

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**KATEDRA BIOTECHNICKÝCH ÚPRAV KRAJINY**



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta životního  
prostředí**

**Analýza výpočtu topografického faktoru v prostředí GIS**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vedoucí práce: Ing. Jan Vopravil, Ph. D.

Bakalant: Ondřej Kejnovský

2019

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ondřej Kejnovský

Územní technická a správní služba

Název práce

**Analýza výpočtu topografického faktoru v prostředí GIS**

Název anglicky

**Analyses of topographic factor calculation in GIS environment**

---

### Cíle práce

1. Rešerše výpočetních metod LS faktoru.
2. Rešerše algoritmů pro tvorbu rastrů sklonitosti, směru a akumulace odtoku.
3. Porovnání vybraných výpočetních metod mezi sebou.
4. Analýza vlivu použitého rozlišení a algoritmů (nástrojů) pro generování dílčích rastrových vrstev.

### Metodika

Na modelovém povodí nebo katastrálním území vytvoří student z výškových dat dílčí rastrové vrstvy potřebné pro výpočet LS faktoru v GIS: digitální model terénu, rastry sklonitosti, směru a akumulace odtoku, pomocí různých algoritmů (dostupných nástrojů ArcGIS). Použitím vybraných vzorců budou pomocí mapové algebry vytvořeny rastry LS faktorů. Výpočet bude probíhat v rozlišeních 5, 10 a 15 m. Bude analyzován vliv rozlišení, použitých algoritmů pro tvorbu dílčích rastrů a použitého vzorce na výsledné hodnoty LS faktorů.

## Doporučený rozsah práce

50

## Klíčová slova

LS faktor, USLE, RUSLE, GIS

---

## Doporučené zdroje informací

- Desmet, P.J.J., Govers, G. (1996): A GIS procedure for the automated calculation of the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 427–433.
- HRABALÍKOVÁ, M. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, – JANEČEK, M. *Příspěvek k hodnocení různých přístupů v modelování ztráty půdy vodní erozí v prostředí GIS : disertační práce*. Disertační práce. Praha: 2015.
- Hrabalíková M., Janeček M. (2017): Comparison of different approaches to LS factor calculations based on a measured soil loss under simulated rainfall. *Soil & Water Res.*, 12: 69–77.
- McCool, D.K., Foster, G.R., Mutchler, C.K., Meyer, L.D. (1989): Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 32, 1571–1576.
- Moore, I.D., Wilson, J.P. (1992): Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. *Journal of Soil & Water Conservation* 47, 423–428.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. (1997): *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA Agriculture Handbook No. 703, Washington D.C., USDA-ARS.
- Wilson, J.P. (1986): Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 179–184.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978): *Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning*. USDA Agricultural Handbook No. 537, Washington D.C., USDA.
- Zhang et al. (2013): Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers & Geosciences* 52, 177–188

---

## Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

## Vedoucí práce

Ing. Jan Vopravil, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra biotechnických úprav krajiny

Elektronicky schváleno dne 11. 3. 2019

**prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2019

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 20. 03. 2019

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Analýza výpočtu topografického faktoru v prostředí GIS“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Vopravila, Ph. D. a použil pouze literární zdroje a publikace uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne 10.4.2019

Ondřej Kejnovský

.....

## **Abstrakt**

Teoretická část této práce se zabývá různými způsoby výpočtu LS faktoru, a to jak manuálních postupů, tak algoritmů. Následně jsou manuální postupy porovnány s automatickými. V další části je popsán způsob stanovení sklonu terénu, směru odtoku a akumulace odtoku v prostředí GIS. V praktické části je LS faktor vypočítán různými algoritmy v prostředí GIS. Výsledné rastry směru odtoku, akumulace odtoku a LS faktoru jsou mezi sebou porovnány.

**Klíčová slova:** LS faktor, USLE, RUSLE, GIS

## **Abstract**

Theoretical part of this thesis deals with different means of calculating LS factor by manual means and algorithms. Manual methods are compared with automatic methods. Next part describes methods of determining terrain slope, flow direction and flow accumulation in GIS. LS factor is calculated using different algorithms in GIS in practical part. Created rasters of flow direction, flow accumulation and LS factor are compared with each other.

**Key words:** LS factor, USLE, RUSLE, GIS

# Obsah

Úvod .....	8
Literární rešerše .....	9
1 Výpočetní metody LS faktoru .....	9
1.1 Topografický faktor v USLE .....	9
1.2 Topografický faktor RUSLE .....	9
1.3 Topografický faktor v RUSLE3D .....	10
1.4 Topografický faktor v USLE2D .....	11
1.5 Topografický faktor v USPED .....	12
2 Algoritmy pro výpočet LS faktoru v GIS .....	13
2.1 Metody .....	13
3 Porovnání manuální a automatizované metody .....	18
4 Stanovení sklonu terénu .....	18
5 Stanovení směru odtoku .....	19
6 Stanovení akumulace odtoku .....	21
Metodika .....	21
1 Vymezení řešeného území .....	21
2 Použitá data .....	21
3 Výpočet LS faktoru .....	22
Výsledky .....	23
1 Metoda 1 .....	23
2 Metoda 2 .....	26
3 Metoda 3 .....	29
4 Metoda 4 .....	32
5 Metoda 5 .....	35
6 Metoda 6 .....	38
7 Metoda 7 .....	41
8 Metoda 8 .....	44
9 Metoda 9 .....	47
10 Metoda 10 .....	50
11 Metoda 11 .....	53
12 Metoda 12 .....	56
Diskuze .....	59
1 Porovnání rastrů směru odtoku .....	59
2 Porovnání rastrů akumulace odtoku .....	59
3 Porovnání rastrů LS faktoru .....	60
Závěr .....	61

Seznam použité literatury.....	62
--------------------------------	----

## Úvod

Topografický (LS) faktor je spolu s dalšími faktory – R (faktor erozní účinnosti srážek), K (faktor erodibility půdy), C (faktor ochranného vlivu vegetace) a P (faktor účinnosti protierozních opatření) součástí univerzální rovnice ztráty půdy (USLE).

Faktory L a S jsou obvykle v rovnici USLE počítány dohromady jako topografický faktor, přestože byly vyvíjeny samostatně. Topografický faktor je poměr ztráty půdy na jednotku plochy ze sklonitého pozemku k jednotkovému pozemku, který je definovaný jako pozemek s délkou 22,13 m a sklonem 9 % (Wilson, 1986). Tento faktor se v průběhu času nemění vnějšími vlivy. Změny jsou možné pouze terénními úpravami nebo přerušáním svahu liniovým prvkem. Riziko eroze půdy se zvyšuje s rostoucí délkou a se zvyšujícím se sklonem svahu (Wischmeier, Smith, 1978). V případě faktoru délky svahu lze délku definovat jako horizontální projekci délky svahu. Rozdíl mezi délkou vyjádřenou ve formě horizontální projekce a délkou skutečného pozemku se při výpočtu topografického faktoru projevuje u výrazně sklonitých pozemků (Janeček, 2012).

Odhadování LS faktoru v povodí bylo dříve problematické, protože byl terénní průzkum časově náročný, vyžadoval velké množství profilových hodnot a byl finančně nákladný, a to hlavně ve velkých povodích s komplexní topografií. Snížení počtu vzorků mohlo vést k nepřesným výsledkům (Williams, Berndt, 1977). Vyjádření faktoru LS je klíčové pro aplikaci modelů USLE (RUSLE) (Hrabalíková, Janeček, 2017). Při výpočtu topografického faktoru je nutné počítat s více problémy než při stanovení ostatních faktorů USLE. Toto platí zejména při aplikaci na skutečný terén (Renard et al., 1997). LS faktor je nejcitlivější parametr rovnice USLE (RUSLE) při předpovědi ztráty půdy erozí.

Aby se překonaly omezení daná 1D modelováním běžnými metodami, faktor délky svahu byl nahrazen specifickou záchytnou plochou, která umožňuje určit síť průsaku při zvážení povrchového odtoku a akumulovaného proudění z digitálního modelu terénu. Po zahrnutí tohoto konceptu byla rovnice upravena pro nepravidelný sklon (Hrabalíková, Janeček, 2017).



# Literární rešerše

## 1 Výpočetní metody LS faktoru

### 1.1 Topografický faktor v USLE

Rovnice USLE je empirická metoda predikce vodní eroze navržená pro určení ztráty půdy povrchovým odtokem z určitého místa se specifickým vegetačním krytem a způsobem hospodaření z dlouhodobého hlediska.

Výsledkem rovnice je dlouhodobá průměrná roční ztráta půdy. Pro dosažení výsledku je třeba, aby byly jednotlivé faktory USLE zvoleny tak, aby jejich hodnoty co nejlépe odrážely skutečný stav půdy v dané lokalitě (Wischmeier, Smith, 1978).

Pro výpočet topografického faktoru lze použít dva postupy, jejichž vyjádření se liší podle sklonu svahu:

V případě, že je sklon svahu menší než 9 %, lze použít vzorec:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m * (10,8\sin\theta + 0,03)$$

V případě, že je sklon svahu větší nebo roven 9 %, lze použít vzorec:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m * (16,8\sin\theta - 0,5)$$

kde:  $\lambda$  = horizontální projekce délky svahu

$m$  = exponent svahu na základě náchylnosti k tvorbě rýžek

$\theta$  = úhel sklonu svahu v radiánech (Janeček, 2012)

$$m = \frac{\beta}{1+\beta}$$

$$\beta = \left(\frac{\left(\frac{\sin\theta}{0,0896}\right)}{(3(\sin\theta^{0,8})+0,56)}\right)$$

(Wischmeier, Smith 1978)

### 1.2 Topografický faktor RUSLE

Rovnici RUSLE lze použít jako USLE pro určení průměrných ročních ztrát půdy způsobených vodní erozí, a to jak na zemědělsky využívaných pozemcích, tak i na pozemcích s nezemědělským využitím jako jsou například stavební pozemky (Janeček, 2008). Na rozdíl od USLE používá RUSLE odlišnou metodiku hodnocení jednotlivých faktorů a využívá od počátku své existence výpočetní techniku při zjišťování ohroženosti vodní erozí. RUSLE je ve velké míře využívána ve Spojených státech

amerických, protože tam existuje databáze, která obsahuje rozmanité informace o možných vlastnostech faktorů na jejich území, a tak je možné získat výsledky přesnější pro specifické podmínky konkrétních lokalit (Renard et al., 1997).

Na území České republiky není RUSLE používána v míře, jako je používána ve Spojených státech, z důvodu neexistence jednotné databáze pro naše území (Janeček, 2008). Oproti LS faktoru v USLE je LS faktor v RUSLE změněn tak, aby zohledňoval poměr rýžkové a mezirýžkové eroze. Přístup RUSLE zároveň umožňuje rozdělení svahu do několika homogenních segmentů (Renard, 1997).

$$LS_i = \frac{S_i x^m (i^{m+1} - (i-1)^{m+1})}{72,6^m}$$

kde:  $LS_i$  = hodnota LS faktoru pro i-tý segment

$x$  = délka segmentu ve stopách

$m$  = exponent svahu vyjadřující náchylnost k tvorbě rýžek

$$m = \frac{\beta}{1+\beta}$$

$$\beta = \left( \frac{\left( \frac{\sin \theta}{0,0896} \right)}{(3(\sin \theta^{0,8}) + 0,56)} \right)$$

(Renard, 1997)

### 1.3 Topografický faktor v RUSLE3D

Po nástupu USLE bylo v 90. letech vyzorováno, že výpočet LS faktoru z USLE na nepravidelných nebo segmentovaných svazích zcela neplatí. Eroze na konvexních svazích je o 30 % vyšší, než se předpokládalo. Naopak na konkávních svazích nedosahují průměrné hodnoty eroze takových hodnot, jako eroze na pravidelných svazích o stejných sklonech, a že největší podíl na množství erodované půdy na takovém svahu probíhá v jeho horní třetině. Aby se tento fakt ve výpočtu projevil, tato plocha (tzv. „contributing area“) byla ve výpočtu zahrnuta. Velikost této plochy lze poměrně přesně určit pomocí výpočtu akumulace odtoku (Mitášová et al., 1996).

RUSLE3D představuje jisté zjednodušení oproti RUSLE. Hodnota LS faktoru pro určitý bod (například „r“) se vypočítá následujícím způsobem:

$$LS(r) = (m + 1) \left( \frac{A_s(r)}{22,13} \right)^m \left( \frac{\sin b(r)}{\sin 5,143^\circ} \right)^n \quad (\text{Mitášová et al., 1996})$$

kde:  $A_s$  = jednotková zdrojová plocha odtoku

b = sklon svahu

m, n = exponenty vyjadřující tendence k tvorbě eroze

m = 0,4 – 0,6

n = 1,2 – 1,3 (Moore, Wilson, 1992)

V prostředí GIS vypadá vyjádření tohoto vztahu následovně:

$$LS = \left(\frac{A_s * x}{22,13}\right)^{0,6} * \left(\frac{\sin\theta * 0,01745}{0,09}\right)^{1,3}$$

kde:  $A_s$  = rastr akumulace povrchového odtoku

x = rozlišení rastru

$\theta$  = sklon svahu v radiánech

#### 1.4 Topografický faktor v USLE2D

Rozdíl mezi topografickým faktorem v USLE2D a v USLE spočívá v tom, že horizontální projekce délky svahu (L faktor), je v USLE2D nahrazen jednotkou plochy, ze které proces eroze probíhá (Desmet & Grovers, 1996). Tuto plochu lze definovat jako jednotku plochy s vyšší nadmořskou výškou, ze které voda odtéká, na jednotku délky vrstevnice. USLE2D umožňuje analýzu erozních procesů v topograficky komplexních oblastech (Van Oost et al., 2000).

V USLE2D se faktory L a S vypočítají samostatně. Faktor S se získá stejným způsobem jako v USLE:

$$S = 10,8 * \sin\theta + 0,03 \quad \text{pro sklon menší než 9 \%}$$

$$S = 16,8 * \sin\theta - 0,5 \quad \text{pro sklon větší nebo roven 9 \%}$$

(McCool et al., 1997)

Pro výpočet faktoru L byla erodovaná plocha rozdělena na úseky, ze kterých povrchový odtok odtéká do stejné buňky v rastru. Šířka úseku tak závisí na směru odtoku a směru sklonu terénu (Desmet & Grovers, 1996).

$$L_{x,y} = \frac{((A_{x,y} + D^2)^{m+1} * (A_{x,y})^{m+1})}{(z_{x,y})^m * D^{m+2} * 22,13^m}$$

kde:  $L_{x,y}$  = hodnota faktoru délky svahu pro určitou buňku rastru se souřadnicemi x, y

$A_{x,y}$  = kontribuční plocha v  $m^2$  pro tutéž buňku

D = rozlišení rastru v m

$z_{x,y}$  = směr odtoku z této buňky

$m$  = exponent svahu

### 1.5 Topografický faktor v USPED

Tento model eroze je založený na hodnotě množství odtoku na jednotku plochy, která určuje prostorové rozložení eroze a míru sedimentace pro místa, kde jsou hodnoty dešťových srážek v průběhu času téměř konstantní. Podle modelu USPED je erozní proces limitován množstvím transportované hmoty. Dalším předpokladem je, že množství půdy přemísťované povrchovým odtokem pokaždé dosahuje maximální hodnoty transportní kapacity. Rozdíl mezi odnosem a sedimentem je vyjádřen jako změna v transportu sedimentu (Mitášová et al., 1996).

Při aplikaci topografického faktoru v USPED v prostředí GIS je třeba odlišit plošnou a soustředěnou (výmolnou, rýžkovou) erozi. Výpočet topografického faktoru vychází z rastrů akumulace odtoku a sklonitosti.

