nedostatečným obranným efektem zvyšuje erozní hrozbu pro ornou půdu (Janeček et al., 2007). Osevní postupy, zejména pak jejich vyřešení jsou obtížný a náročný plán, který vyžaduje souhrnný přístup, který zohledňuje jak ekonomické, tak environmentální aspekty (Kokolia et al., 1989).

Ochranné obdělávání půdy:

Ochranné obdělávání půdy je forma pěstování plodin udržující nejméně 30 % rostlinných zbytků na povrchu půdy, a to ve snaze snížit erozi. Hlavně se jedná o redukovanou kultivaci, která snižuje sloučením, počet operací během ochrany povrchu půdy prostřednictvím rostlinných zbytků. Takový systém ochrany půdy chrání povrch půdy před erozí díky zapojení porostu pěstovaných plodin nebo ponecháním posklizňových zbytků. Půda se spíše nakypří, nežli orá. Bezorebná kultivace zapravuje posklizňové zbytky, které se do půdy absorbují jen částečně, než se stanou povrchovým mulčem (Janeček et al., 2008).

1.4.3 Technická

Neexistuje jasný rozdíl mezi agrotechnickými, biologickými a technickými opatřeními, místo toho jsou často sloučeny do funkčního souboru. Za technická se zpravidla

označují opatření, která kromě agrotechnických a biologických zásahů vyžadují i technické zásahy zahrnující větší úpravy půdního povrchu, např. vytváření průleहů, příkopů, hrázek, teras atd. (Holý, 1978). Podle Tomana (1995) se tato opatření používají, když nelze dosáhnout přípustné půdní ztráty, pomocí organizačních opatření nebo když je výhodnějšího řešení dosaženo díky technologickým opatřením. Jelikož se ale jedná o jedno z nejdražších protierozních opatření, musí být rozsah těchto opatření zredukován.

Technická protierozní opatření fungují na dvou jednoduchých morfologických faktorech (sklon a délka svahu), aby se snížila účinnost erozních procesů a vytvořila se možnost přeměny povrchového odtoku na odtoku podzemní. Tato opatření musí být doplněna technickými opatřeními kvůli, struktuře povodí, jako jsou úprava toků, budování komunikační sítě, zavlažovací systémy aj. (Holý., 1978).

Tato opatření se běžně používají k vyrovnání příčných nerovností krajiny, ke zmenšení podélného sklonu na silně svažitéch pozemcích, k ochraně proti „cizí“ vodě, jenž teče z lesních porostů a ke zpomalení odtoku z povrchu půdy. Do první skupiny opatření zahrnujeme zemní úpravy např. terénní urovnání, terasy, meze atd., zatímco druhá skupina zahrnuje hydrotechnické prvky jako jsou příkopy, nádrže, ochranné hráčky atd. (Janeček et al., 2008).

Technická opatření dělíme na:

- zasakovací pásy,
- terasování,
- protierozní příkopy,
- protierozní meze,
- protierozní průlehy,
- protierozní nádrže (Dumbrovský, Mezera, Strítecký, 2004).

Terasy:

Jedná se o jednu z metod ochrany před vysoce svažitými pozemky se sklonem více než 20 % na hlubokých až velice hlubokých půdách. Terasy také umožňují zemědělské využití velmi svažitých pozemků, zejména pro pěstování speciálních trvalých kultur jako jsou ovocné sady a vinice. Terasy by měly být stavěny tak, aby tvořili formy,

které nejvhodněji vyhovují pozemkům, byly snadno přístupné a umožňovaly účinnou kontrolu vodohospodářských poměrů (Janeček et al., 2007).

Stupňovité terasy se často používají k úpravě svahů s velkým sklonem na hlubokých půdách, zpravidla větším sklonem než 15 %, na mírně svažité až vodorovné terase, přerušují, zadržují nebo odvádějí povrchově stékající vodu. Forma a výška stupňovitých teras je dána sklonem pozemku a na jeho obhospodařování (Holý, 1978).

Je důležité si uvědomit, že vzhledem k technologické a ekonomické složitosti se tento způsob nyní v naší zemi v zásadě nenavrhuje a neprovádí. Existují však problémy s vlastnictvím pozemků v terasovaném území, stejně jako špatný technický stav teras, mezi něž patří zborcené svahy, plevele a další problémy (Janeček et al., 2007).

Příkopy:

Protierozní příkopy se navrhují na pozemcích jako jednotlivé komponenty nebo jako soustava tzn. jako otevřené, nezpevněné nebo vyztužené s diagonálním profilem tvaru lichoběžníku (Janeček et al., 2008).

Jsou navrženy tak, aby zachytávaly a účinně odváděly povrchově stékající vodu v oblastech se sklonem větším než 20 %, jsou navrhovány v území značně ohroženém erozí, avšak umožňují vodě dostat se do půdy. Podle účelu se dělí na záchytné, drenážní a infiltrační příkopy (Holý, 1978).

Navrhované příkopy by měly být schopné odklonit navrhovaný vrcholný průtok s deseti letou pravděpodobností výskytu. Jsou také rozděleny na svodné příkopy, záchytné a sběrné (Toman, 1995).

Podle funkčního hlediska jsou navrhovány následujícími způsoby:

- záchytné (obvodové), které slouží k ochraně pozemků před přítokem vnějších vod,
- sběrné, sloužící k zachycení vnitřních vod, běžně omezující souvislé délky povrchového odtoku,
- svodné, jenž slouží k zajištění neškodného odtoku do recipientu (Janeček et al., 2008).

Průlehy:

Stejně jako příkopy, mají průlehy podobnou funkci. Mohou být nezpevněné, kultivované jako orná půda, nebo např. zpevněné osetím. Účinné jsou se sklonem krajiny 5-15 %, ale mohou navrženy až do 18 %. Jsou navrženy jako sběrné i svodné (Toman, 1995).

Ochrana, kterou nabízejí kultivované průlehy, tkví ve vybudování rozsáhlé sítě mělkých příkopů – průlehub, které zachycují povrchově stékající vodu. Voda prosakuje do půdy v průlezech bez podélného sklonu, ale u průlehub s podélným sklonem je voda odváděna vedle ohroženého území (Holý, 1978).

Průlehy jsou jedním z nejdůležitějších protierozních opatření, protože jsou navrženy tak, aby absorbovaly, infiltrovaly a odváděly krátkodobý povrchový odtok vyvolaný přívalovými dešti nebo náhlým jarním táním. Jsou mělké, obvykle se skládají pouze z vegetací zpevněných, širokých příkopů, které mají mírný sklon (1:5 až 1:10). Z funkčního hlediska jsou průlehy navrhovány jako:

- záchytné, které slouží k ochraně pozemků před cizí vodou,
- sběrné
vsakovací (s nulovým či malým podélným sklonem a jsou vhodné jen pro půdy propustné)
odváděcí (odvádějí vodu z pozemků do svodných průlehub),
- svodné, jenž jsou většinou v podobě zatravněných drah soustředěného povrchového odtoku (Janeček et al., 2008).

Protierozní nádrže:

Jedná se o jedno z neúčinnějších opatření řízení odtoku vody a zachycování náplavy, respektive transportované splaveniny. Záchytný prostor by měl být dostatečně velký, aby pojala objem vody, které bude odtékat z přívalových dešťů nebo z jarního tání, v intervalu 50 let. Užitečné mohou být také suché nádrže, které se plní pouze při zvýšení odtoku (Toman, 1995).

Protierozní role nádrží je primárně určena jejich polohovým umístěním, hlavní dopad mají nádrže na technické uspořádání, provoz a údržbu nádrží. Užitečné je, zakládat nádrže v soustavách, což umožní úplné zvládnutí erozně nebezpečného odtoku v povodí. Nádrže situované v nejvyšších oblastech povodí, kde se začíná hromadit

povrchový odtok, představují riziko zrodu intenzivních projevů výmolové eroze, pohlcují srážkové přívaly a jarní sněhovou vodu a díky svému retenčnímu účinku umožňují odtok vody, který není škodlivý do nádrží umístěných v nižších polohách, jejich primární účely jsou akumulární a hospodářské (Holý, 1978).

Záchytný prostor musí být dostatečně velký, aby zachytil množství vody odtékající z návrhového přívalevého deště nebo z jarního tání v intervalu 50 let, aby se maximalizovala účinnost zachycování splavenin. Po sedimentaci splavenin odtéká z nádrží poměrně čistá voda, která již neobsahuje nerozpuštěné látky. Na základě tohoto kritéria je také možné stavět tyto nádrže pouze v malých povodích (Janeček et al., 2008).

2 Cíl práce

Tato práce má za cíl vyhledat a porovnat metody výpočtu vodní eroze. V práci budou posuzovány metody, které se používají v současnosti ale také metody, které se používali dříve. Metody budou testovány samostatně na modelové části povodí. Z hlediska výpočtů jsou erozní modely rozděleny do dvou skupin, a to empirické erozní modely a simulační erozní modely.

3 Metodika

K úplnému vypracování hlavní metodiky byly vybrány dva postupy výpočtu:

- Univerzální rovnice pro výpočet průměrného ročního odnosu zeminy – USLE
- Revidovaná rovnice pro výpočet ztráty půdy – RUSLE
- Ještě byli zvoleny tři prototypy okamžitého odnosu zeminy, pomocí CN křivek a jeden model počítající pomocí GIS
- Dále byla popsána metoda čísel odtokových křivek CN, kterou některé vybrané prototypy používají

3.1 Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zeminy

3.1.1 Metoda USLE – univerzální rovnice pro výpočet průměrné dlouhodobé ztráty půdy

Vztah odvozený Zingem (1940) je považován za první empirický model erozního procesu, podle rozsáhlého výzkumu vlivu délky svahu a sklonu, jsme schopni odhadnout průměrné roční ztráty půdy vodní erozí:

$$G = C \cdot S^{1,4} \cdot L^{0,6}, \quad (3.1)$$

Jednotlivé prvky vyjadřují: G – průměrná roční ztráta

S – sklon svahu

L – délka svahu

C – konstanta, která zahrnuje ostatní faktory ovlivňující

erozi

Následující předpoklady síly vodní eroze jsou zaměřeny na historický vývoj predikčních postupů ve Spojených státech, které vyplívají z pokroku teorie vodní eroze, která byla založena na dlouhodobých terénních a laboratorních studiích eroze.