Výpočet pro soustředěnou erozi vypadá následovně:

$$LS = (A_s * x)^{0,6} * (\sin(\theta * 0,01745))^{1,3}$$

Výpočet pro plošnou erozi vypadá následovně:

$$LS = A_s * x * \sin(\theta * 0,01745)$$

kde:  $A_s$  = plocha akumulace (v prostředí GIS rastr akumulace povrchového odtoku)

$x$  = rozlišení rastru

$\theta$  = sklon svahu v radiánech (Mitášová et al., 1996)

## 2 Algoritmy pro výpočet LS faktoru v GIS

Výpočet LS faktoru v GIS vede v rámci mapování relativního ohrožení erozí k podobným výsledkům jako manuální výpočet. Mezi výpočty jsou ale rozdíly v absolutních hodnotách. Výsledné hodnoty sklonitosti jsou u obou metod stejné, avšak použití manuální metody může vést k podcenění erozního ohrožení, protože nezahrnuje konvergenci odtoku. (Hrabalíková, 2015)

Princip srovnávání různých algoritmů nebo rovnic pro výpočet LS faktoru je založen na výpočtu ztráty půdy z rovnice USLE. Výpočet LS faktoru v prostředí GIS zahrnuje použití digitálního modelu terénu. Většina dostupných algoritmů pro výpočet LS faktoru je součástí softwarů GIS, jako např. IDRISI, SAGA GIS, GRASS, Arc GIS a další. (Hrabalíková, Janeček, 2017)

### 2.1 Metody

#### 2.1.1 Manuální metoda podle Wischmeier, Smith (1978)

$$LS = (\lambda/22,13)^m * (65,4\sin^2\beta + 4,56\sin\beta + 0,0654)$$

kde:  $\lambda$  = délka svahu v m

$\beta$  = sklon svahu v radianech

$m = 0,5$  když  $\beta > 0,05$ ;  $m = 0,4$  když  $0,03 < \beta < 0,05$

$m = 0,3$  když  $0,01 < \beta < 0,03$ ;  $m = 0,2$  když  $\beta < 0,01$

#### 2.1.2 Manuální metoda podle McCool et al. (1989)

$$LS = (\lambda/22,13)^m * (10,8\sin\beta + 0,03) \text{ když } \beta < 0,09$$

$$LS = (\lambda/22,13)^m * (16,8\sin\beta - 0,5) \text{ když } \beta \geq 0,09$$

$$LS = (\lambda/22,13)^m * (3\sin^{0,8}\beta + 0,56) \text{ když } \lambda < 4,5 \text{ m}$$

kde:  $\lambda$  = délka svahu v m

$\beta$  = sklon svahu v radianech

$$m = F / (1 + F) \text{ kde } F = \frac{\sin(\beta)/0,0896}{\sin^{0,8}(\beta)+0,56} \text{ nebo } F = 0 \text{ když } \lambda \leq 4,5 \text{ m}$$

#### 2.1.3 Výpočet L faktoru podle Desmet, Goovers (1996) a S faktoru podle Nearing (1997)

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j),in.} + D^2)^{(m+1)} - A_{(i,j),in.}^{(m+1)}}{x_{(i,j)}^m * D^{(m+2)} * 22,13^m}$$

$$S = -1,5 + \frac{17}{(1+e^{(2,8-6,1\sin(\beta))})}$$

kde:  $D$  = velikost buňky

$$x_{i,j} = \sin a_{i,j} + \cos a_{i,j}$$

$a_{i,j}$  = hledisko směru buňky

$$m = F / (1 + F)$$

$\beta$  = sklon svahu v radianech

#### 2.1.4 Bodová metoda Griffin et al. (1988) pro L faktor a Moore, Wilson (1992) pro S faktor

$$L = (m + 1) * (A_s / 22,13)^m \quad S = (\sin\beta / 0,0896)^n$$

kde:  $m = 0,4$  (rozmezí 0,2-0,6);  $n = 1,3$  (rozmezí 1,0-1,3)

$A_s$  = jednotková zdrojová plocha odtoku

$\beta$  = sklon svahu v radianech

Výše uvedená manuální metoda výpočtu L faktoru může být také použita jako základ pro algoritmus výpočtu LS faktoru. Eroze může být následně získána jako:  $E = (m+1) * R * K * (A_s / 22,13)^m * S * C * P$  (Desmet, Govers, 1996)

#### 2.1.5 Metoda podle Moore, Burch (1986) a Moore, Wilson (1992)

$$LS = (A_s / 22,13)^m * (\sin\beta / 0,0896)^n$$

kde:  $m = 0,4$  (rozmezí 0,4-0,6);  $n = 1,3$  (rozmezí 1,0-1,3)

$A_s$  = jednotková zdrojová plocha odtoku

$\beta$  = sklon svahu v radianech

#### 2.1.6 Metoda podle Foster, Wischmeier (1974)

Dle této metody nelze svah nebo pole považovat za jednotný útvar. Proto svah rozdělili do několika segmentů, které považovali za jednotné ve sklonu a vlastnostech půdy. LS faktor se pro každý segment potom vypočítá jako:

$$LS_j = \frac{S_j * (\lambda_j^{m+1} - \lambda_{j-1}^{m+1})}{(\lambda_j - \lambda_{j-1}) * (22,13)^m}$$

kde:  $L$  = faktor délky svahu pro  $j$ -tý segment

$S_j$  = faktor sklonu pro  $j$ -tý segment

$\lambda_j$  = vzdálenost od spodní hranice  $j$ -tého segmentu k horní hranici svahu

$m$  = exponent délky LS faktoru

### 2.1.7 Algoritmus vytvořený Quinn et al. (1991)

Tento algoritmus počítá s centrální buňkou, kolem které je oblast rozdělena na sousedící buňky, které jsou umístěny na svahu níže. Frakce přijatá každou níže položenou buňkou je úměrná poklesu vzdálenosti a váhy a geometrickému váhovému faktoru, který závisí na směru:

$$A_i = \frac{A \cdot \operatorname{tg} \beta_i \cdot W_i}{\sum \operatorname{tg} \beta_j \cdot W_j}$$

kde:  $A_i$  = frakce odtékající skrz sousední buňku ( $\text{m}^2$ )

$A$  = výše položená oblast dostupná pro distribuci ( $\text{m}^2$ )

$\operatorname{tg} \beta_i$  = tangens úhlu sklonu k sousední buňce ( $\text{m}/\text{m}$ )

$W_i$  = váhový faktor

Pro výpočet jednotky přispívající plochy musí být přispívající plocha rozdělena podle efektivní délky vrstevnic. Výsledkem je délka vrstevnice v každé buňce, přes kterou může probíhat odtok. Posledně jmenované se rovná délce linie přes střed buňky a kolmici k poloze a vypočítá se jako:

$$D_{i,j} = D \cdot (\sin \alpha_{i,j} + \cos \alpha_{i,j}) = D \cdot x_{i,j}$$

kde:  $D_{i,j}$  = efektivní délka vrstevnic ( $\text{m}$ )

$D$  = velikost buňky ( $\text{m}$ )

$$x_{i,j} = (\sin \alpha_{i,j} + \cos \alpha_{i,j})$$

$\alpha_{i,j}$  = poloha buňky se souřadnicemi ( $i,j$ )

Jednotka přispívající plochy na vstupu do buňky může být vypočítána jako:

$$A_{\text{si},j-\text{in}} = A_{i,j-\text{in}} / D_{i,j}$$

kde:  $A_{i,j-\text{in}}$  = přispívající plocha na vstupu do buňky se souřadnicemi ( $i,j$ ) ( $\text{m}^2$ )

$D_{i,j}$  = efektivní délka vrstevnic ( $\text{m}$ )

$$A_{\text{si},j-\text{in}} = \text{jednotka přispívající plochy na vstupu do buňky se souřadnicemi } (i,j) \text{ (m}^2/\text{m)}$$

Na výstupu z buňky musí být hodnota vstupu navýšena o velikost buňky:

$$A_{i,j-\text{out}} = A_{i,j-\text{in}} + D^2$$

kde:  $A_{i,j-\text{out}}$  = přispívající plocha na výstupu z buňky se souřadnicemi ( $i,j$ ) ( $\text{m}^2$ )

$D$  = velikost buňky ( $\text{m}$ )

$A_{i,j-in}$  = přispívající plocha na vstupu do buňky se souřadnicemi (i,j) ( $m^2$ )

L faktor pro buňku se souřadnicemi i,j lze vypočítat jako:

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{m+2} * x_{i,j}^m * 22,13^m}$$

Hodnota sklonitosti pro každý bod mřížky studované oblasti může být vypočítána algoritmem Zevenbergen, Thorne (1987):

$$G_{i,j} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

kde:  $G_x$  = hodnota ve směru x (m/m)

$G_y$  = hodnota ve směru y (m/m)

LS faktor může být poté vypočítán vložním  $G_{i,j}$  a  $L_{i,j}$  do rovnice USLE. (Desmet, Govers, 1996)

#### 2.1.8 Metoda podle Wischmeier, Smith (1978)

$$LS = (A_s/22,13)^m * (65,4\sin^2\beta + 4,56\sin\beta + 0,0654)$$

kde:  $A_s$  = jednotková zdrojová plocha odtoku

$\beta$  = sklon svahu v radiánech

$m = 0,5$  když  $\beta > 0,05$ ;  $m = 0,4$  když  $0,03 < \beta < 0,05$

$m = 0,3$  když  $0,01 < \beta < 0,03$ ;  $m = 0,2$  když  $\beta < 0,01$

#### 2.1.9 Metoda podle McCool et al. (1989)

$$LS = (A_s/22,13)^m * (10,8\sin\beta + 0,03) \text{ když } \beta < 0,09$$

$$LS = (A_s/22,13)^m * (16,8\sin\beta - 0,5) \text{ když } \beta \geq 0,09$$

$$LS = (A_s/22,13)^m * (3\sin^{0,8}\beta + 0,56) \text{ když } \lambda < 4,5 \text{ m}$$

kde:  $A_s$  = jednotková zdrojová plocha odtoku

$\beta$  = sklon svahu v radiánech

$$m = F / (1 + F) \text{ kde } F = \frac{\sin(\beta)/0,0896}{\sin^{0,8}(\beta)+0,56} \text{ nebo } F = 0 \text{ když } \lambda \leq 4,5 \text{ m}$$

#### 2.1.10 Algoritmus výpočtu LS faktoru z RUSLE

Proces výpočtu LS faktoru z RUSLE se skládá z 11 kroků:

1. Vložení dat DMT (digitální model terénu).
2. Analýza dat DTM a zhodnocení, zda jsou vhodná data dostupná pro použití v modelu.



3. Pokud jsou vhodná data k dispozici, následuje vyplnění všech prázdných buněk ve zdroji dat iterativní metodou.
4. Použití metody D8 pro přidělení sklonu svahu, orientace svahu a směru odtoku.
5. Výpočet mezní hodnoty.
6. Použitím orientace svahu výpočet CSL (délka svahu v buňce).
7. Použití příčné metody vpřed a zpět pro výpočet akumulární plochy.
8. Výpočet DWESL pomocí dat směru odtoku, CSL dat a prahové hodnoty akumulární plochy. Postup výpočtu je uveden níže.
9. Určení faktoru délky svahu pomocí DWESL a exponentu délky svahu.
10. Určit složku stoupání sklonu použitím úhlu sklonu.
11. Výpočet LS faktoru.

#### 2.1.10.1 Výpočet DWESL

1. Vyžádání povolení k přesunu plovoucí matrice dynamické paměti operačního systému k přizpůsobení uživatelem definovanému DWESL.
2. Výchozí hodnota DWESL je CSL.
3. Začátek příčné metody vpřed z levé horní buňky.
4. Pokud má aktuální buňka mezní hodnotu, a směr odtoku ze sousedních 8 buněk je do aktuální buňky, a hodnota akumulární plochy je méně než hodnota prahu, pak je DWESL aktuální buňky součet CSL a délky svahu okolních buněk, ze kterých odtok směřuje do aktuální buňky.
5. Pokud je nový DWESL vyšší než předchozí hodnota DWESL, tak se DWESL aktuální buňky změní.
6. Pokračování příčné metody vpřed po buňkách a opakování kroků 4 a 5, do dosažení pravé dolní buňky.
7. Začátek příčné metody zpět z pravého dolního rohu buňku po buňce a opakování kroků 4 a 5 po dosažení levé horní buňky.
8. Pokračování procesu metod vpřed a zpět dokud nebude docházet k dalším změnám v buňkách.
9. Všechny buňky, které mají vyšší akumulární plochu než práh, jsou rovny 0. (Zhang et al., 2013)

### 3 Porovnání manuální a automatizované metody

Vzhledem k rozdílným výsledkům mezi manuálními a automatizovanými metodami, se nabízí otázka, který postup je nejlepší z praktického a který z teoretického hlediska.

Z praktického hlediska je patrné, že automatizované metody, použité v prostředí GIS, mají několik výhod. Všechny faktory mohou být ukládány, může s nimi být jednoduše manipulováno a mohou být jednoduše zobrazeny. Automatický výpočet LS faktoru je díky digitalizaci zemského méně časově náročný a méně únavný než manuální metody.

Z teoretického pohledu je manuální výpočet délky svahu z mapy velmi subjektivní, protože různí lidé mohou dosáhnout odlišných výsledků. Dalším omezením je měřítko, při kterém je průměrná ztráta půdy vypočítána. Manuální postupy jsou omezené počtem buněk. Pro automatizované postupy toto neplatí, ty umožňují pracovat s nekonečným počtem buněk. Na druhou stranu vyšší rozlišení může vést ke snížené přesnosti. Cílová přesnost je ovlivněna přesností digitálního modelu terénu a směrovacího algoritmu. Manuální metody selhávají u topograficky komplexních oblastí, protože nejsou schopné zachytit skutečný povrch. Manuální výpočet délky svahu je pouze průměr jednotky přispívající plochy, která může být efektivně vypočítána použitím automatických metod.

Celkově se dá konstatovat, že automatické metody nabízí více praktických a teoretických výhod než metody manuální. (Desmet, Govers, 1996)

### 4 Stanovení sklonu terénu

Základní funkcí v softwaru ArcGIS je funkce *Slope*. Pro tuto metodu se používá označení ANS (average-neighbourhood slope). Vzdálenost mezi jednotlivými body je označena jako Cell-Size. (Dunn, Hickey, 1998)

Nástroj *Slope* stanovuje pro každou buňku rastru maximální míru odlišnosti mezi hodnotou v buňce a hodnotami v okolních buňkách. Největší rozdíl značí největší sklon svahu. Pro ilustraci výpočtu se buňky označí písmeny abecedy, kdy buňka vlevo nahoře bude „a“ a buňka vpravo dole „i“. Prostřední buňka bude označena jako „e“. Rozdíl (delta) v horizontálním ( $dZ/dX$ ) a vertikálním směru ( $dZ/dY$ ) od buňky uprostřed určuje, jak svah probíhá. Pro výpočet sklonu terénu se používá algoritmus:

$$ANS(e) = \tan^{-1}\left(\sqrt{\left(\frac{dZ}{dX}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dY}\right)^2}\right) \text{ (Dunn, Hickey, 1998)}$$

Výpočet pro rozdíl v horizontálním směru pro buňku „e“ se provede jako  $[(dX/dZ)=((c+2f+i)(a+2d+g))/(8*x\_cellsize)]$  a ve vertikálním směru jako  $[(dZ/dY)=((g+2h+i)(a+2b+c))/(8*y\_cellsize)]$ . (Burrough, McDonell, 1998)

Další metodou, kterou lze použít pro určení sklonu je metoda DHS (down-hill slope). Stejně jako předchozí metoda je zde sklon svahu určován z prostřední buňky. V tomto případě vypadá algoritmus následovně:

$$DHS(e) = \tan^{-1}\left(\max\left(\frac{Z_e - Z_j}{L_j}\right)\right)$$

kde:  $Z_e$  = nadmořská výška v prostřední buňce

$Z_j$  = hodnota nadmořské výšky té z okolních buněk, která má oproti prostřední buňce nejnižší hodnotu

$L_j$  = pro buňky v ortogonálním směru (b, d, h, f) odpovídá  $x\_cellsize$  a pro buňky v diagonálním směru (a, c, g, i) odpovídá hodnotě  $*x\_cellsize$  (Dunn, Hickey, 1998)

Ashraf et al. (2012) porovnává metody na modelech terénu s odlišným rozlišením (1 m, 5 m, 10 m), které byly vytvořeny z dat LiDAR a na modelech terénu vytvořených z bodové vrstvy o rozlišení 1 m a 10 m. Součástí hodnocení algoritmů bylo také porovnání výsledků obou metod na stejném modelu terénu a porovnání výsledků mezi různými modely terénu. Hlavní rozdíly mezi jednotlivými metodami se projevily v místech směru odtoku. Rozdíly byly nejvíce patrné na rastrech, které byly vytvořeny z dat s vysokým rozlišením. Vyšších hodnot zde zpravidla dosahovaly rastry vytvořené metodou ANS. Příčinou vyšších hodnot je, že metoda ANS neřeší vliv samotné buňky, od které se svah odvozuje (buňka „e“), což má za následek vznik chybných údajů o sklonech převážně v okolí linií povrchového odtoku. Z výše uvedeného plyne, že je pro modely terénu s vysokou přesností vhodnější metoda DHS než metoda ANS.

## 5 Stanovení směru odtoku

Pro výpočet LS faktoru v prostředí ArcGIS je třeba zjistit směr odtoku z každé buňky rastru. V softwaru ArcGIS od společnosti ESRI se pro stanovení odtoku používá nástroj *Flow Direction*.

Jako zdrojový rastr se zde používá digitální model zemského povrchu (např. DEM nebo DMT. Možnost *Output Drop* zde slouží k tvorbě rastru, jehož výsledkem jsou směry odtoku z každé buňky, které jsou založeny na poměru výškových rozdílů mezi jednotlivými buňkami a vzdálenosti mezi středy buněk. Vzdálenost dvou diagonálně umístěných buněk lze vypočítat jako  $\sqrt{2}$ , vzdálenost ortogonálních buněk se vždy rovná 1. Výsledkem možnosti *Force all edge cells to flow outward* je směřování odtoku z krajních buněk směrem ven z rastru.

Všechny buňky v rastru, s výjimkou krajních buněk, jsou obklopeny 8 dalšími buňkami. Z čehož vyplývá, že k odtoku může docházet osmi různými směry. Výsledkem tohoto algoritmu je nový rastr, kde je každé buňce přidělen kód, který označuje směr, kterým bude voda odtékat z buněk původního rastru.

Pokud je hodnota dané buňky nižší než hodnota všech sousedních buněk, není umístěna na okraji rastru a zároveň nesousedí s buňkou s hodnotou NoData, potom bude tato buňka vyhodnocena jako buňka, z níž voda neodtéká (sink cell). Označení sousedních buněk, z nichž odtéká povrchový odtok do sousední buňky, probíhá stejným způsobem. Pro získání co nejpřesnějších informací o povrchovém odtoku daného území je vhodné tyto buňky identifikovat před použitím nástroje *Flow Direction* nástrojem *Sink*. (Jenson, Domingue, 1988)

Pro zachycení odtoku ve více směrech se používá nástroj *Multiple Flow Direction*. Tento algoritmus rozdělí odtok do okolních buněk, pokud mají nižší hodnotu než buňka, ze které voda odtéká. Směr odtoku se určí podle hodnot okolních buněk, kterým je přidělena určitá váha. Odtok probíhá primárně do buněk s nižší hodnotou, protože ta má vyšší váhu. (Cooper, 2013)

Výše uvedené algoritmy nazýváme D8. Dále existuje metoda  $D_{\infty}$ , která není omezena tím, že odtok může probíhat pouze osmi možnými směry. (Fairfield, Leymarie, 1991)  $D_{\infty}$  rozděljuje směr odtoku proporcionálně mezi sousední buňky na základě vzdálenosti skutečného směru odtoku k přímému směru do středu buňky. Tato metoda vytvoří mezi každým bodem a osmi sousedními body osm trojúhelníkových rovinných úseků. Každý úsek má spádový vektor, který vychází ze středu plochy a jeho směr může spadat nebo vybočovat ze  $45^{\circ}$  rozpětí úseku. Pokud spádový vektor náleží do daného rozsahu, zobrazuje nejstrmější směr toku v daném úseku. V případě, že z

tohoto rozpětí vybočuje, tak se za nejstrmější směr toku v daném úseku považuje úsek podle nejstrmější hrany. Nejstrmější ze všech osmi spádových vektorů je považován za směr odtoku přiřazený danému bodu. Pokud je buňka označena jako unresolved (nevyřešená), znamená to, že pro buňku neexistuje hodnota sklonu svahu. Tato situace se dále řeší metodou D8, která nasměruje odtok do místa s nižší hodnotou a zabrání tak nesrovnalostem. (Tarboton, 1997)

## **6 Stanovení akumulace odtoku**

Pro stanovení akumulace odtoku se v programu ArcGIS používá nástroj *Flow Accumulation*. V tomto nástroji je akumulovaný odtok počítán jako váha všech buněk směřujících do každé buňky s nižší hodnotou. V případě absence rastru, který reprezentuje váhy jednotlivých buněk, funkce *Flow Accumulation* přidělí každé buňce hodnotu 1. Hodnota ve výsledném rastru pak odpovídá počtu buněk, které do každé buňky směřují (Jenson & Domingue, 1988).

Stejně jako pro stanovení směru odtoku, existují pro akumulaci odtoku pokročilejší nástroje, které poskytují výsledky, které jsou bližší reálné situaci.

Jedním z nástrojů sloužících k modelování erozních procesů je nástroj *Transport Limited Accumulation*. Pro tuto funkci je třeba rastr směru odtoku, vytvořený metodou  $D_{\infty}$ , rastry reprezentující zásobu materiálu nebo půdy, transportní kapacitu odtoku nebo rastr udávající koncentraci látek v půdě. Výsledný rastr vážené akumulace materiálu respektuje limity transportní kapacity půdy. (Tarboton, 2015)

## **Metodika**

### **1 Vymezení řešeného území**

Pro bakalářskou práci byla zvolena katastrální území Rybňany, Selibice a Zálužice nad Ohří nacházející se v Ústeckém kraji východně od Žatce.

### **2 Použitá data**

Pro tuto práci byla použita data půdních bloků získaná z portálu Veřejného registru půdy LPIS. Dále byla použita data vrstevnic poskytnutá vedoucím práce.

### 3 Výpočet LS faktoru

Praktická část bakalářské práce byla vypracována v programu ArcMap verze 10.6.1, který je součástí softwaru ArcGIS od společnosti ESRI.

V rámci praktické části bakalářské práce bylo vytvořeno 12 rastrů LS faktoru, označených jako Metoda 1-12. Součástí jednotlivých výsledků jsou i rastry směru a akumulace odtoku. Pro výpočet LS faktoru byl ve všech metodách zvolen následující postup:

Vytvoření digitálního modelu terénu.

Tvorba rastru sklonitosti.

Tvorba rastru směru odtoku.

Tvorba rastru akumulace odtoku.

Tvorba rastru LS faktoru.

Následující tabulka zobrazuje rozdíly v rámci jednotlivých metod:

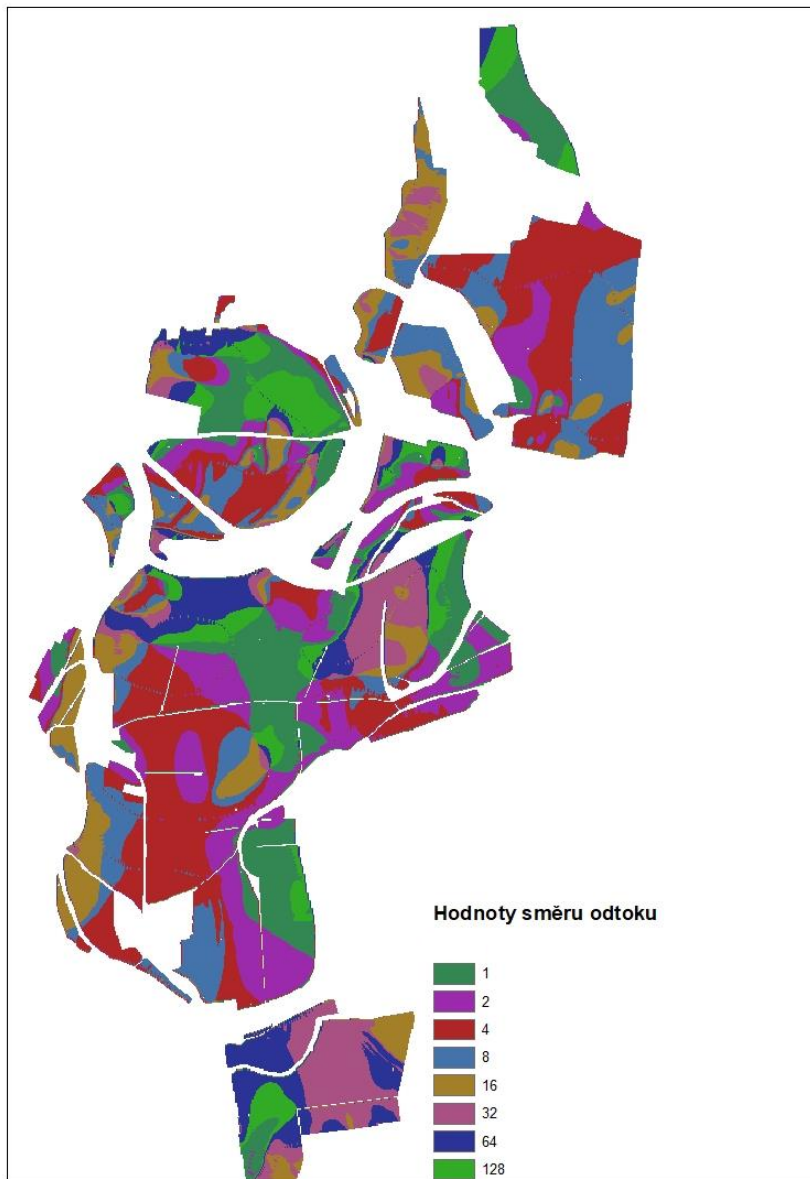
	Rozlišení (m)	Použití možnosti <i>Force all edge cells to flow outward</i>	Metoda tvorby rastrů směru a odtoku
Metoda 1	5	NE	D8
Metoda 2	10	NE	D8
Metoda 3	15	NE	D8
Metoda 4	5	ANO	D8
Metoda 5	10	ANO	D8
Metoda 6	15	ANO	D8
Metoda 7	5	NE	DINF
Metoda 8	10	NE	DINF
Metoda 9	15	NE	DINF
Metoda 10	5	ANO	DINF
Metoda 11	10	ANO	DINF
Metoda 12	15	ANO	DINF

Tab. 1: Přehled rozdílů v tvorbě rastrů

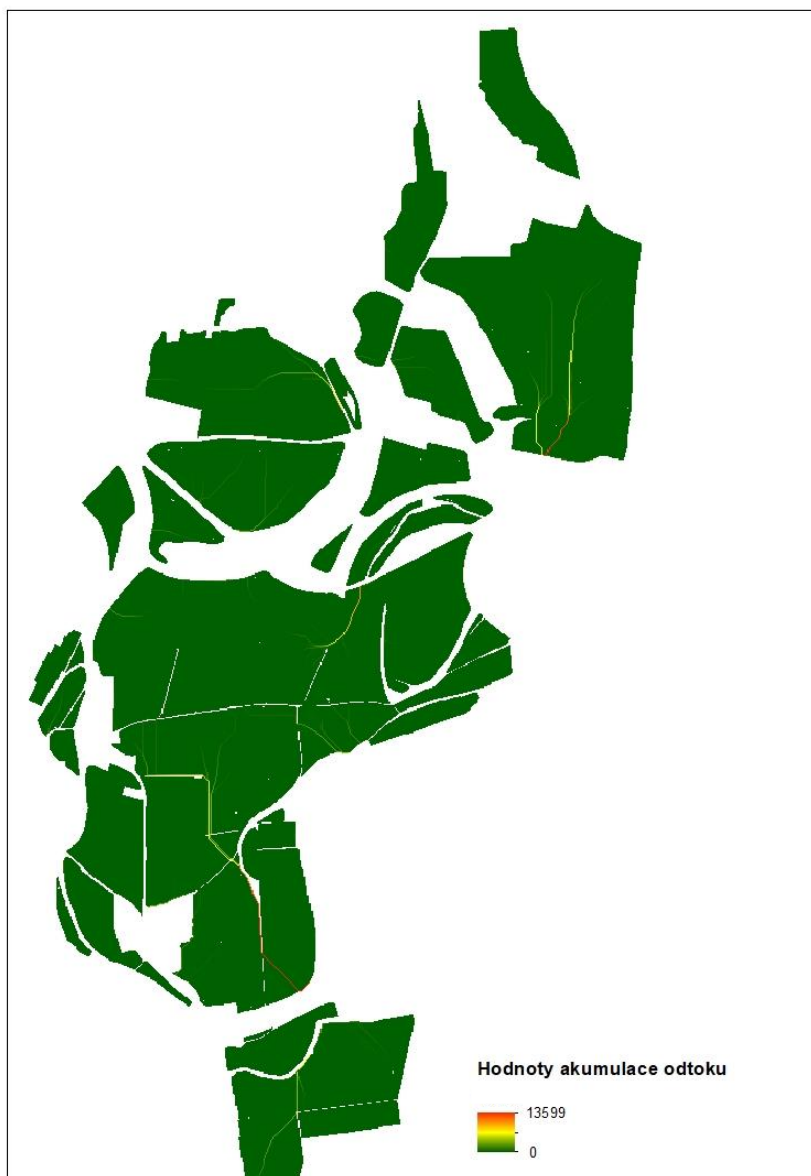
Všechny rastry byly vytvořeny v měřítku 1:18 000.

# Výsledky

## 1 Metoda 1

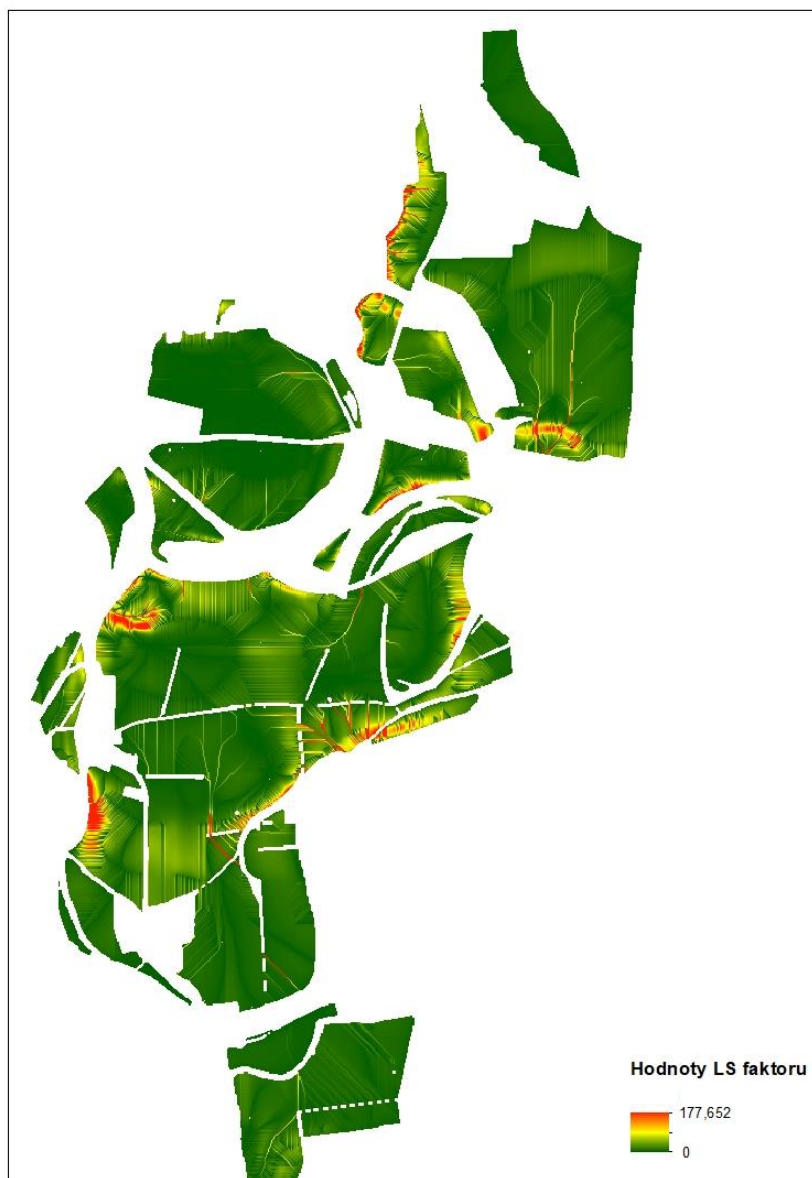


Obr. 1: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 1.