O rok později rozšířil Smith (1941) Zinggovu rovnici:

$$G = C \cdot S^{7/5} \cdot L^{3/5} \cdot P, \quad (3.2)$$

Jednotlivé prvky vyjadřují: P – faktor protierozních opatření
C – faktor, jenž zahrnuje vliv klimatu, půdy a vegetačního pokryvu
S – sklon svahu
L – délka svahu (Janeček et al., 2008).

R. K. Frevert vyvinul empirický model pro stát Iowa ve Spojených státech, který se liší od vztahu v tom, že zahrnuje širší proces erozních faktorů. Tímto způsobem je rozšířena takzvaná Frevertova rovnice:

$$G = 10 \cdot (K' \cdot O' \cdot L' \cdot S' \cdot C' \cdot P'), \quad (3.3)$$

Jednotlivé prvky vyjadřují: G – průměrná roční ztráta půdy
K' – faktor erodovatelnosti půdy
O' – faktor geologického podkladu
L' – faktor délky svahu
S' – sklon svahu
C' – faktor vegetačního pokryvu
P' – faktor druhu protierozních opatření
10 – součinitel, který vyjadřuje vliv klimatu (srážek) na proces vodní eroze (Holý, 1978).

V roce 1946 vytvořilo SCS výzkumné shromáždění pod dohledem Musgravi a konečným produktem týmu byla „Musgravova rovnice“ v podobě:

$$G = K \cdot C \cdot S^{1,35} \cdot L^{0,35} \cdot R_{30}^{1,75}, \quad (3.4)$$

Jednotlivé prvky vyjadřují: G – roční ztráta půdy v palcích
K – faktor erodovatelnosti půdy
C – faktor účinku vegetačního krytu
S – sklon svahu v %
L – délka svahu

R – úhrn 30 min. deště s periodicitou $p=0,5$ (Musgrave, 1947).

Další rok byla vytvořena rovnice, sloužící pro odhad velikosti ztrát půdy ve státě Missouri:

$$G = A.S.L.K.P, \quad (3.5)$$

Jednotlivé prvky vyjadřují: A – průměrná roční ztráta půdy na pozemku se sklonem 3 %, délkou 27,43 m s jílovitohlinitými půdami

S – faktor sklonu

L – faktor délky

K – faktor druhu půdy

P – faktor protierozních opatření

Zadrazil (1965) aktualizoval Frevertovu rovnici a přidal účinek organického hnojení k určení rizika eroze a ekonomického dopadu protierozních opatření v našich podmínkách:

$$X = 0,63.G.P.S.D.H.O.PO, \quad (3.6)$$

Jednotlivé prvky vyjadřují: X – průměrná ztráta půdy v mm za rok

G – součinitel geologického podkladu

P – koeficient sklonu pozemku

S – koeficient sklonu pozemku

D – součinitel nepřerušené délky pozemku svahu

H – součinitel hnojení

O – koeficient osevního postupu

PO – koeficient druhu protierozní ochrany

Doposud nejlépe vyjadřuje kvantitativní dopad klíčových faktorů ovlivňujících vodní erozi způsobenou přivalovými dešti, tzv. univerzální rovnice pro výpočet průměrné dlouhodobé ztráty půdy erozí z pozemků podle Wischmeiera, Smithe (1978):

$$G = R.K.L.S.C.P, \quad (3.7)$$

Jednotlivé faktory vyjadřují: G – průměrná dlouhodobá ztráta půdy ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$)
R – faktor erozní účinnosti deště, vyjádřený v závislosti na četnosti výskytu, úhrnu, intenzitě kinetické energie deště
K – faktor erodovatelnosti půdy, vyjádřený v závislosti na textuře a struktuře ornice, obsahu organické hmoty a propustnosti
L – faktor délky svahu, vyjadřující vliv nepřerušené délky svahu na velikost ztráty půdy erozí
S – faktor sklonu svahu vyjadřující vliv sklonu svahu na velikost ztráty půdy erozí
C – faktor ochranného vlivu vegetačního pokryvu vyjádřený v závislosti na vývoji vegetace a použité agrotechnice
P – faktor účinnosti protierozních opatření (Hovorka et al., 1990).

Analýza samostatných faktorů:

Faktor R-erozní účinnost

Podle Skleničky (2003) a Janečka a kol. (2008), kteří ve svých publikacích tvrdí, že faktor erozní účinnosti deště ($MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot H^{-1}$) tvoří násobek celkové kinetické energie deště – E ($J \cdot m^2$) a maximální 30-ti minutové intenzity deště i_{30} ($cm \cdot h^{-1}$).

Erozní účinnost dešťových srážek je největší na začátku erozního procesu, kdy kapky deště dopadají na povrch půdy a vrstva povrchově odtékající vody ještě nebyla vytvořena.

Na základě velkého množství údajů o srážkách shromážděných ve Spojených státech byl stanoven následující vztah pro faktor erozní účinnosti deště R:

$$R = E \cdot i_{30} / 100, \quad (3.8)$$

Jednotlivé faktory vyjadřují: R – faktor erozní účinnosti deště ($\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)

E – celková kinetická energie deště ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)

I_{30} – maximální 30-ti minutová intenzita deště ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Souhrnná kinetická energie deště E je vyjádřena:

$$E = \sum E_i, \quad (3.9)$$

Jednotlivé faktory vyjadřují: E_i – kinetická energie i -tého úseku deště

N – počet úseků deště

$$E_i = (206 + 87 \log i_{si}) \cdot H_{si}, \quad (3.10)$$

Jednotlivé faktory vyjadřují: i_{si} – intenzita deště i -tého úseku ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)

H_{si} – úhrn deště v i -tém úseku (cm) (Janeček et al., 2008).

Faktor K – erodovatelnost půdy

Následující faktor vyjadřuje erodovatelnost nebo dispozici půdy k erozi. Jeho hodnota je určena zrnitostním složením půdy, organických částech, struktuře a propustnosti.

Vlastnosti půdy ovlivňují infiltrační potenciál půdy, stejně jako odolnost povrchu půdy a půdních částic vůči destruktivnímu účinku dopadajících dešťových kapek a transportu prostřednictvím povrchového odtoku. Faktor erodovatelnosti půdy, známý také jako náchylnost půdy k erozi, se vypočítá pomocí obecné rovnice jako odnos půdy v $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ na jednotku dešťového faktoru R z běžného pozemku 22,13 m (na svahu se sklonem 9 %), který se pěstuje jako kypřený černý úhor kultivací ve směru svahu. Faktor K lze vypočítat pomocí vztahu, pokud obsah prachu v práškového písku (0,002-0,1 mm) v půdě nepřesahuje 70 % může být tedy vypočítán podle tohoto vztahu:

$$100K = 2,75 M 1,14 10^{-4} / 12 - a / + 3,25 / b - 2 / + 2,5 / c - 3 \quad (3.11)$$

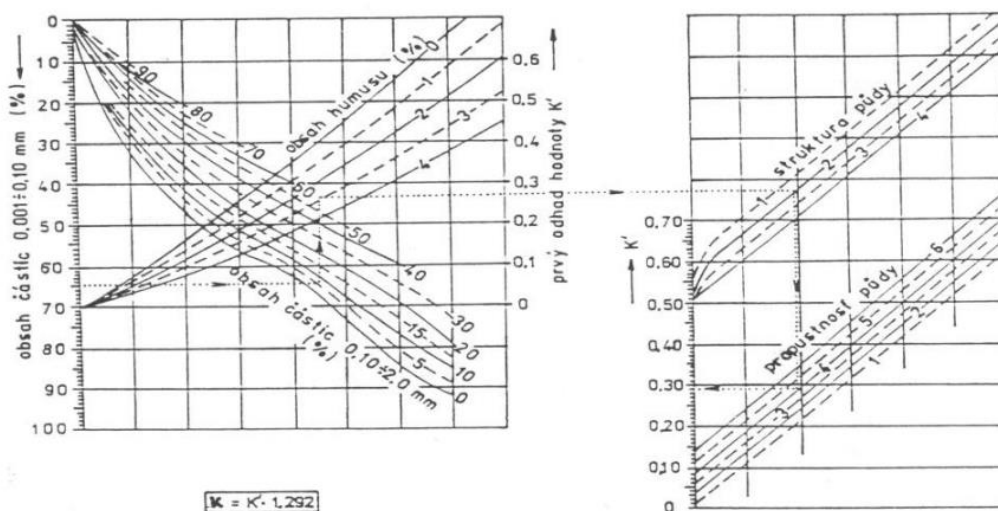
Jednotlivé faktory vyjadřují: M – (% prachu + práškového písku) × (100 - % jílu) (% prachu + % práškového písku = částice 0,002 + 0,1 mm, % jílu = částice < 0,002 mm)

a – % organické hmoty

b – třída struktury ornice

c – třída propustnosti půdního profilu

NOMOGRAM PRO STANOVENÍ HODNOTY FAKTORU K



VYSVĚTLIVKY

STRUKTURA PŮDY:

- 1 - zrnitá
- 2 - drobtovitá
- 3 - hrudkovitá
- 4 - deskovitá, slitá

PROPUSTNOST PŮDY:

- 6 - < 0,15 cm / hod
- 5 - 0,15 - 0,5 cm / hod
- 4 - 0,5 - 1,5 cm / hod
- 3 - 1,5 - 5,0 cm / hod
- 2 - 5,0 - 15,0 cm / hod
- 1 - > 15,0 cm / hod

PŘÍKLAD:

- OBSAH ČÁSTIC 0,001 - 0,10 mm : 65% / OBSAH HUMUSU: 3%
- OBSAH ČÁSTIC 0,10 - 2,0 mm : 5% / STRUKTURA: DROBTOVITÁ
- PROPUSTNOST PŮDY: 1,0 cm / hod

$$K = 0,29 \cdot 1,292 = 0,37 \text{ t / ha}$$

Obrázek 3.1: Nomogram pro stanovení hodnoty K (FSV ČVUT, 2004)

Faktor L – délka svahu

Formulace specifikuje jednotku délky pozemku 22,13 metrů a sklon 9 %. Faktor délky svahu se vypočítá pomocí následující rovnice.

$$L = (\lambda/22,13)^m, \quad (3.12)$$

Jednotlivé faktory vyjadřují: 22,13 – délka normovaného pozemku (m),
 λ – horizontální zobrazení nepřerušené délky svahu,
 m – exponent délky svahu, vyjadřuje odolnost svahu
proti tvorbě rýžkové eroze. (Kinnell, 2001).