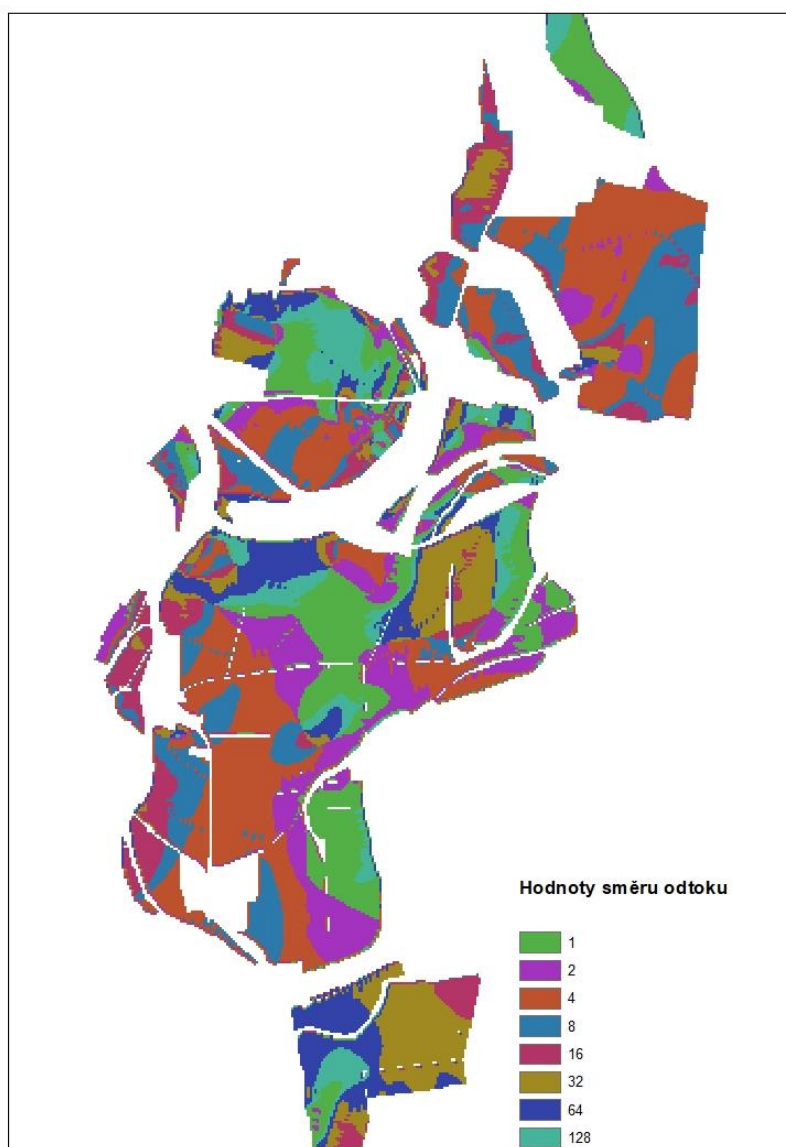
Obr. 2: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 1.





Obr. 3: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 1.

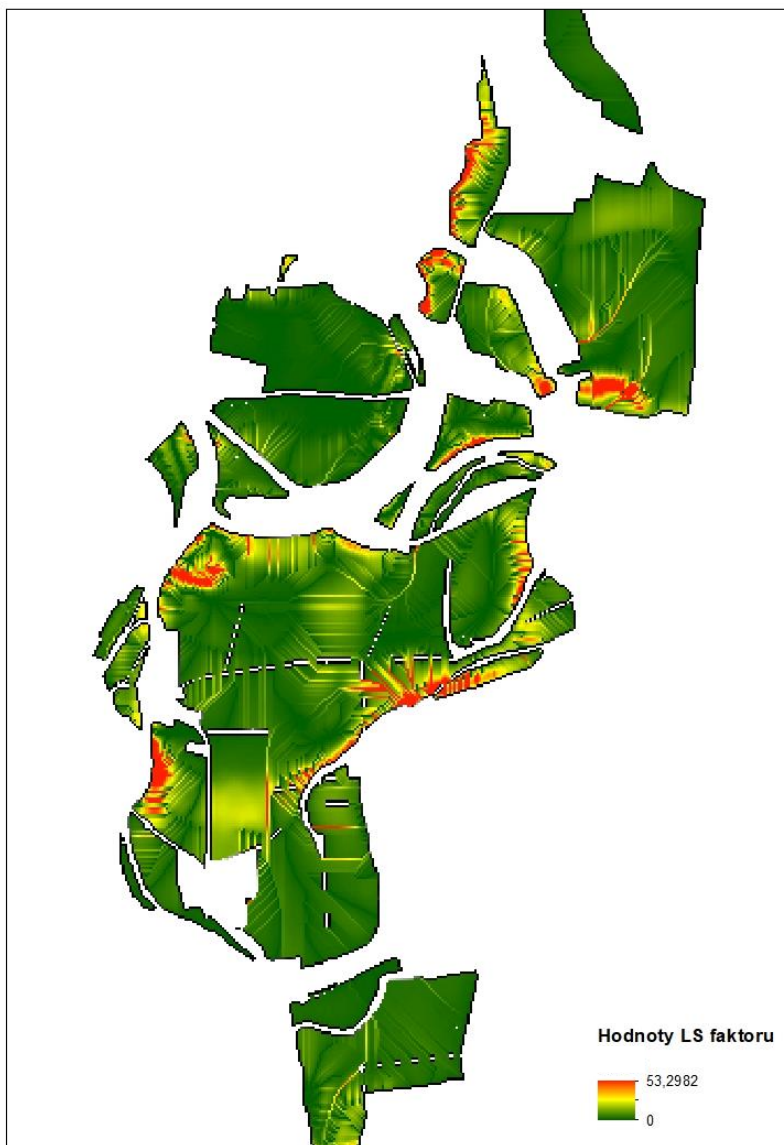
## 2 Metoda 2



Obr. 4: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 2.

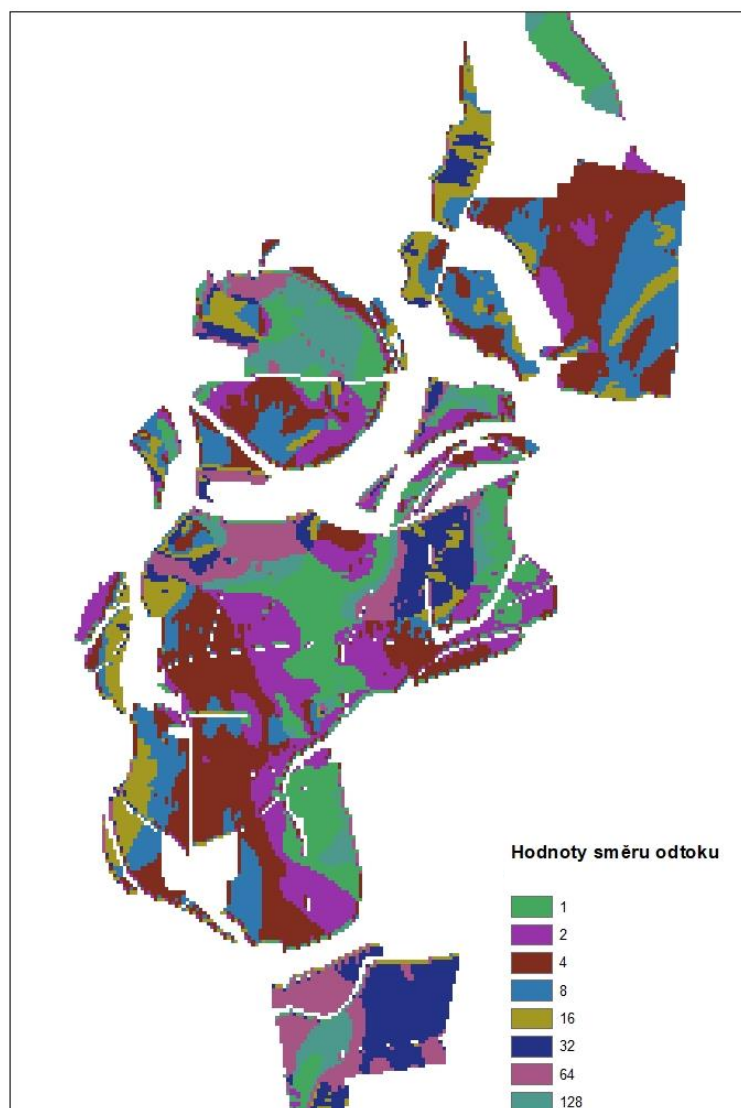


Obr. 5: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 2.

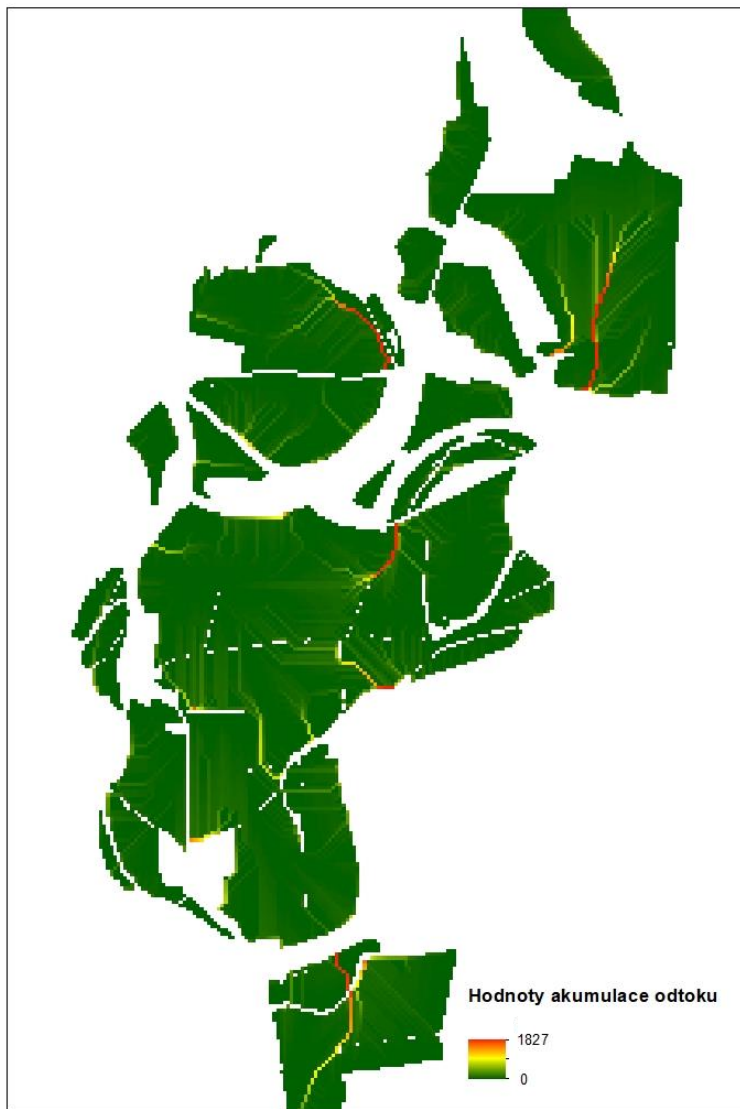


Obr. 6: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 2.

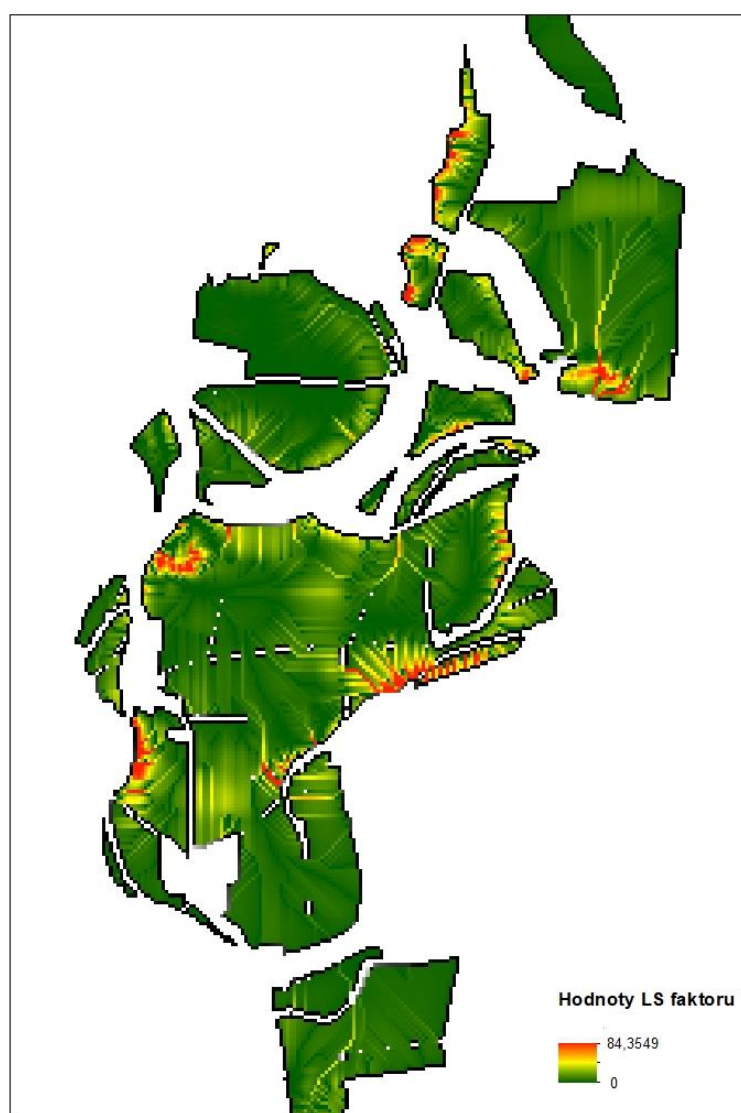
### 3 Metoda 3



Obr. 7: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 3.

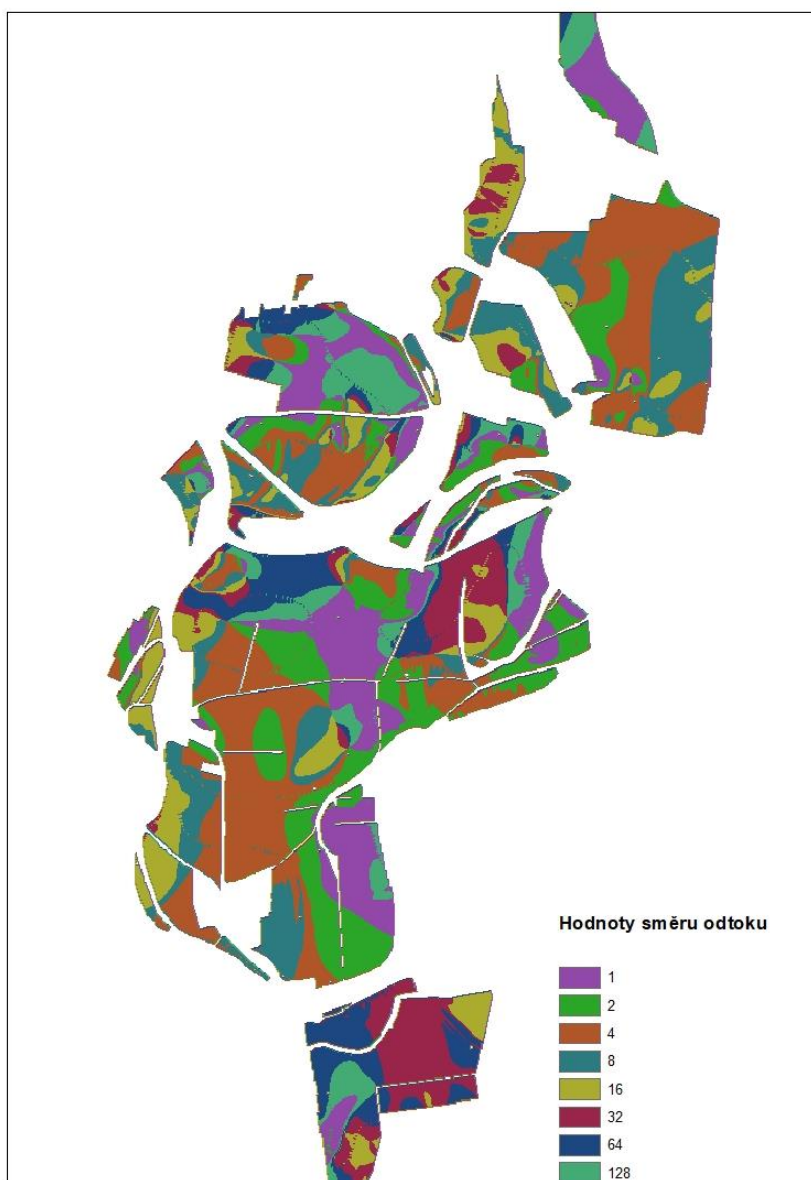


Obr. 8: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 3.