Faktor S – sklon svahu

S narůstajícím sklonem svahu se zvyšuje ztráta půdy. Za pomoci dvou vztahů se stanovuje hodnota tohoto faktoru:

$$\begin{aligned} S &= 10,8 \sin s + 0,03 \text{ pro } s < 9\% \\ S &= 16,8 \sin s - 0,50 \text{ pro } s > 9\%, \end{aligned} \quad (3.13)$$

Sklon lze rozdělit na 10 stejně dlouhých segmentů a faktor sklonu S určit jako průměr faktoru S nebo K dílčích úseků, k formulaci vlivu proměnného sklonu svahu nebo vlivu změn vlastností půdy (K) na svahu na ztrátu půdy erozí. U nepravidelně vytvořených svahů se výsledná hodnota faktoru sklonu S vypočítá pomocí stupnic od nejvyšší S1 po nejnižší S10, a to následovně:

$$\begin{aligned} S &= 0,03.S + 0,06.S2 + 0,07.S3 + 0,09.S4 + 0,10.S5 + 0,11.S6 + \\ &0,12.S7 + 0,13.S8 + 0,14.S9 + 0,15.S10, \end{aligned} \quad (3.14)$$

Kde: S – hodnota faktoru i-tý úsek svahu, rozděleného na 10 stejně dlouhých úseků

Faktor C – ochranného vlivu vegetace

Ochranný vliv vegetace je úměrný pokrytí a hustotě porostu v období, kdy se s největší pravděpodobností vyskytnou přívalové deště (duben - září). Výsledkem je, že porosty trav a jetelovin mají vynikající protierozní ochranu, zatímco běžně pěstované širokořádkové plodiny (okopaniny, vinice, sady a kukuřice) nikoliv. Pro zajištění protierozní ochrany pozemků a vyhodnocení dlouhodobého rizika eroze se vypočítá faktor C pro každou plodinu pěstovanou po sobě, včetně doby mezi střídáním plodin, a zohledňuje se nástup a způsob agrotechnických prací v pěti konkrétních obdobích:

1. období – podmítka a hrubá brázda,
2. období – příprava pozemku k setí do 1 měsíce po zasetí,

3. období – po dobu druhého období měsíce od jarního nebo letního setí či sázení, u ozimu do 30.4.,
4. období – do konce předchozího období sklizně,
5. období – strniště (Wischmeier a Smith, 1978).

Faktor P – účinnosti protierozního opatření

V případě že, jsou na pozemku svahu použity protierozní opatření, jako je hrázkování, terasování, vrstevnicové obdělávání, pásové střídání plodin, je jejich účinek zohledněn ve výpočtech. Při přímých řádkách libovolného směru volíme do výpočtu číslo 1 (Agroprojekt, 1987).

Tabulka 3.1: Stanovení přípustné ztráty půdy vodní erozí (Janeček a kol., 2012)

Stanovení přípustné ztráty půdy vodní erozí	
Hloubka půdy (cm)	G_p (t. ha⁻¹. rok⁻¹)
mělká < 30	1
hluboká > 30	4

Pokud vypočtená průměrná ztráta půdy překročí přípustnou ztrátu, musí být pozemku zajištěna protierozní ochrana (Sklenička, 2003).

3.1.2 Metoda RUSLE – revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy

Tato metoda byla v 90. letech revidována a upravena na základě zkušeností s použitím tzv. Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE). V důsledku těchto revizí byly přepočítány jednotlivé proměnné rovnice a tato rovnice se stala „Revidovanou univerzální rovnicí ztráty půdy“ (RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation). RUSLE, podobně jako USLE, používá k odhadu dlouhodobého průměrného ročního úbytku půdy vodní erozí ze zemědělsky využívaných pozemků nacházející se ve specifické klimatické oblasti, se specifickým typem půdy, o určitém sklonu a délce svahu a specifickým systémem pěstování plodin, obdělávání půdy a uplatňování protierozních opatření. Může být však použita v nezemědělských oblastech, jako jsou staveniště (Janeček et al., 2008).

Universal Soil Loss Equation (USLE) je v současnosti nejběžnějším a nejpoužívanějším modelem pro předpovídání rizika vodní eroze a přípravu iniciativ na ochranu půdy, a to díky své nízké datové složitosti a transparentní modelové struktuře. Služba ochrany půdy v USA přijala tento koncentrovaný empirický model eroze v roce 1958. První aktualizace přišla v roce 1978, kdy bylo několik modelů extrahováno z různých datových souborů získaných ze studií ve Spojených státech, násobky modelů byly poté odvozeny např. z Universal Soil Loss Equation-RUSLE nebo byly pozměněny Universal Soil Loss Equation-MUSLE, aby se zvýšila prediktivní schopnost USLE. Všechny tyto modely jsou založeny na empirických koeficientech, které musí být přesně ověřeny z terénních pozorování pro konkrétní situaci (typ plodiny, ochrana, klima atd.) (Raclot a Alberger, 2006).

Zhang et al. (2013) souhlasí s Raclotem a Albergerem a doplňuje, že Universal Soil Loss Equation (USLE) a revidovaná Universal Soil Loss Equation (RUSLE) jsou nyní nejpoužívanějšími rovnicemi pro odhad eroze půdy, navzdory významným nedostatkům a odvozením. To je způsobeno hlavně snadností použití rovnice a schopností předpovědět průměrnou dlouhodobou erozi na jednotkových plochách. Extrakce topografických faktorů na druhou stranu představuje zásadní problém, zvláště pak u délky svahu. Faktory LS určují, vliv topografie na erozi v USLE i RUSLE. L a S faktory rovnice jsou často kombinovány spolu „LS“. K jejich výpočtu se používá délka svahu a úhel sklonu svahu. Délka svahů odvozená z měření v terénu byla tradičně nejlepší odhad, i když není nutně dostupná nebo praktická. Za posledních 20 let však byly vyvinuty postupy, které umožňují použití geografického informačního systému (GIS) k produkci jak USLE, tak RUSLE, ověřením algoritmu použitého k modelování délky svahu potvrzuje, že na sbíhavém povodí dochází k vyšší erozi nebo rychlostní dispozici, stejně jako bylo stanoveno v USLE / RUSLE. To znamená, že při použití USLE nebo RUSLE na velké ploše pomocí GIS není faktor LS jednorozměrný.

RUSLE byla vytvořena na podkladech revize a aktualizace USLE a představuje posun v přístupu k hodnocení jednotlivých erozních faktorů:

Faktor R – byly revidovány a aktualizovány zavedené mapy isoerodent pro USA, dále upřesnění časového průběhu hodnot faktoru R v intervalu 15 dní a vymezení faktoru R v oblastech s mírnými sklony.

Faktor K – vymezení časového průběhu hodnoty faktoru erodovatelnosti půdy v důsledku zhutnění povrchu půdy a rozpadu půdních agregátů zásluhou vlivu srážek a

obhospodařování, kvůli objemovým změnám vyvolaných, zamrznáním a táním zařazení vlivu skeletu na povrch půdy a v půdní profil na propustnost půdy.

Faktor LS – uvedení nového vztahu pro vliv délky a sklonu svahu, který bere v úvahu poměr rýžkové a mezi rýžkové eroze, a specifikuje hodnoty sklonu svahu pro výpočet ztráty půdy.

Faktor C – specifikace faktoru, sloužícího k posouzení dopadu jednotlivých druhů zemědělských plodin a způsobů jejich pěstování na půdách, které nejsou využívány dále, pastviny, degradované lesy, oblasti povrchové těžby surovin, rekultivované oblasti a staveniště, počítaje zahrnutí vlivu předchozího využití půdy, pokryvu půdu a druhu vegetace, drsnosti půdního povrchu SLR (soil loss ratio) se vypočítají jako poměr ztráty půdy za současných hospodářských podmínek k ztrátám půdy za normálních podmínek (úhor):

$$SLR = PLU \cdot CC \cdot SC \cdot SR \cdot SM, \quad (3.15)$$

Jednotlivé faktory poměru ztrát:

SLR – určuje se pro každý interval, ve kterém je pravděpodobné, že dojde ke kontaktním podmínkám (max. 15 dní). Každé hodnotě je přidělena náležitá část z celkové účinnosti eroze deště (EI) pro daný časový rámec.

Prior land use subfactor (PLU) – vliv předchozích metod pěstování plodin a obdělávání. Je určena stabilizací půdního povrchu (např. obměna hutnosti povrchu podníceného orbou), hmotnosti povrchových zbytků rostlin (do 2,5 cm), odumřelých a živých kořenů.

Canopy cover subfactor (CC) – vegetační kryt, který není v kontaktu s půdou, chrání povrch půdy. Ztvárňuje, jak efektivní je vegetace při minimalizaci energie kapek, které dopadají na povrch půdy. Jeho velikost je určena procentem pokrytí a výškou pádu kapek.

Surface over subfactor (SC) – zobrazuje účinnost ochrany povrchového krytu, jenž je bezprostředně ve styku s půdním povrchem (kameny, zbytky rostlin atd.) na snížení transportní kapacity povrchově odtékající vody, usazování a redukci plochy na jenž dopadají dešťové kapky. Ve vztahu určení hodnot SLR je tento faktor nejdůležitější.

Surface roughness subfactor (SR) – drsnosti povrchu půdy, které jsou způsobeny agrotechnickými intervencemi.

Soil moisture subfactor (SM) – působení vlhkosti půdy (Janeček et al., 2008).

3.2 Metody výpočtu okamžitého odnosu zemin

V dnešní době je snaha nahrazovat empirický základ členění velikosti erozních procesů, kvalitativně vyššími metodami, hlavně kvůli současné úrovni znalostí v odvětvích, které zkoumají vztahy vyvolávající erozi, rozvojem výpočetní techniky např. GIS, hlavně změnami v preferencích ochrany proti erozi. Erozi je potřeba vnímat nejenom ve vztahu k ochraně půdy, ale i k dalším ekologickým dopadům.

Právě proto vznikají simulační modely erozních procesů, jenž se zabírají erozními jevy na bázi fyzikálních popisů dílčích procesů. Bylo vytvořeno několik modelů pro modelování eroze, mnohé nejsou nijak doložené, a právě proto je zde vybráno jen několik těchto modelů.

3.2.1 Model SWRRB – Simulator for Water resources in Rural Basins

Tento model byl vytvořen za účelem simulace hydrologických procesů a transportu splavenin v zemědělských povodích do velikosti 100 km² bez použití přímých pozorování a také za účelem posouzení vlivu změny systému hospodaření na tyto procesy. Pokud jde o hydrologickou část, tak ta se opírá o hodnoty denního srážkového úhrnu, metoda čísel odtokových křivek CN se používá pro stanovení charakteristik povrchového odtoku. Princip Univerzální rovnice ztráty půdy se používá u erozní části (Podhrázská a Dufková, 2005).

3.2.2 Model AGNPS – Agricultural NonPoint Source

V povodí 200 km² model AGNP specifikuje řešení eroze, transport chemicky odvozených sloučenin a odtok dílčích srážek. Čísla odtokových křivek CN jsou použity v hydrologické části modelu, zatímco v rovině eroze je použita Univerzální rovnice ztráty půdy (Podhrázská a Dufková, 2005).

Podle Merritta et al. (2003) byl model vyvinut za účelem předpovědi a vyhodnocení kvality vody odtékající zemědělských oblastí. Může být použit na plochách o velikosti 200 000 hektarů a v minulosti byl používán i na větších plochách. S nástupem a rozšířením GIS softwaru se model začal nepřetržitě používat jako AnnAGNPS. Model rozděluje sledovanou oblast na čtvercovou síť velikostí od 0,4 do 16 hektarů, které slouží jako nezávislé plochy, na nichž jsou modelovány erozní, odtokové i transportní procesy. Vstupy sousedních čtverců jsou zahrnuty do výsledků daného čtverce.

3.2.3 Model SWAT – Soil and Water Assessment Tool

Jedná se o hydrologický model, který byl vyvinut v USDA Agricultural Research Service. SWAT je zčásti distribuován spolu s GIS, který určuje povodí a říční síť za pomoci Digital Elevation Model (DEM) a vypočítává denní vodní bilanci na základě typu půdy, sklonu a počasí. Tento model byl vyvinut pro velká a složitá povodí. Model SWAT je díky své jednoduchosti běžně používaným nástrojem vědeckou komunitou, která ho používá na rozhodnutí v oblasti řízení půdy, toku potoka a jakosti vody, hydrologického rozboru, studie o vlivu změny klimatu, hodnocení zatížení kontaminující látky aj. Pro výpočet orografické srážky využívá model SWAT výškového pásma. Přidáním stálého množství zaznamenaných srážek ve srážkoměru se odhadují denní srážky ve výškových pásmech (Galván et al., 2014).

3.2.4 Model EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator

Cílem tohoto modelu je určit vliv erozních procesů (ztráty půdy) na změnu půdních vlastností a na úrodnost. Model detailně simuluje rozvoj plodiny za různých hydrologických a klimatických podmínek, stejně jako probíhající erozní procesech, včetně režimu dusíku a fosforu (EPIC-WQ), pesticidů (EPIC-PST) a schématu podzemní drenáže (EPIC-WT). Prvkem plochy a lokalizovaného odtoku charakterizuje zkoumanou oblast. Model je určen pro srovnatelné plochy do přibližně 1 ha. Hydrologická část závisí na denních hodnotách úhrnu srážek a slouží ke stanovení charakteristik povrchového odtoku pomocí metody čísel odtokových křivek CN, různé variace Univerzální rovnice ztráty půdy jsou použity pro erozní část. Model EPIC je jediný, který zohledňuje vliv větrné eroze na úrodnost půdy (Podhrázská a Dufková, 2005).

3.2.5 Metoda čísel odtokových křivek (CN)

Metoda čísel odtokových křivek (CN) byla vyvinuta pro Služby na ochranu půdy (SCS) ve Spojených státech a je jednoduchým srážkoodtokovým modelem srážek s relativně snadno zjistitelnými vstupy, zároveň je tento model přijatelně přesný, dá se použít k určení objemu přímého odtoku a také kulminačního průtoku zapříčiněného návrhovým přívalovým deštěm o vybrané pravděpodobnosti výskytu v zemědělsky používaných povodí, nebo částech tohoto území do 10 km².

Ve skutečnosti mohou být odtokové křivky použity ve spojení s ČSN 75 1300 „Hydrologické údaje povrchových vod“ pro konstrukci technických protierozních opatření, jako jsou dráhy koncentrovaného povrchové odtoku např. zatravněné údolnice, průlehy, příkopy a ochranné hrázky, stejně jako k určení účinků protierozních opatření na povrchový odtok.

Povrchový odtok a hypodermický odtok je zahrnut v přímém odtoku. Pomocí takzvaných čísel odtokových křivek – CN se stanovují části typu odtoku na celkovém odtoku. Když je hodnota CN větší, je pravděpodobnější, že jde o povrchový odtok. Dešťové srážky, infiltrace vody do půdy, půdní vlhkost, druh vegetační pokrývky, nepropust ploch a retence povrchu je všeobecně ovlivněna odtokem vody (Janeček et al., 2007).

Úhrn srážek, za předpokladu stejného rozdělení po ploše povodí, je základním vstupem pro metody CN – křivek. Množství srážek je přetvářeno na množství odtoku za pomoci čísel odtokových křivek – CN. Jejich hodnoty jsou určovány hydrologickými vlastnostmi půdy, jako je infiltrace, obsah vody v půdě, vegetační pokryv, rozsah nepropustných ploch, retence neboli intercepce a povrchová akumulace (Janeček et al., 2008).

Čísla odtokových křivek jsou uvedeny v tabulce na základě hydrologických vlastností půd, které jsou klasifikovány do čtyř skupin A, B, C a D na základě minimálních rychlostí pronikání vody do půdy bez pokryvu po dlouhodobém sycení jako uplatnění využití půdy, vegetačního pokryvu, stylu obdělávání a užití protierozních opatření (Dumbrovský a Mezera, 2000).

4 Výsledky a diskuse

Povodí Švábovského potoka:

Potok se nachází v kraji Vysočina. Tento potok má délku 2 km a jeho rozvodnice je velká 7,2 km². Toto povodí je pramenitého typu, povodí vzniká poblíž vesnice Horní Ves. Ústí do vodoteče Jihlavy a je jejím pravým přítokem. Potok neprotéká přes žádné rybníky ani vodní nádrže. Je cca 20 m široký a vyznačuje se klidným tokem. Koryto toku je široké asi 20 m a poměrně čisté. V určitých místech se protíná s cestní sítí, což je vyřešeno kanalizací. V této rozvodnici se nachází polopřírodní oblasti a jsou zde zastoupeny jehličnaté, listnaté a smíšené lesy. Dále také orná půda, pastviny, louky a zemědělská půda. Cele toto povodí patří pod pobočku ČHMÚ Brno. Mapu vymezení povodí Švábovského potoka, můžeme vidět v příloze č. 1 a mapu vymezení zájmového území v příloze č. 2.

4.1 Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zemin

Rovnice podle Wischmeiera, Smithe 1978 – $G_1 = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$

R faktor: celkový součin kinetické energie deště s maximální 30 - minutovou intenzitou, u převážné části území je hodnota tohoto faktoru $R = 40$



Obrázek 4.1: Fotografie pozemku č.7

K faktor: určuje vlastnosti půdy, předpoklady ovlivňující hodnotu K faktoru rekapitulovány v nomogramu, v něm se K faktor odečítá. Alternativa, jak určit K faktor je za pomoci kódu KPP nebo BPEJ. Mapu pozemků a vybraných odtokových drah nalezneme v příloze č. 3. Na obrázku č. 4.1. můžeme vidět zvolený pozemek označený jako č. 7.

Tabulka 4.1: K faktor

Číslo odtokové dráhy	K faktor
1	0,49
2	0,16
3	0,26
4	0,48
5	0,33
6	0,33
7	0,49
8	0,49
9	0,33
10	0,49

L, S faktory: hodnoty těchto dvou faktorů byly určeny za pomoci tabulek. Pro určení L faktoru bylo za potřebí zjistit délku jednotlivých odtokových drah (zjištěno v programu ArcMap). Poté byl vypočítán sklon, podle vztahu:

$$\frac{\text{převýšení}}{\text{délka odtokové dráhy}} * 100$$

Výsledek faktoru byl zaokrouhlen na celá čísla. Podle sklonu I byla zjištěna hodnota S faktoru. Mapu sklonu reliéfu je zachycena v příloze č. 4, dále pak mapu směru odtoků najdeme v příloze č. 5.

Tabulka 4.2: Výpočet L, S faktorů

Číslo odtokové dráhy	Délka odtokové dráhy	L – dle tabulek	I (%)	S – dle tabulek
1	395	4,27	2	0,18
2	269	4,27	3	0,26
3	164	3,02	2	0,18
4	775	5,22	3	0,26
5	381	5,22	3	0,26
6	331	4,27	6	0,57
7	133	2,61	6	0,57
8	119	2,61	4	0,35
9	282	4,27	2	0,18
10	269	4,27	4	0,35

C faktor: k tomuto pozemku byl navržen 8-honný osevní postup, aby byla zjištěna hodnota C faktoru –

1. Jetel červený
2. Žito ozimé
3. Ranné brambory
4. Pšenice ozimá
5. Řepka ozimá
6. Pšenice ozimá
7. Krmná řepa
8. Oves s podsevem

Jetel červený $C_1 = 0,01730$

Období	Datum	R %	C	R.C
1.	6.8.-20.8.	1,1505	0,015	0,0173
				0,02

Žito ozimé $C_2 = 0,1413$

Období	Datum	R %	C	R.C
1.	20.8.-31.8.	0,1103	0,5	0,0552
2.	1.9.-15.10.	0,022	0,55	0,0121
3.	16.10.-30.4.	0,007	0,3	0,0021
4.	1.5.-15.8.	0,8155	0,05	0,0408
5.	16.8.-31.8.	0,1555	0,2	0,0311
				0,14

Brambory ranné $C_3 = 0,449$

Období	Datum	R %	C	R.C
1.	1.9.-31.3.	0,024	0,65	0,0156
2.	1.4.-15.5.	0,04	0,8	0,0320
3.	16.5.-30.6.	0,303	0,65	0,197
4.	1.7.-15.6.	0,5976	0,3	0,1793
5.	16.6.-31.8.	0,1555	0,7	0,1089
				0,45