Obr. 9: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 3.

#### 4 Metoda 4

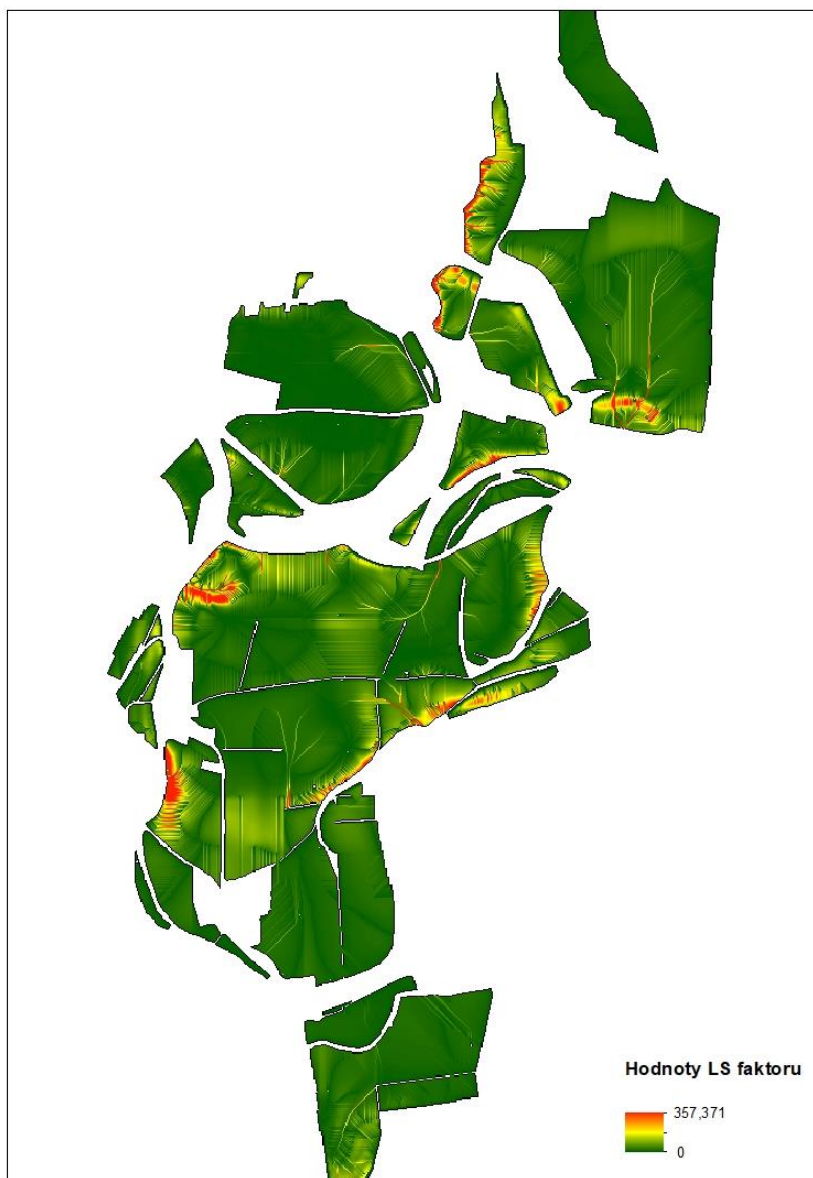


Obr. 10: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 4.



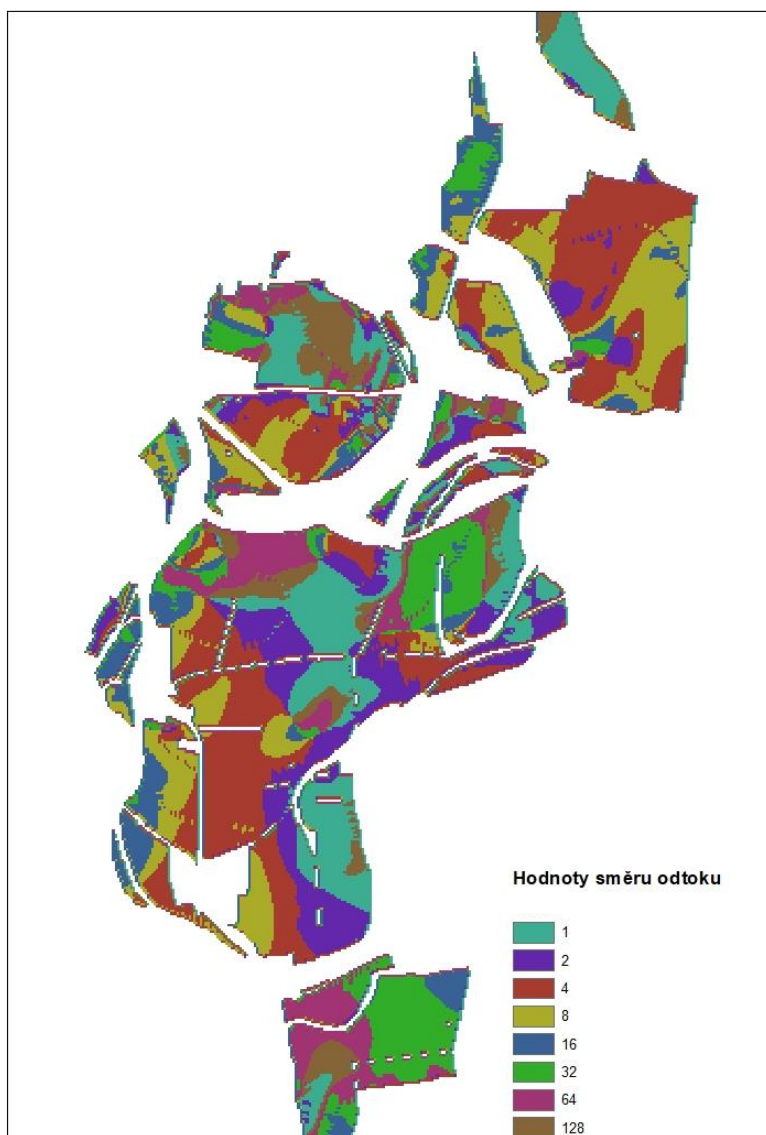


Obr. 11: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 4.



Obr. 12: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 4.

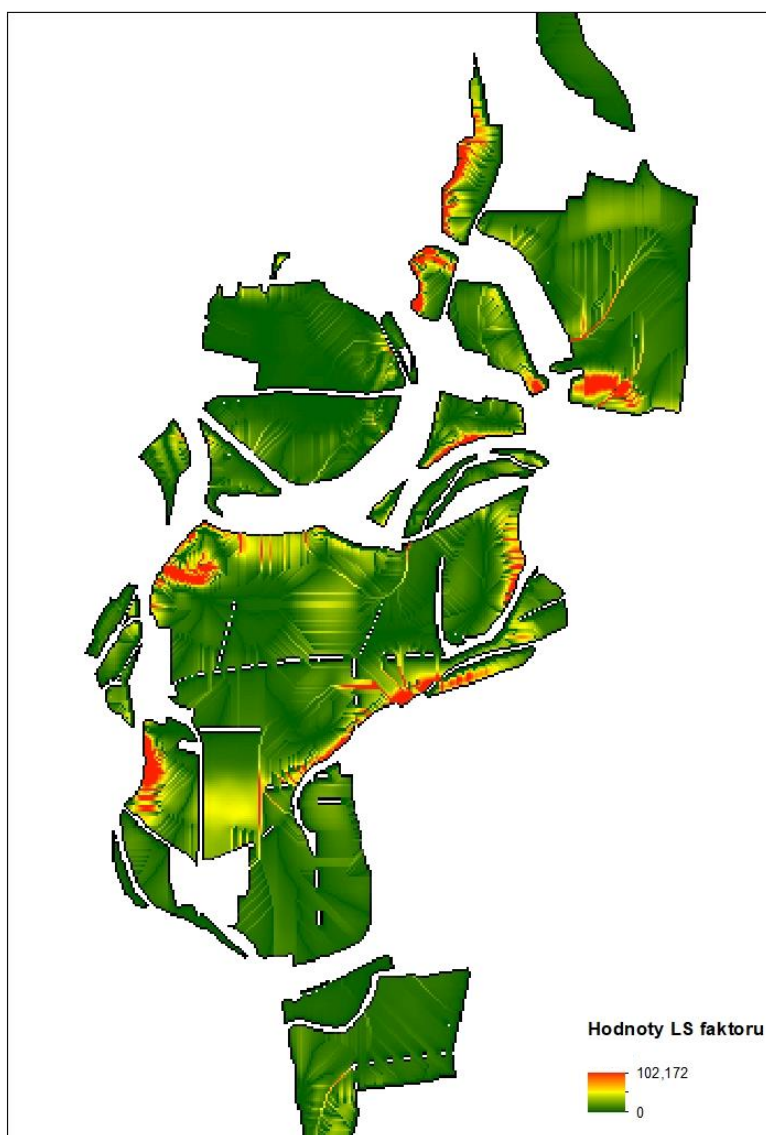
## 5 Metoda 5



Obr. 13: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 5.

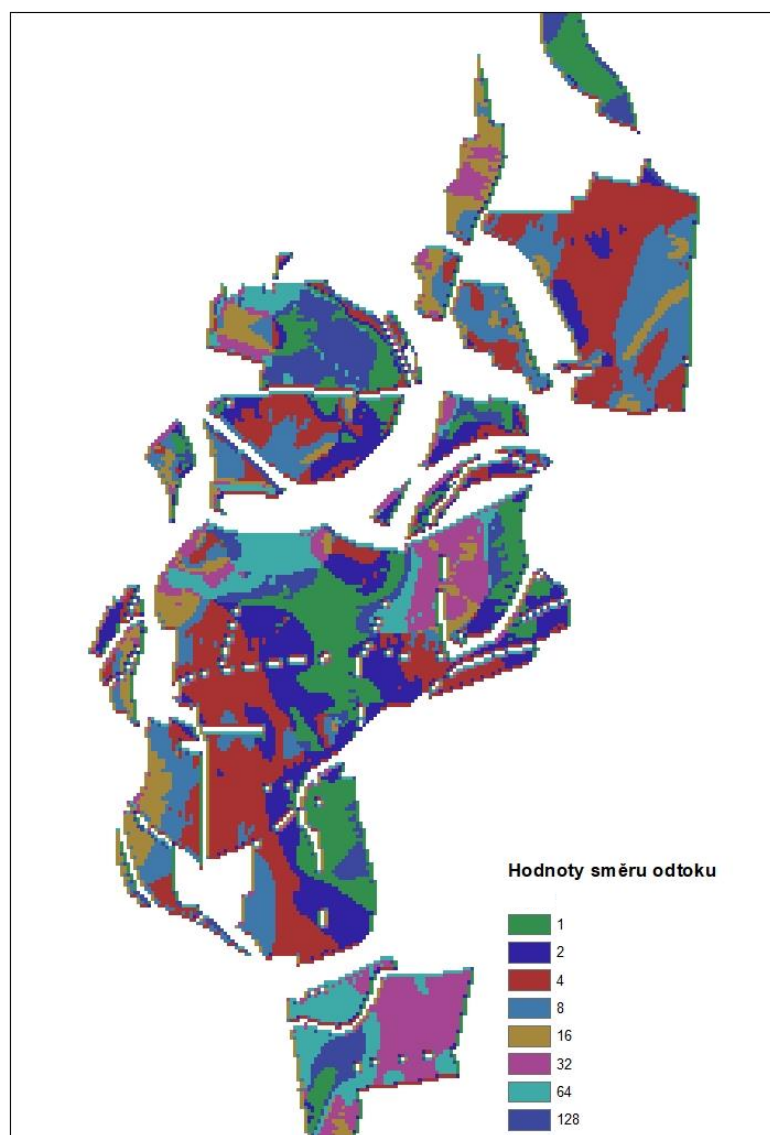


Obr. 14: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 5.

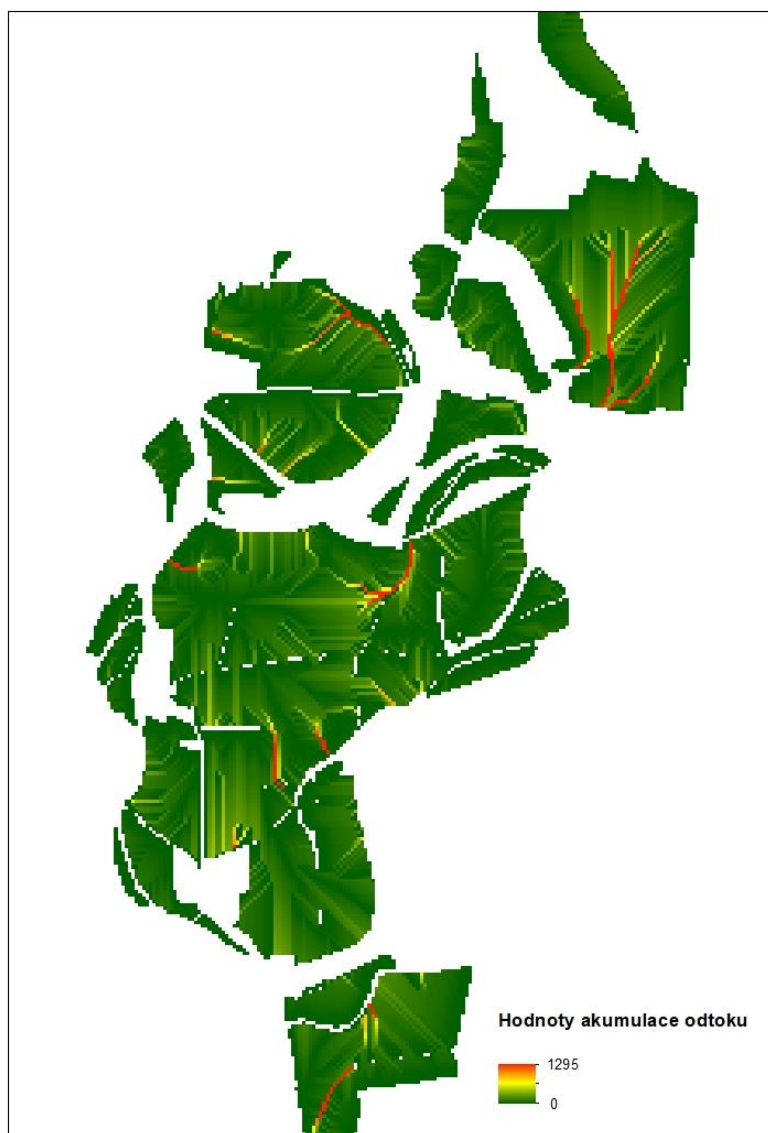


Obr. 15: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 5.