Pšenice ozimá $C_4 = 0,1019$

Období	Datum	R %	C	R.C
1.	1.9.-15.9.	0,01	0,7	0,007
2.	16.9.-31.10.	0,014	0,75	0,0105
3.	1.11.-30.4.	0,005	0,5	0,0025
4.	1.5.-5.8.	0,7101	0,08	0,0568
5.	6.8.-15.8.	0,1003	0,25	0,0251
				0,10

Řepka ozimá $C_5 = 0,2612$

Období	Datum	R %	C	R.C
1.	16.8.-31.8.	0,1505	0,65	0,0978
2.	1.9.-31.9.	0,002	0,7	0,0014
3.	1.10.-30.4.	0,009	0,45	0,0041
4.	1.5.-15.7.	0,499	0,08	0,0399
5.	16.7.-31.8.	0,472	0,25	0,118
				0,26

Pšenice ozimá $C_6 = 0,1227$

Období	Datum	R %	C	R.C
1.	1.9.-15.11.	0,01	0,65	0,0065
2.	16.9.-31.10.	0,014	0,7	0,0098
3.	1.11.-30.4.	0,005	0,45	0,0023
4.	1.5.-15.8.	0,8155	0,08	0,0652
5.	16.8.-31.8.	0,1555	0,25	0,0389
				0,12

Krmná řepa $C_7 = 0,4425$

Období	Datum	R %	C	R.C
1.	1.9.-31.3.	0,024	0,65	0,0156
2.	1.4.-15.5.	0,04	0,8	0,032
3.	16.5.-30.6.	0,303	0,65	0,197
4.	1.7.-15.10.	0,655	0,3	0,1965
5.	16.10.-31.10.	0,002	0,7	0,0014
				0,44

Oves s podsevem $C_8 = 0,2113$

Období	Datum	R %	C	R.C
1.	1.11.-31.3.	0,0	0,7	0,0
2.	1.4.-15.5.	0,04	0,75	0,03
3.	16.5.-30.6.	0,303	0,5	0,1515
4.	1.7.-5.8.	0,3721	0,08	0,0298
				0,21

Výsledné $C = 0,02+0,14+0,45+0,10+0,26+0,12+0,44+0,21 = 1,7472/8 = \mathbf{0,22}$

P faktor: vyjadřuje účinnost protierozních opatření. Vrstevnicové obdělávání půdy je neúčinné. Středně účinné je hrázkování a pásové střídání plodin. Nejvíce účinným je terasování, ale je zároveň nejnákladnější. Vzhledem k tomu, že se ve zvoleném území neprovádějí protierozní opatření, používá se hodnota 1, která je zároveň nejčastější.

Dosazení dílčích hodnot do faktorů vzorce $G_1 = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$

Tabulka 4.3: Výpočet podle Wischmeiera, Smithe

Odtoková dráha	R	K	L	S	C	P	G (t/ha)
1.	40	0,49	4,27	0,18	0,2184	1	3,29
2.	40	0,16	4,27	0,26	0,2184	1	1,55
3.	40	0,26	3,02	0,18	0,2184	1	1,24
4.	40	0,48	5,22	0,26	0,2184	1	5,69
5.	40	0,33	5,22	0,26	0,2184	1	3,91
6.	40	0,33	4,27	0,57	0,2184	1	7,02
7.	40	0,49	2,61	0,57	0,2184	1	6,37
8.	40	0,49	2,61	0,35	0,2184	1	3,9
9.	40	0,33	4,27	0,18	0,2184	1	2,22
10.	40	0,49	4,27	0,35	0,2184	1	6,4

Rovnice podle Freverta $G_2 = 10 \cdot (K' \cdot O' \cdot S' \cdot C' \cdot P' \cdot L')$

Faktor K' - od 0,75 do 0,9 » **0,8**

Faktor O' - od 0,70 do 0,9 » **0,9**

Faktor C' » **2,0**

Faktor P' » **0,5**

Tabulka 4.4: Výpočet L' , S' faktorů

Číslo odtokové dráhy	Délka odtokové dráhy	L – dle tabulek	I (%)	S – dle tabulek
1(15)	395	6,3	2	0,22
2(14)	269	4,6	3	0,23
3(13)	164	3,2	2	0,22
4(12)	775	8,69	3	0,23
5(11)	381	6,2	3	0,23
6(29)	331	5,4	6	0,26
7(20)	133	2,95	6	0,26
8(22)	119	2,87	4	0,24
9(23)	282	4,64	2	0,22
10(28)	269	4,5	4	0,24

Dosazení dílčích hodnot do vzorce $G_2 = 10 \cdot (K' \cdot O' \cdot S' \cdot C' \cdot P' \cdot L')$

Tabulka 4.5: Výpočet Frevertovy rovnice

Odtoková dráha	K'	O'	S'	C'	P'	L'	G (t/ha)
1.	0,8	0,9	0,22	2	0,5	6,3	9,98
2.	0,8	0,9	0,23	2	0,5	4,6	7,61
3.	0,8	0,9	0,22	2	0,5	3,2	5,07
4.	0,8	0,9	0,23	2	0,5	8,69	14,39
5.	0,8	0,9	0,23	2	0,5	6,2	10,26
6.	0,8	0,9	0,26	2	0,5	5,4	10,11
7.	0,8	0,9	0,26	2	0,5	2,95	5,52
8.	0,8	0,9	0,24	2	0,5	2,87	4,96
9.	0,8	0,9	0,22	2	0,5	4,64	7,35
10.	0,8	0,9	0,24	2	0,5	4,5	7,78

Frevertova rovnice podle Zdražila $G_3 = 8,24 \cdot K' \cdot O' \cdot S' \cdot C' \cdot P' \cdot L'$

Tabulka 4.6: Výpočet Frevertovy rovnice podle Zdražila

Odtoková dráha	K'	O'	S'	C'	P'	L'	G (t/ha)
1.	0,8	0,9	0,22	2	0,5	6,3	8,61
2.	0,8	0,9	0,23	2	0,5	4,6	6,28
3.	0,8	0,9	0,22	2	0,5	3,2	4,18
4.	0,8	0,9	0,23	2	0,5	8,69	11,86
5.	0,8	0,9	0,23	2	0,5	6,2	8,46
6.	0,8	0,9	0,26	2	0,5	5,4	8,33
7.	0,8	0,9	0,26	2	0,5	2,95	4,55
8.	0,8	0,9	0,24	2	0,5	2,87	4,09
9.	0,8	0,9	0,22	2	0,5	4,64	6,06
10.	0,8	0,9	0,24	2	0,5	4,5	6,41

Frevertova rovnice s přidaným faktorem H=0,85

$$G_4 = 8,24 \cdot K' \cdot O' \cdot S' \cdot C' \cdot P' \cdot L' \cdot H'$$

Tabulka 4.6: Výpočet Frevertovy rovnice s přidaným faktorem H

Odtoková dráha	K'	O'	S'	C'	P'	L'	H'	G (t/ha)
1.	0,8	0,9	0,22	2	0,5	6,3	0,85	6,98
2.	0,8	0,9	0,23	2	0,5	4,6	0,85	5,34
3.	0,8	0,9	0,22	2	0,5	3,2	0,85	3,55
4.	0,8	0,9	0,23	2	0,5	8,69	0,85	10,08
5.	0,8	0,9	0,23	2	0,5	6,2	0,85	7,19
6.	0,8	0,9	0,26	2	0,5	5,4	0,85	7,08
7.	0,8	0,9	0,26	2	0,5	2,95	0,85	3,87
8.	0,8	0,9	0,24	2	0,5	2,87	0,85	3,47
9.	0,8	0,9	0,22	2	0,5	4,64	0,85	5,15
10.	0,8	0,9	0,24	2	0,5	4,5	0,85	5,45

4.2 Zhodnocení vhodnosti aplikace vybraných modelů

Model SWRRB – Simulator for Water resources in Rural Basins

Podle Podhrázké a Dufkové (2005), jde o dynamický simulační model určený k hodnocení statistik odtoku a ukládání dat po dlouhou dobu. Výskyt bouře, fáze mezi bouřemi, vývoj rostlin a evapotranspirace jsou zahrnuty. Primárně je určen pro úzká povodí až 100 km², kde převládají zemědělské procesy se zaměřením na hydrologii a sedimentaci látek. Výhody tohoto modelu jsou, dlouhodobé ukládání dat, zahrnutí více faktorů a možnost řešení úzkých povodí až 100 km². Tento model je **vhodný**.

Model AGNPS – Agricultural NonPoint Source

Model AGNSP je vytvořen pro velká povodí 200 km² jak tvrdí i Podhrázká a Dufková (2005), vyhodnocuje nebodových zdrojů znečištění a jeho pohybu v povodí. Tento model se používá k simulaci nánosů živin, sedimentů a pesticidů na základě využití území. Model bude využívá stávající vyžití půdy k hodnocení oblastí, které vede ke znečištění v různých bodech povodí. AGNPS je hlavně určen pro povodí s menší velikostí a středně vysokou náročností objemu dat. Tento model má své výhody v hodnocení nebodových zdrojů znečištění a monitorování pohybu tohoto znečištění. Další výhodou je malá náročnost objemu dat. Podle Merritta et al. (2003) může být model

použit i na větších plochách než 200 km². Model se využívá jako AnnAGNPS v rozhraní programu GIS, kde rozděluje sledovanou oblast na čtvercovou síť. Model vymodeluje erozní, odtokové a transportní procesy pro jednotlivé čtverce a zahrne do výsledků daného čtverce i vstupy sousedních čtverců. Proto je **vhodný**.

Model SWAT – Soil and Water Assessment Tool

SWAT je matematický model speciálně vytvořený pro rozsáhlá povodí. Primárním cílem modelu je vyhodnotit erozní procesy, přeprava splavenin a posouzení účinky odtokových poměrů na hospodaření zemědělců. Doporučený časový stupeň pro výpočet je jeden den. Mnoho amerických federálních agentur, včetně Environmental Protection Agency (USEPA) používá tento model. Navzdory svojí náročnosti na vstupní data jde o velmi používaný model. Model je sice velice používaný ale náročnost na vstupní data je velmi vysoká, jak tvrdí i Galván et al. (2014). Dále je model určen hlavně pro rozsáhlá území, časová doba pro výpočet je jeden den, tudíž je model **nevhodný**.

Model EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator

Model EPIC se používá k testování účinků erozních procesů na změnu vlastností půdy a úrodnosti půdy na malých homogenních územích do přibližně 1 ha. Model byl vytvořen za účelem hodnocení zemědělských strategií. Největší výhodou tohoto modelu je, že se velmi podrobně zaměřuje na povrchový odtok a cykly a postupy rostlinného růstu. EPIC je určen pro malá území do 1 ha. Hlavním smyslem modelu je hodnocení zemědělských strategií, což píše ve svých publikacích i Podhrázská a Dufková (2005) a proto je model **nevhodný**.

Metoda čísel odtokových křivek – CN

Tato metoda je výrazným zlepšením pro výpočet vodní eroze. Mnoho modelů využívá této metody. CN křivky jsou velmi oblíbené díky svým malým požadavkům na vstupní data je to jednoduchý srážkoodtokový model, zároveň je i přesný, jak tvrdí Janeček (2007). Když jsou nastaveny příznačná vstupní data metoda CN vykazuje velmi dobré výsledky, jedná se o značné usnadnění při výpočtu vodní eroze. Na základě čísel odtokových křivek, které jsou uvedeny v tabulce na bázi hydrologických vlastností půd,

jsou tyto modely zařazeny do 4 skupin. Tudíž je metoda i přesná, jak píše i Dumbrovský a Mezera (2000). Metoda je tedy **vhodná** jako jedna z hodnot modelů.

Tabulka 4.7: Výsledky

Rovnice podle Wischmeiera, Smithe 1978 $G_1 = R.K.L.S.C.P$	Po dosazení dílčích hodnot do faktorů vzorce, jenom 4 odtokové dráhy nesplnili přípustné G u středně hlubokých půd.	Vhodná
Rovnice podle Freverta $G_2 = 10.(K'.O'.S'.C'.P'.L')$	Po dosazení dílčích hodnot, ani jedna odtoková dráha nesplnila přípustné G	Nevhodná
Frevertova rovnice podle Zdražila $G_3 = 8,24.K'.O'.S'.C'.P'.L'$	Po dosazení dílčích hodnot, ani jedna z deseti odtokových drah nesplnila přípustné G.	Nevhodná
Frevertova rovnice s přidaným faktorem $H=0,85$ $G_4 = 8,24.K'.O'.S'.C'.P'.L'.H'$	Když se za faktor H' hnojení použije správné množství hnojení, tak je vhodná. U opačného použití se výsledky G přípustného zhorší. Jako v této práci, kde G splnili pouze 3 odtokové dráhy.	Vhodná za předpokladu použití správného množství hnojení

Nejpříjemnějších výsledků dosahovala rovnice Wischmeier – Smith z roku 1978, která je v této práci označena jako G_1 . Jedná se o hojně používanou rovnici při výpočtu průměrného ročního odnosu zeminy. To se potvrdilo i po dosazení všech dílčích faktorů do rovnice.

Rovnice G_2 neboli Frevertova rovnice, není tak úplně vhodná. Protože podle našeho výpočtu, po dosazení všech dílčích faktorů do rovnice, bylo zjištěno, že žádná z odtokových drah nesplnila přípustný smyv půdy. U středně hlubokých půd 30-60 cm a hlubokých půd nad 60 cm je přípustná hodnota $4,0 \text{ t. ha}^{-1} \text{. rok}^{-1}$. Stejně dopadla i

rovnice, kterou upravil Zdražil, v naší práci označená jako G_3 . Přípustnou ztrátu u této rovnice nesplnila také žádná z odtokových drah. Ke stejnému závěru došel i Janeček et al. (2008) ve své práci *Základy erodologie*. V díle *Základy erodologie* Janeček et al. (2008) tvrdí, že Frevertova rovnice podle Zdražila je vhodná, k tomu závěru však tato práce nedošla, jelikož ani jedna z deseti odtokových drah nesplnila přípustný smyv půdy.

Frevertova rovnice upravená Zdražilem a přidaným faktorem hnojení H , v této práci označená jako G_4 je vhodná pouze za předpokladu správného stanovení faktoru H . Když se použije nesprávné množství hnojení rovnice nevykazuje dobré výsledky, jako tomu bylo v této práci, kde splnily přípustný smyv půdy pouze 3 odtokové dráhy. K podobnému závěru došel i Janeček et al. (2008).

V této práci byli dále posuzovány vybrané model výpočtu okamžitého odnosu zeminy. Jako vhodné modely se jeví model SWRRB a AGNPS. Jako nevhodné jsou určeny modely SWAT a EPIC, zejména kvůli jejich určení pro velká povodí, kvůli tomu jsou zařazeny jako nevhodné.

Ještě byla zvolena metoda odtokových čísel CN, tato metoda je výrazným zlepšením při výpočtu vodní eroze, ke stejnému závěru došel ve své práci Janeček (2007). Metoda je zároveň i velmi přesná, což potvrzuje i Dumbrovský a Mezera (2000). V budoucnu se metoda čísel odtokových křivek bude zlepšovat a integrovat do programů pro výpočet vodní eroze, tudíž bude čím dál víc usnadňovat výpočty vodní eroze.

Závěr

Hodnocení dílčích modelů je obtížné vzhledem k tomu, že každý model má svou vlastní sadu parametrů. Dílčí modely můžeme použít pro různé velikosti povodí, které mají různé požadavky na objem vstupních dat, odlišné velikosti povodí atd. Jednotlivé modely se neustále vyvíjejí a interakce s geografickými informačními systémy jako je GIS mají vliv na jejich využití a informační možnosti.

Díky vývoji se podařilo nahradit empirický základ hodnocení síly erozních vlivů Univerzální rovnice lepšími metodami a bylo vytvořeno několik modelů pro modelování eroze. Některé verze modelů jsou stále v procesu zdokonalování, takže jejich funkčnost není ani registrována.

U použití jednotlivých modelů je důležité dbát na předpoklady a podmínky, které vedly k vytvoření modelu homogenita území, stejně jako časové a plošné vlastnosti modelu. Uvedené modely využívají fyzikální popis konkrétních procesů k diskusi o jednotlivých jevech eroze, jako je eroze půdy, povrchový odtok a transport materiálu.

Musíme mít na paměti, že okamžitá použitelnost modelů odvozených ze zahraničí může být v našich podmínkách obtížná, pokud nebyly důkladně otestovány.

Seznam použité literatury

- 1) Agroprojekt Praha (1987), *Protierozní ochrana zemědělských pozemků*. Typizační směrnice, 2, Praha.
- 2) Bissonnais, Y. L. et al. (2002). Mapping erosion risk for cultivated soil in France. [online] Science Direct [cit. 18. 04. 2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816201001679>
- 3) Dumbrovský, M. Mezera, J. et al. (2000) *Metodický návod pro pozemkové úpravy a související informace*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha.
- 4) Dumbrovský, M. et al. (2004). *Metodický návod pro vypracování návrhů pozemkových úprav*. Českomoravská komora pro pozemkové úpravy, Brno.
- 5) Galván, L. et al. (2014). Rainfall estimation in SWAT: An alternative method to simulate orographic precipitation. *Journal of Hydrology*, 509(1): 258-266.
- 6) Holý, M. (1978). *Protierozní ochrana*. Nakladatelství technické literatury, Praha.
- 7) Hovorka, V. et al. (1990). *Projektová příprava protierozních opatření*. Výzkumný ústav pro zúrodnění zemědělských půd, Praha.
- 8) Janeček, M. et al. (2008). *Základy erodologie*. Česká zemědělská univerzita, Praha. ISBN 987-802131842-7.
- 9) Janeček, M. et al. (2007). *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha. ISBN 987-80-254-0973-2.
- 10) Kinnell, P. I. A. (2001). *Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells*. Soil & Tillage Research 58.
- 11) Kokolia, V. a Kos, M. (1989). *Protierozní osevní postupy*. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství, Praha.

-
- 12) Merritt, W. S. et al. (2003). *A review of erosion and transport models*. Environmental Modelling and Software.
- 13) Musgrave, G. W. (1947). *The Quantitative Evaluation of Factors in Water Erosion*. A First Approximation. J. of Soil and Conservation.
- 14) Nondedeu, F. I. a Bédécarrats, A. (2007). Influence of alpine plants growing on steep slopes on sediment trapping and transport by runoff. [online] Science Direct [cit. 18. 04. 2021] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816207000343>
- 15) Pasák, V. et al. (1974). *Ochrana zemědělské půdy proti erozi*. Ústav vědeckotechnických informací, Brno.
- 16) Podhrázká, J. a Dufková, J. (2005). *Protierozní ochrana půdy*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno. ISBN 80-7157-856-8.
- 17) Raclot, D. a Albergel, J. (2006). Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C [online] Science Direct [cit. 18. 04. 2021] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706506001768>
- 18) Sklenička, P. (2003). *Základy krajinného plánování*. 2. Naděžda Skleničková, Praha. ISBN 80-903206-1-9.
- 19) Tisdall, J. M. et al. (2012). Stabilisation of soil against wind erosion by six saprotrophic fungi. [online] Science Direct [cit. 18. 04. 2021] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071712001009#>
- 20) Toman, F. (1995). *Pozemkové úpravy*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno. ISBN 80-7157-148-2.

-
- 21) Vrieling, A. (2006). Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. [online] Science Direct [cit. 18. 04. 2021] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816205002031>
- 22) Wischmeier, W. H. a Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses*. U.S. Dept. of Agriculture, Washington DC.
- 23) Zdražil, K. (1965). *Ekonomické hodnocení protierozní ochrany*. ÚVTI MZLVH, Praha.
- 24) Zhang, H. et al. (2013). Extension of a GIS procedur efor calculating the RUSLE equation LS factor. [online] Science Direct [cit. 18. 04. 2021] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412003378>
- 25) Zingg, A. W. (1940). *Degree and Lenght of Land Slope as if Affects Soil Loss in Runoff*. Agr. Eng.