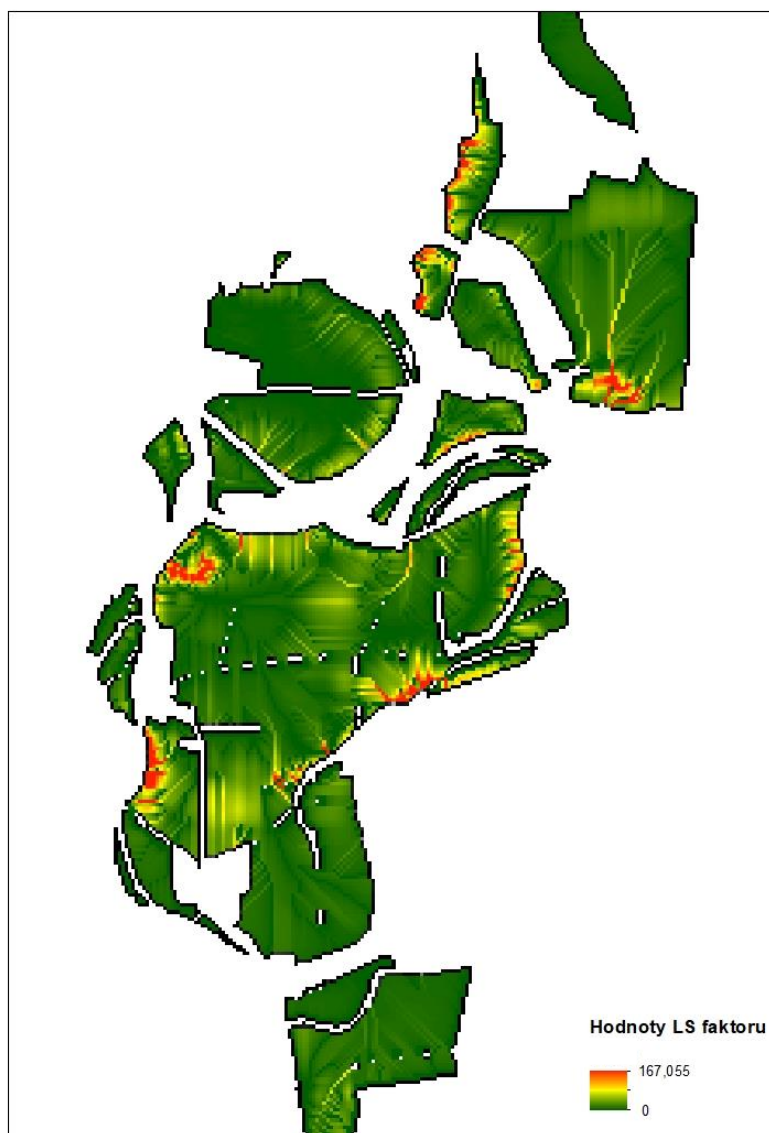
## 6 Metoda 6



Obr. 16: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 6.



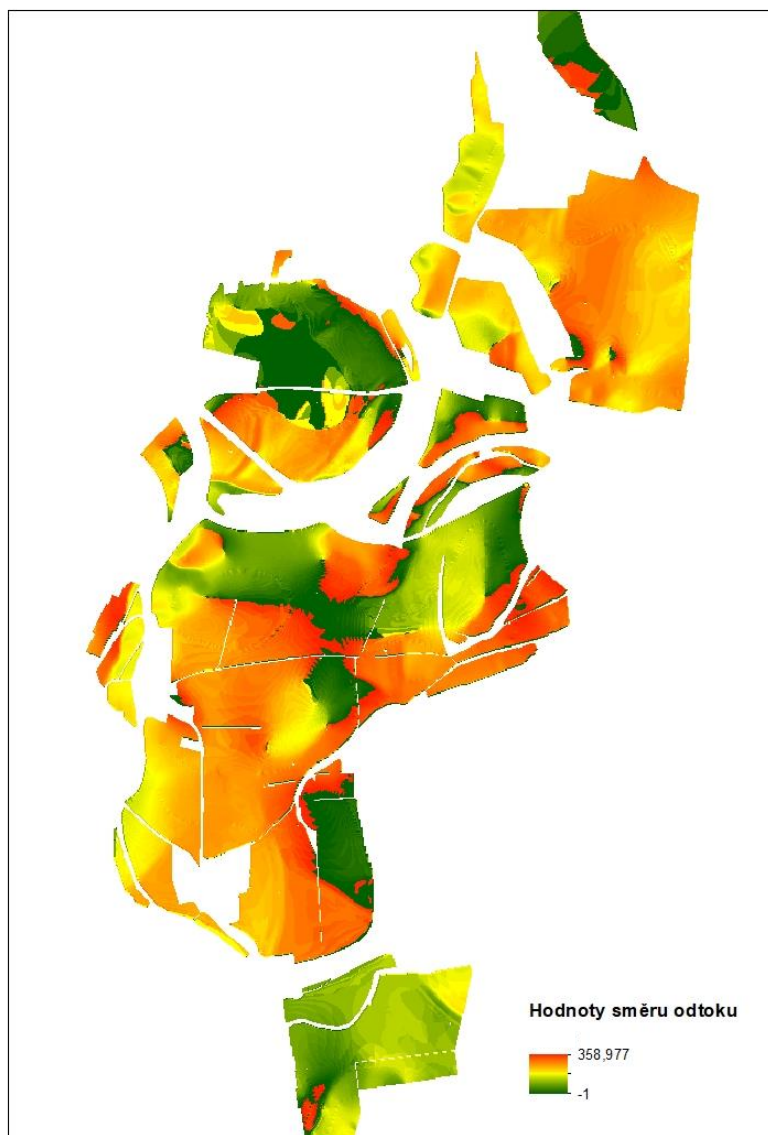
Obr. 17: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 6.



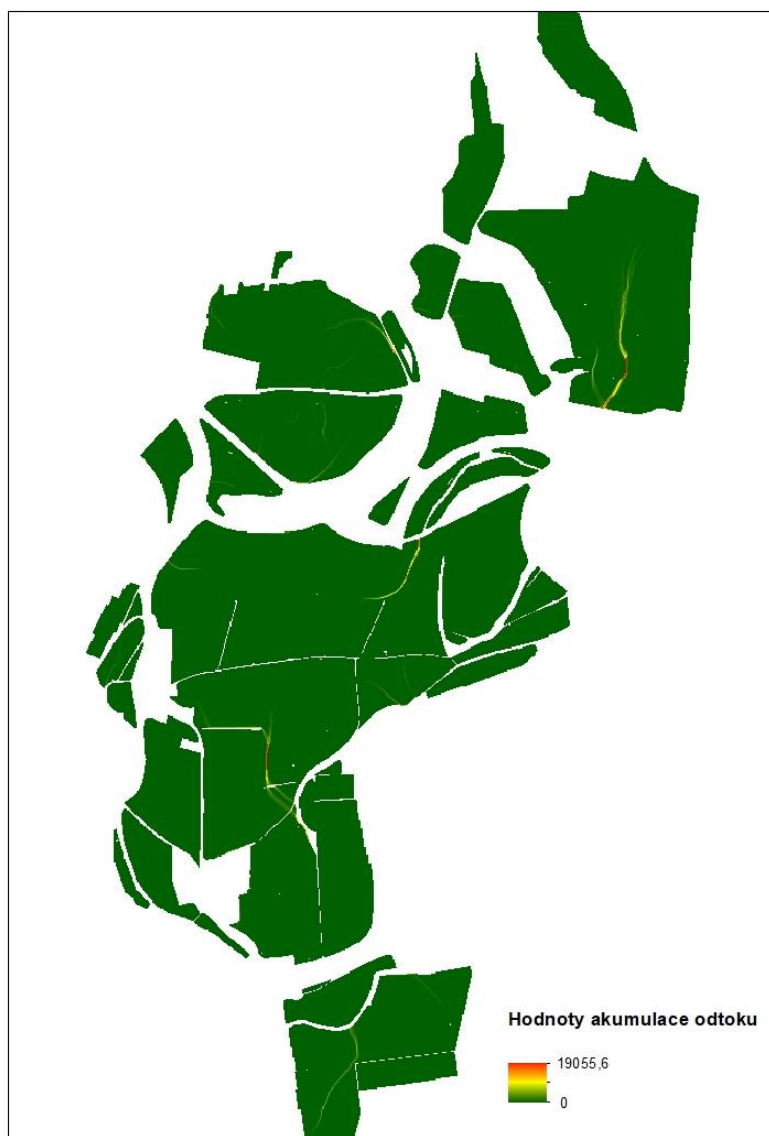
Obr. 18: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 6.



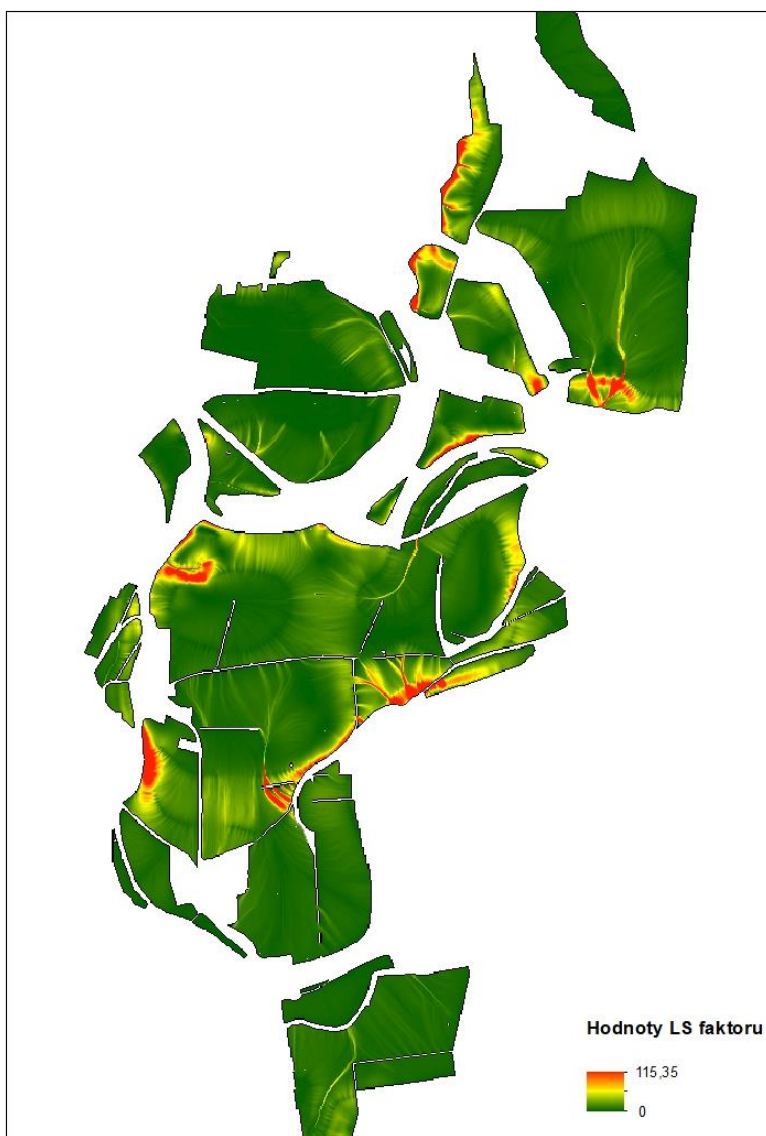
## 7 Metoda 7



Obr. 19: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 7.

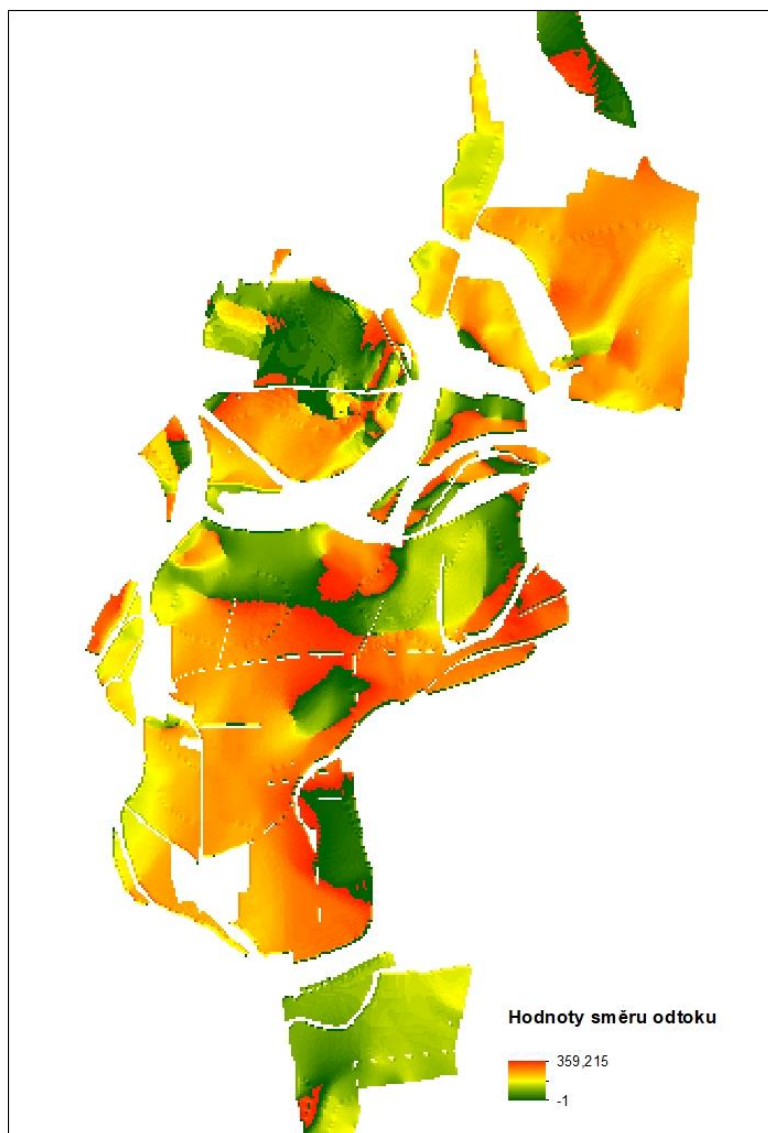


Obr. 20: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 7.

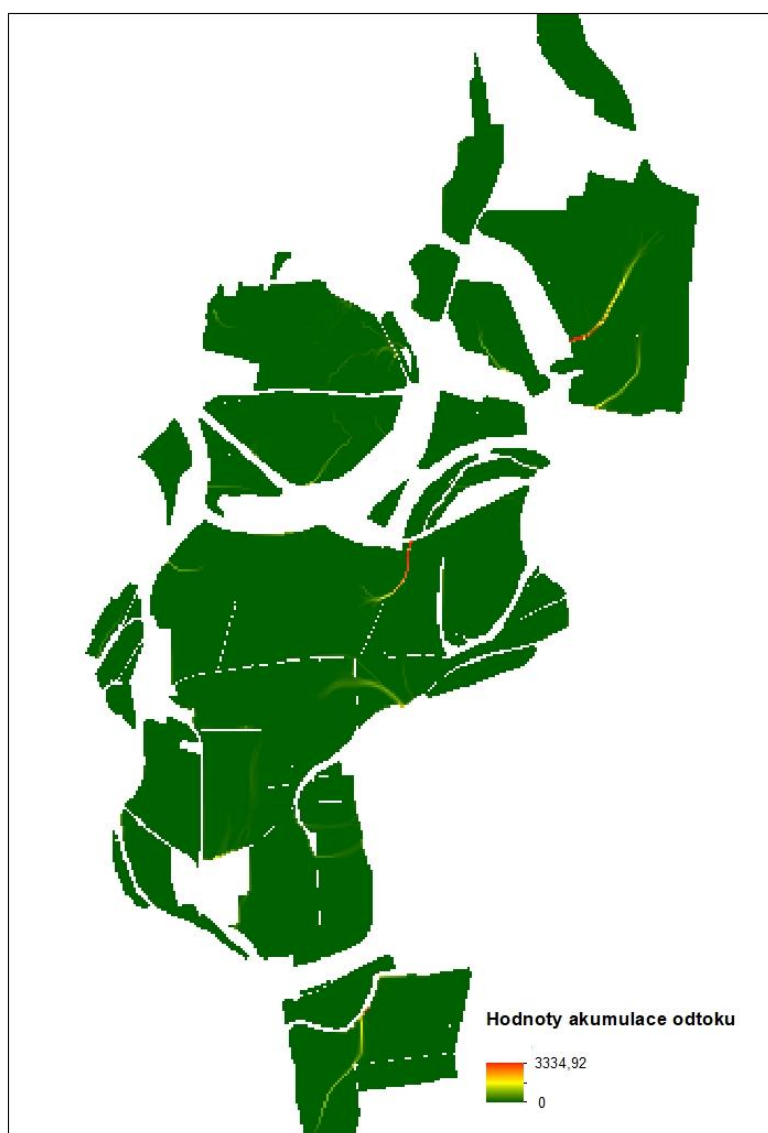


Obr. 21: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 7.