Seznam obrázků

Obrázek 3.1: Nomogram pro stanovení hodnoty K (FSV ČVUT, 2004)	32
Obrázek 4.1: Fotografie pozemku č.7.....	39

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Stanovení přípustné ztráty půdy vodní erozí (Janeček a kol., 2012).....	34
Tabulka 4.1: K faktor (zdroj: vlastní).....	41
Tabulka 4.2: Výpočet L, S faktorů (zdroj: vlastní).....	42
Tabulka 4.3: Výpočet podle Wischmeiera, Smithe (zdroj: vlastní).....	45
Tabulka 4.4: Výpočet L', S' faktorů (zdroj: vlastní).....	45
Tabulka 4.5: Výpočet Frevertovy rovnice (zdroj: vlastní).....	46
Tabulka 4.6: Výpočet Frevertovy rovnice podle Zdražila (zdroj: vlastní).....	46
Tabulka 4.6: Výpočet Frevertovy rovnice s přidaným faktorem H (zdroj: vlastní).....	47
Tabulka 4.7: Výsledky (zdroj: vlastní).....	49

Seznam použitých zkratek

GIS – geografický informační systém

N – dusík

P – fosfor

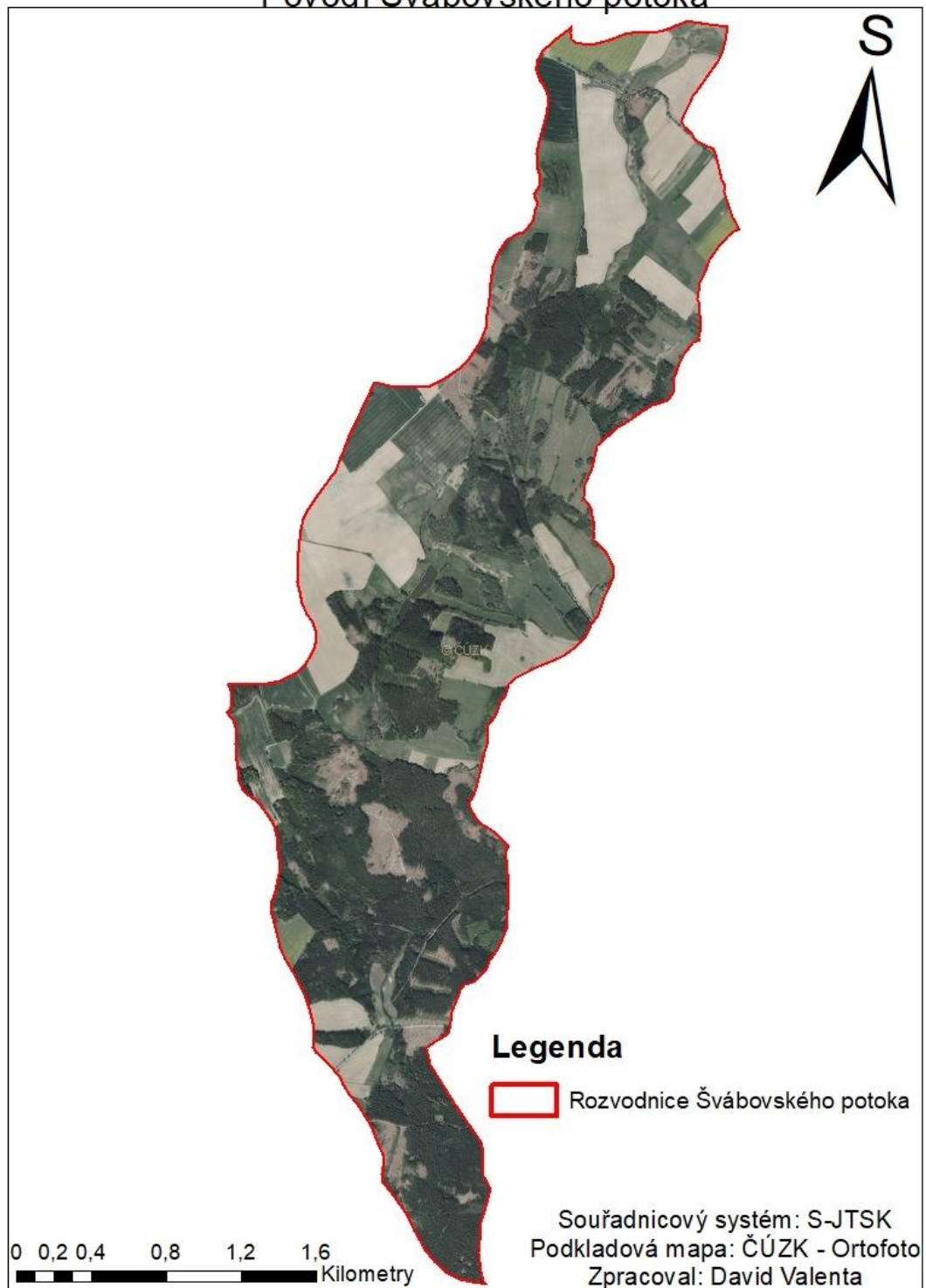
RUSLE – Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy