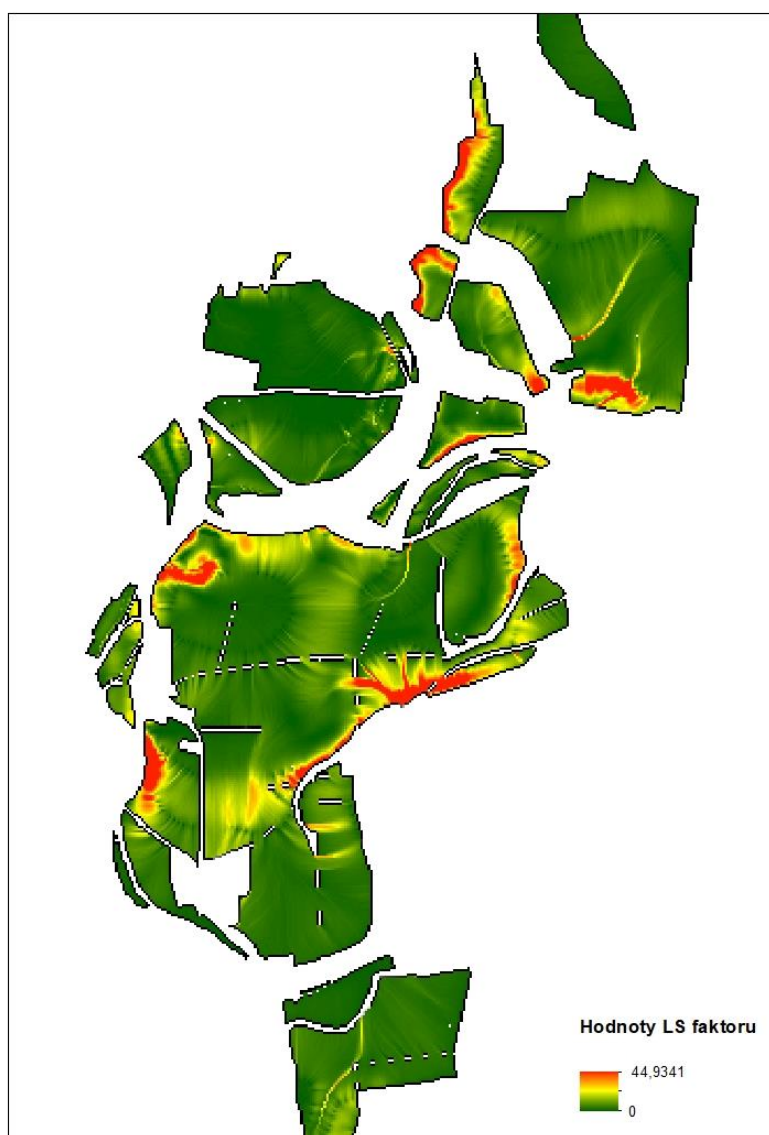
## 8 Metoda 8



Obr. 22: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 8.



Obr. 23: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 8.

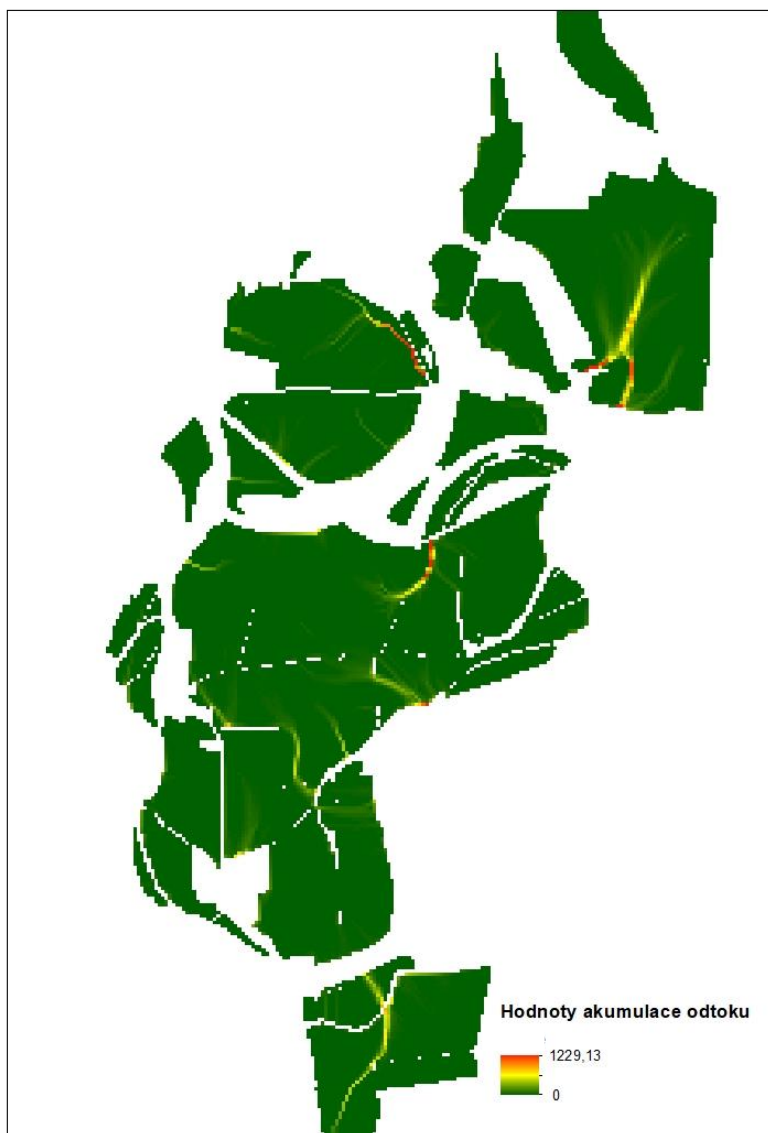


Obr. 24: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 8.

## 9 Metoda 9

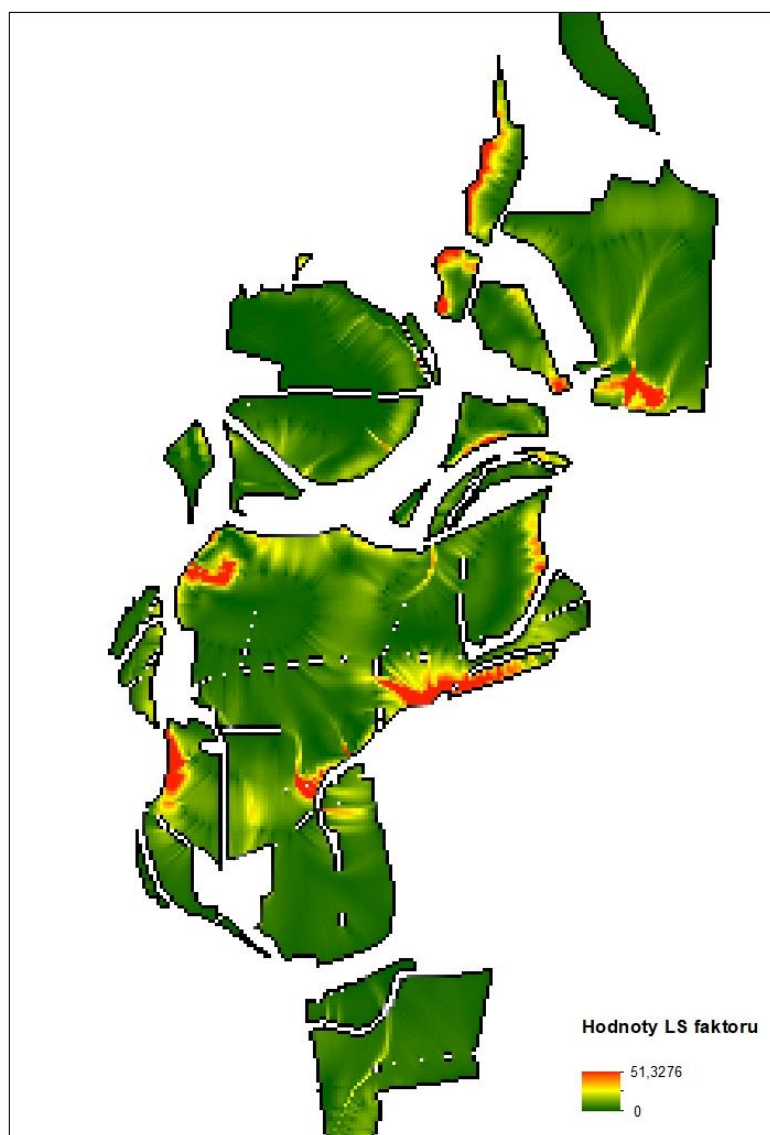


Obr. 25: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 9.



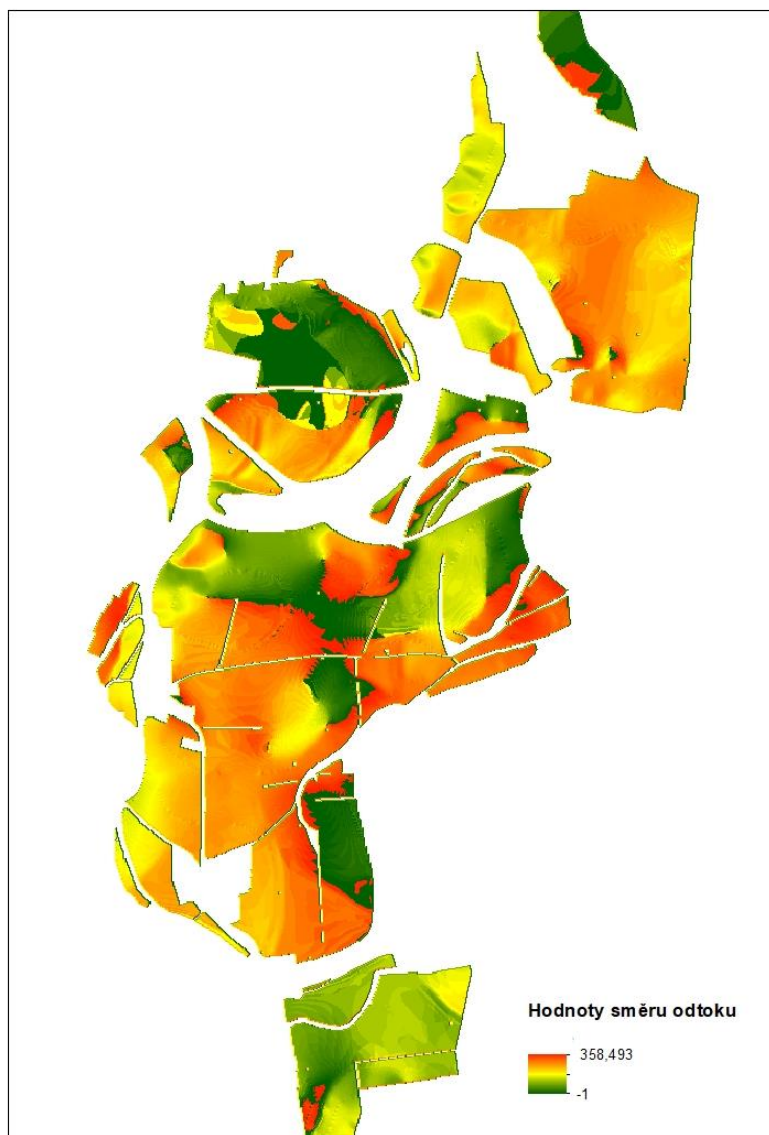
Obr. 26: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 9.



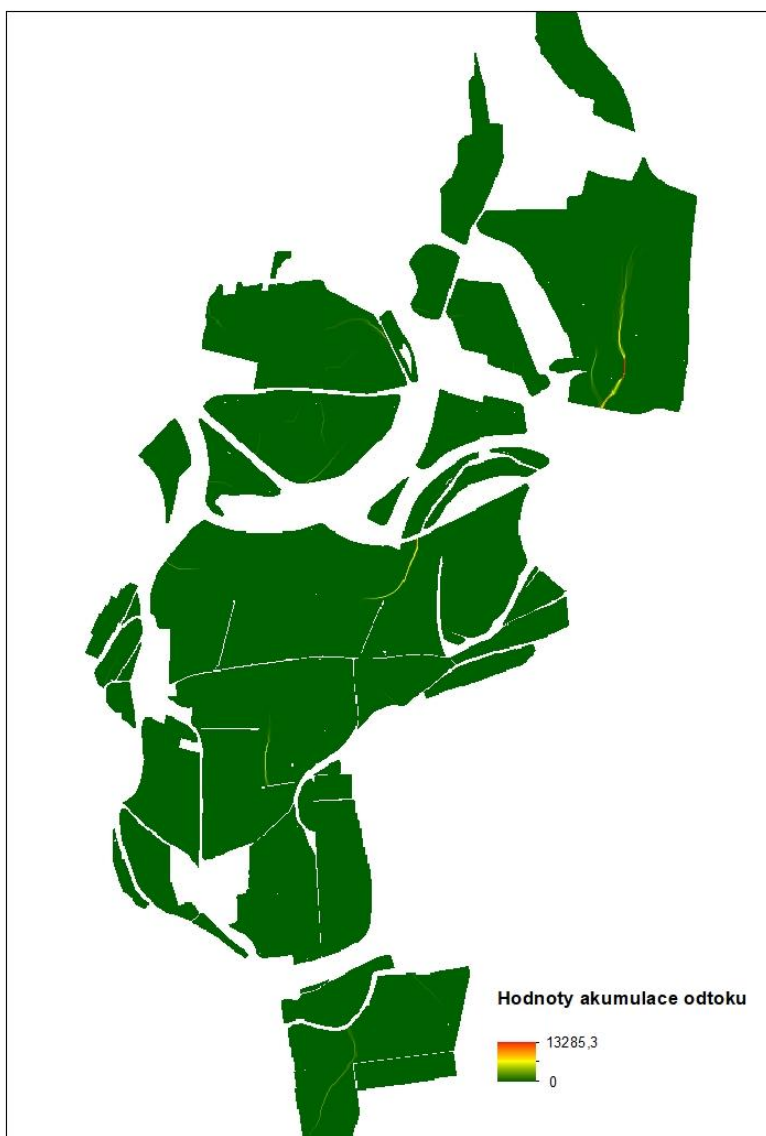


Obr. 27: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 9.