USLE – Univerzální rovnice ztráty půdy

CN křivky – metoda čísel odtokových křivek

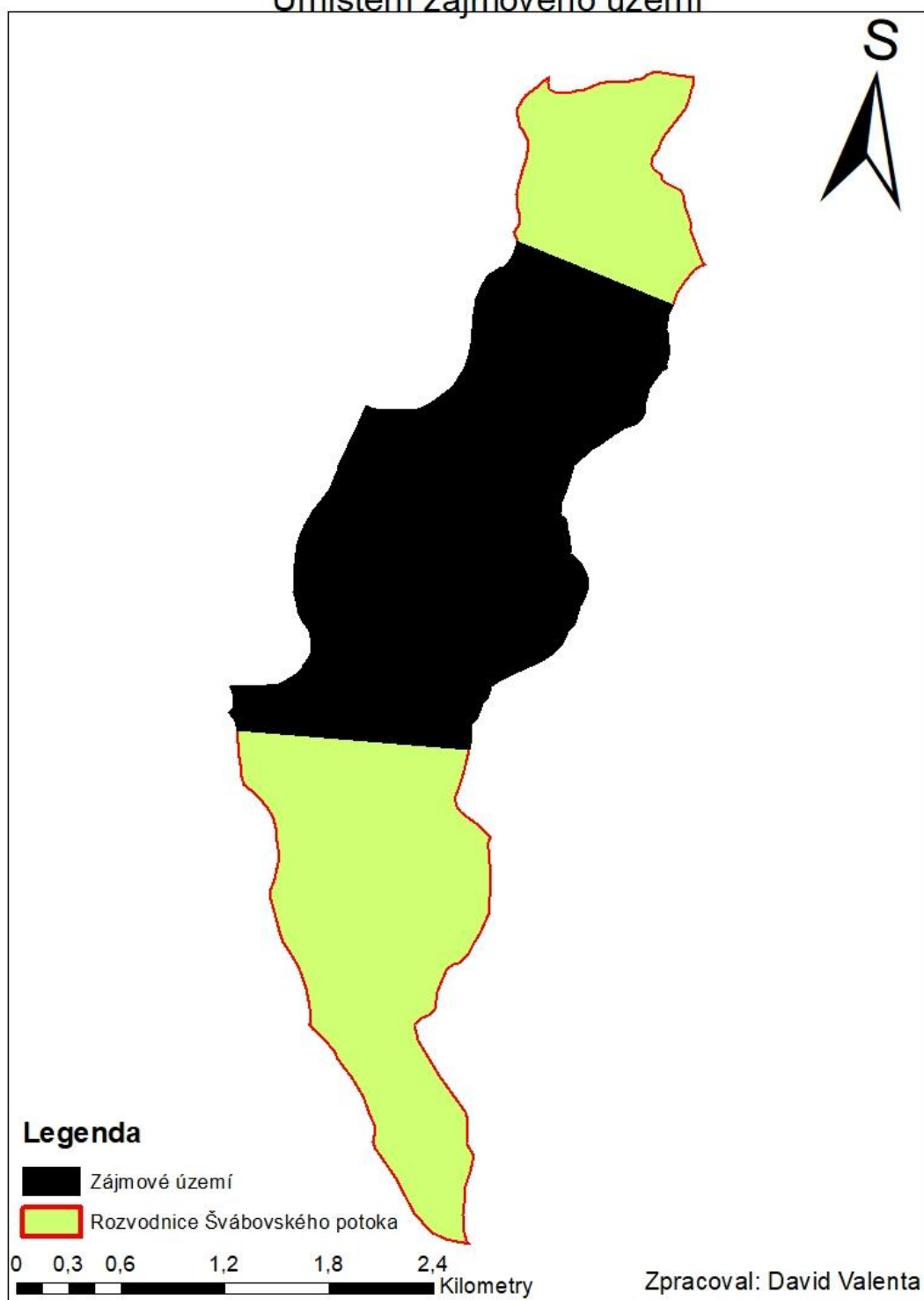
Přílohy

Povodí Švábovského potoka



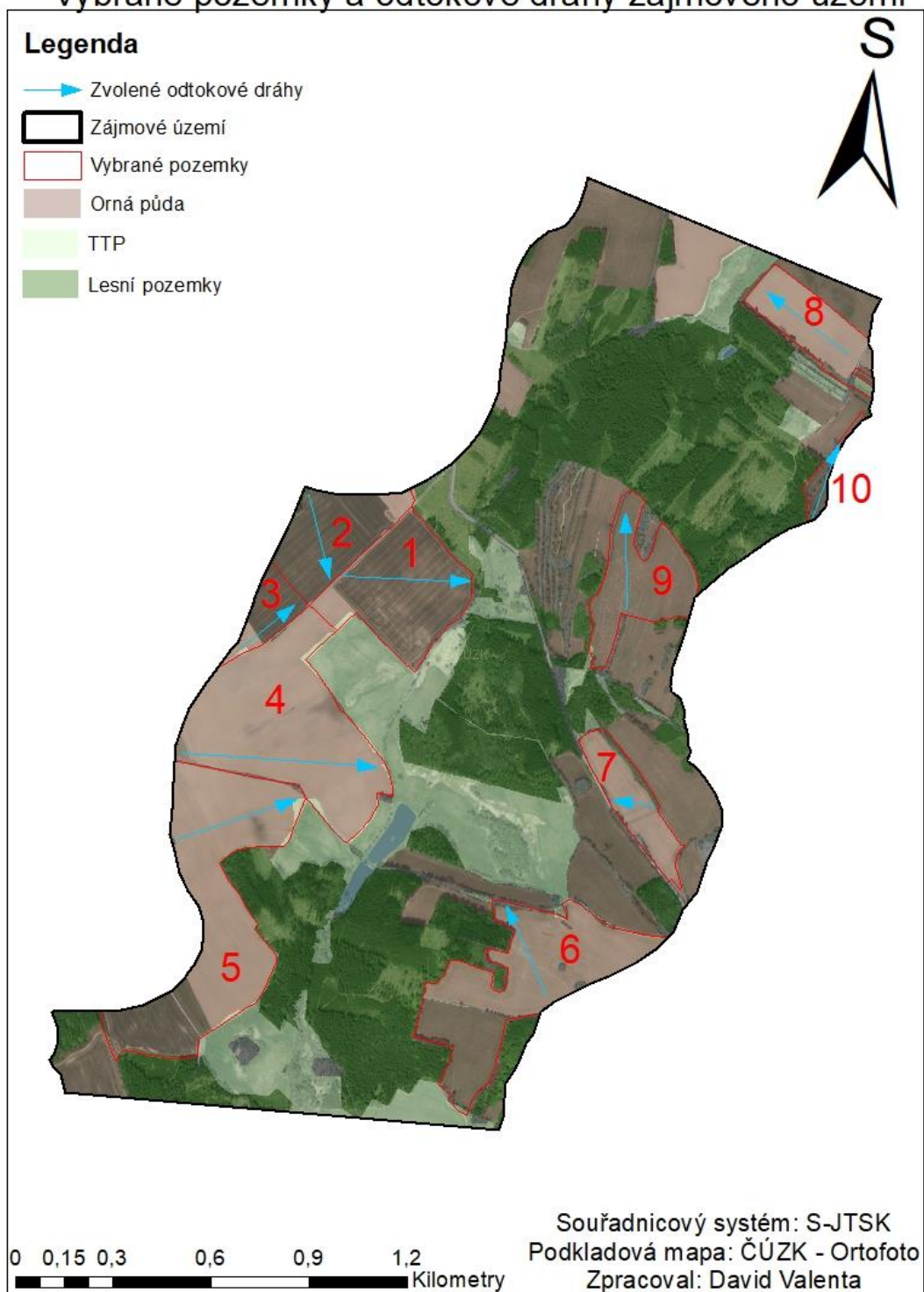
Příloha č. 1: Povodí Švábovského potoka

Umístění zájmového území



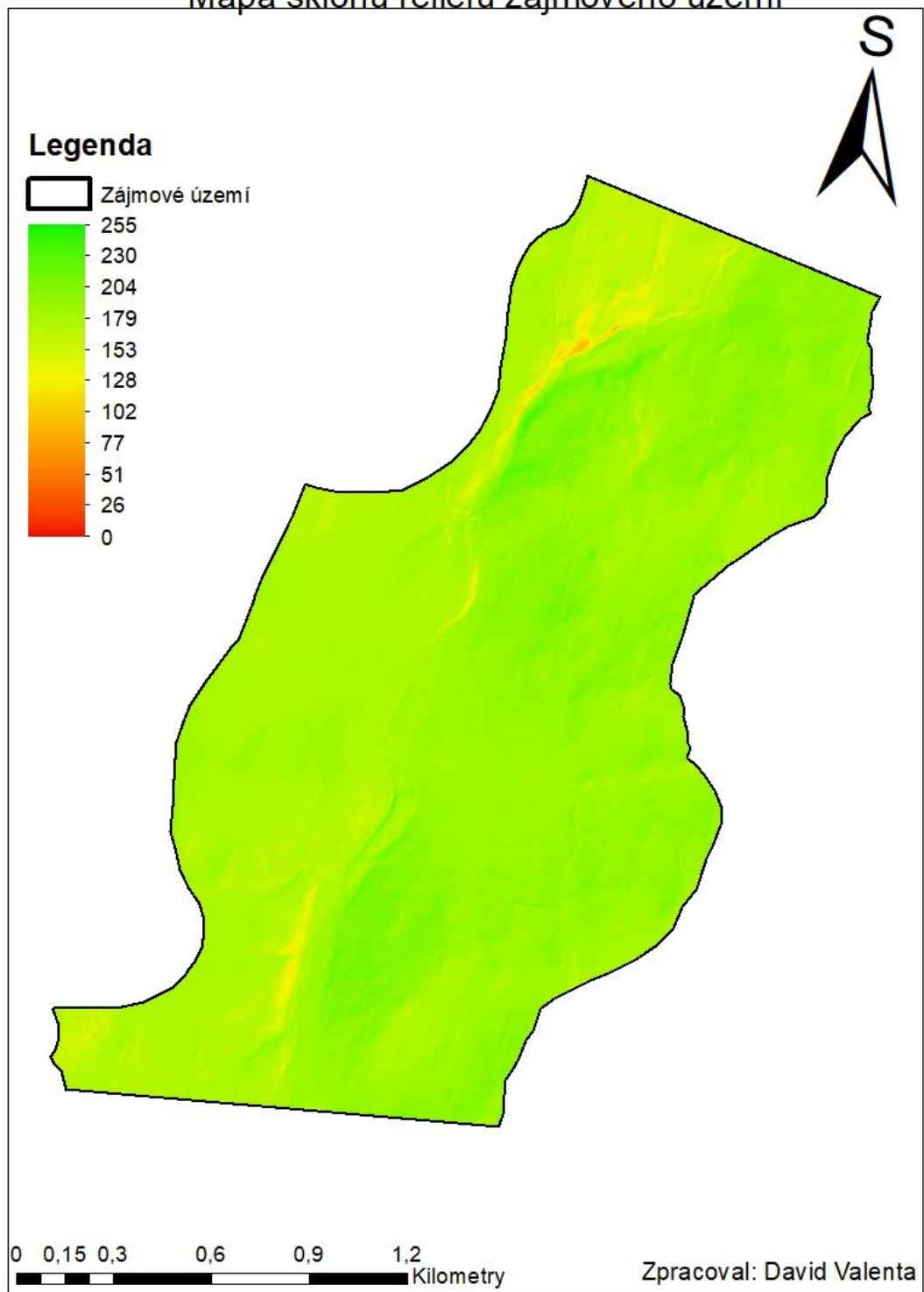
Příloha č. 2: Umístění zájmového území

Vybrané pozemky a odtokové dráhy zájmového území



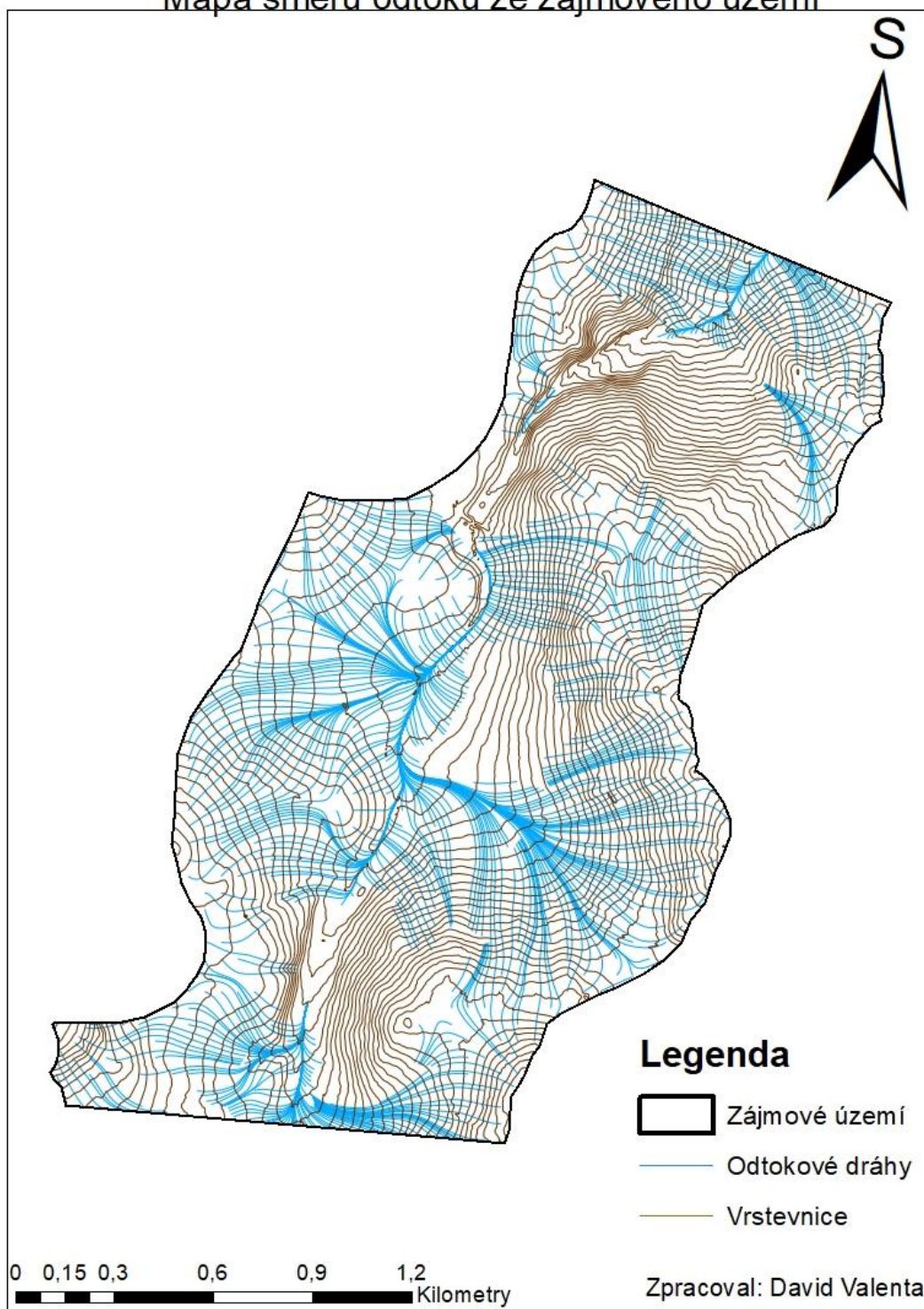
Příloha č. 3: Mapa pozemků a vybraných odtokových drah

Mapa sklonu reliéfu zájmového území



Příloha č. 4: Mapa sklonu reliéfu

Mapa směru odtoku ze zájmového území



Příloha č. 5: Mapa směru odtoků