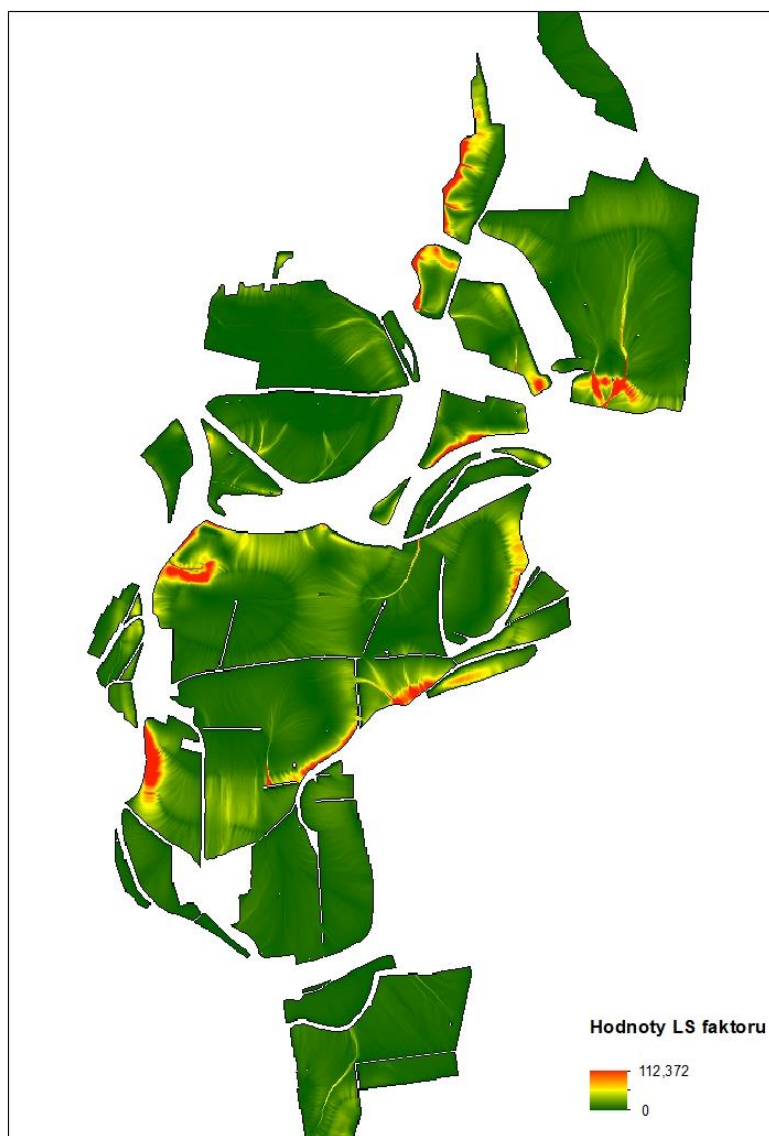
## 10 Metoda 10



Obr. 28: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 10.

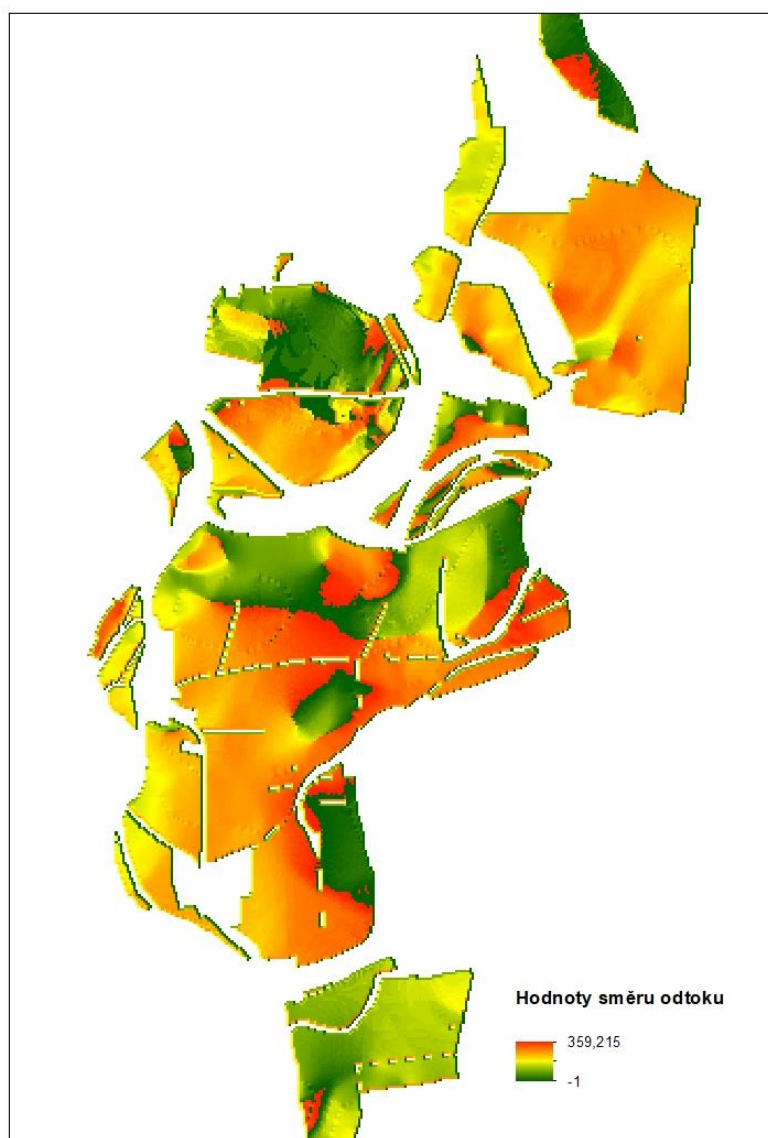


Obr. 29: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 10.

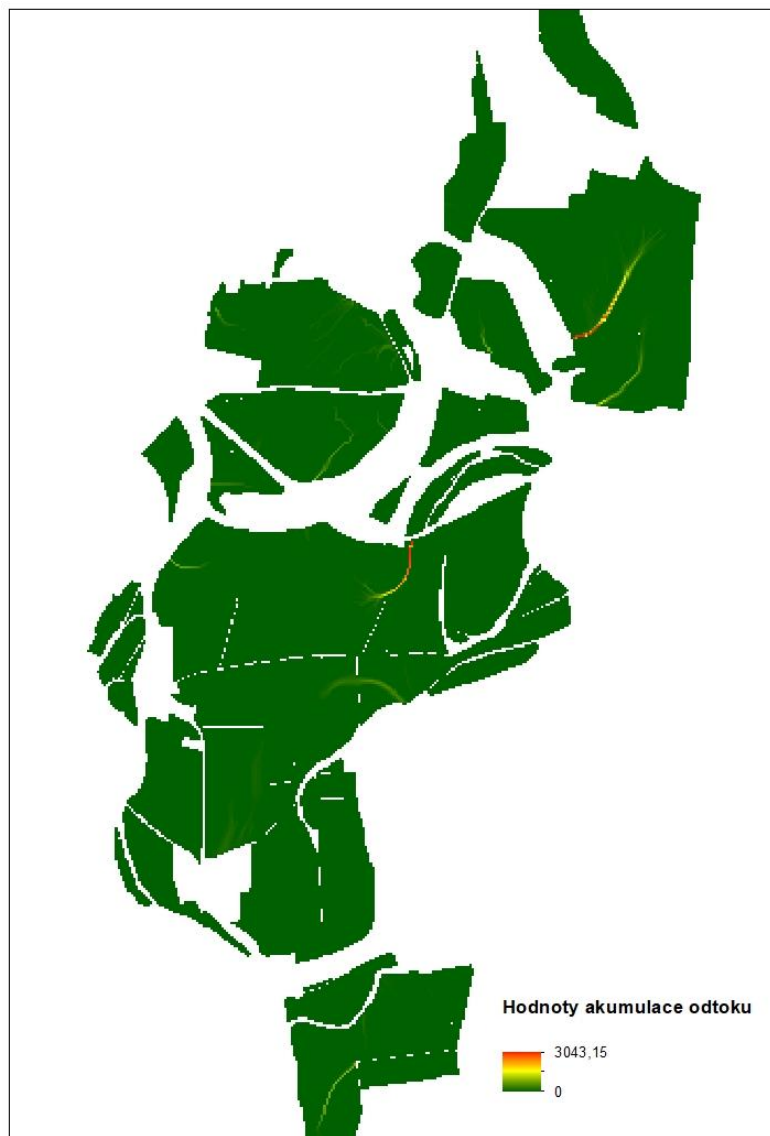


Obr. 30: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 10.

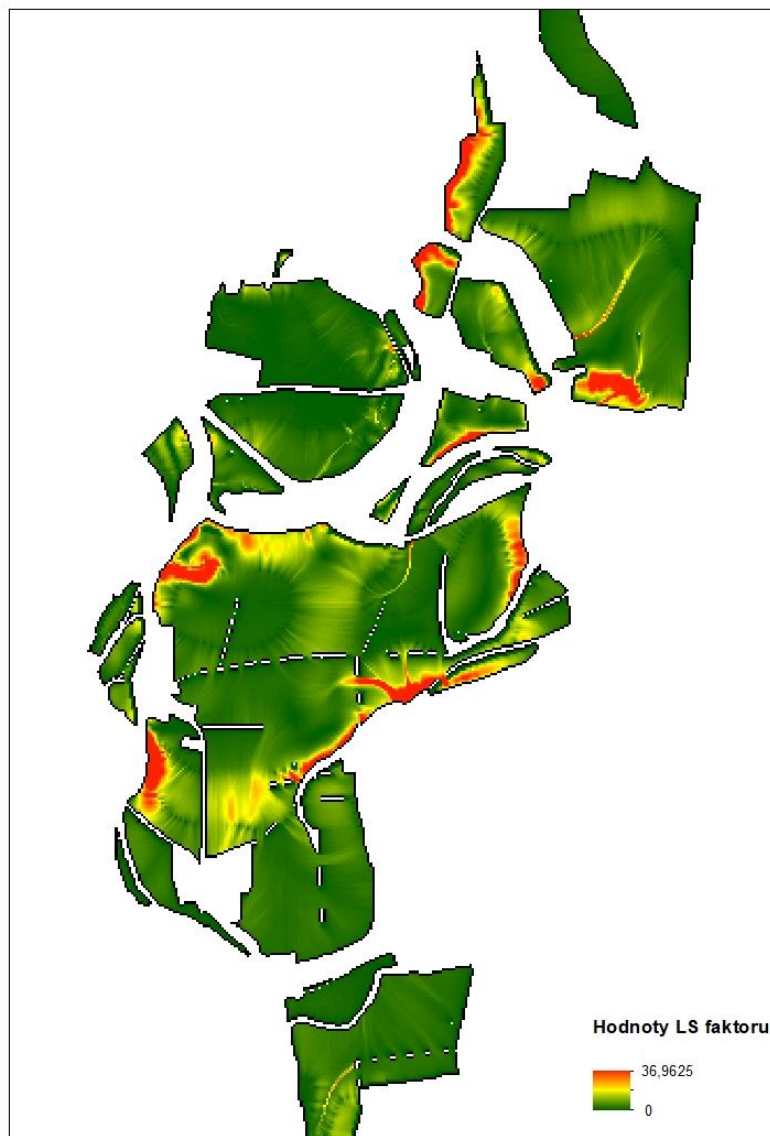
## 11 Metoda 11



Obr. 31: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 11.

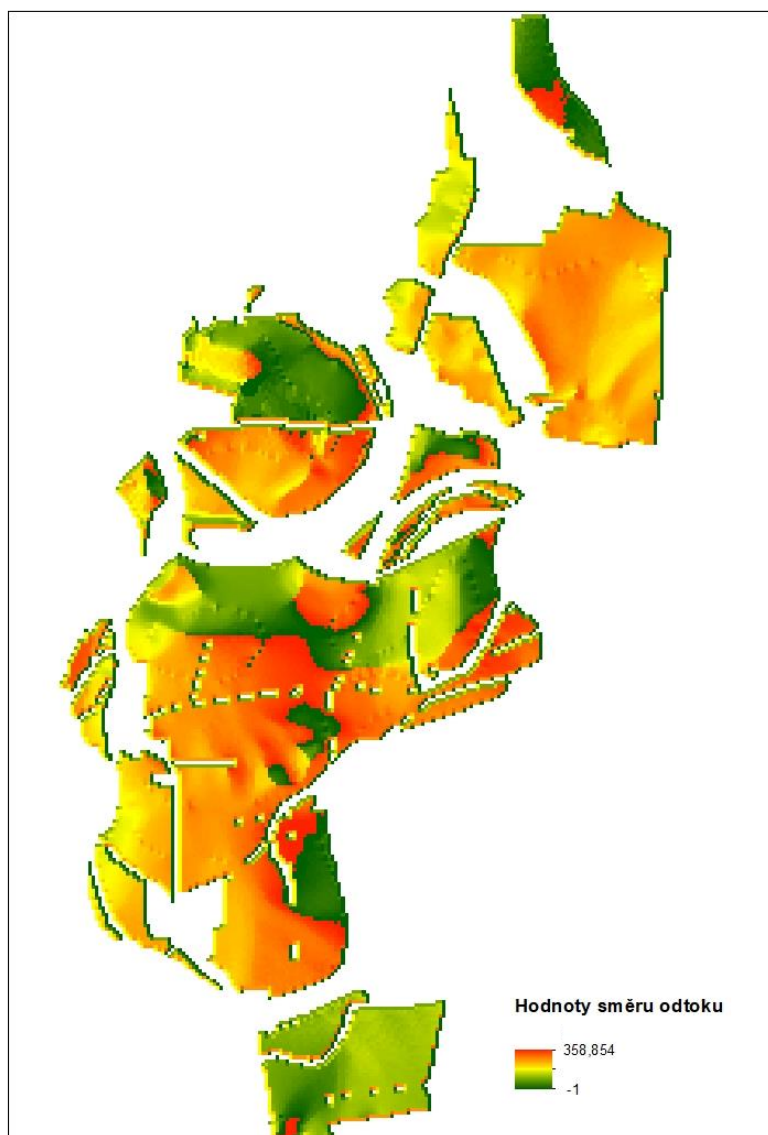


Obr. 32: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 11.



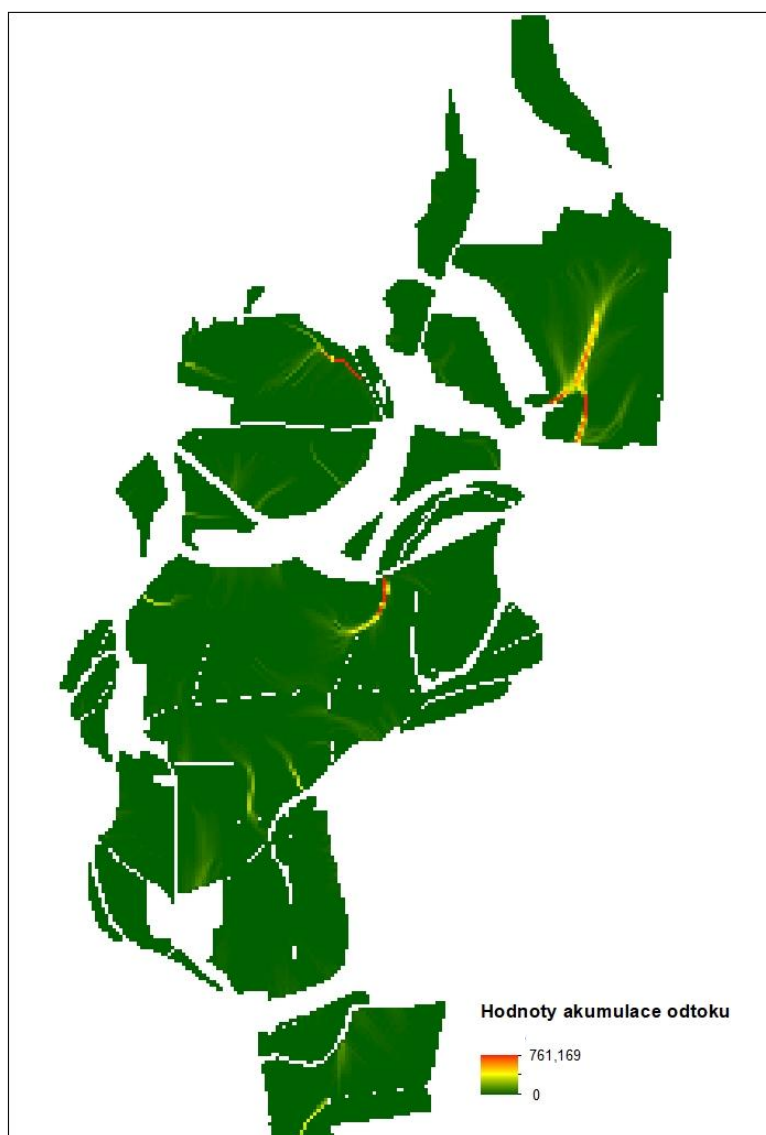
Obr. 33: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 11.

## 12 Metoda 12

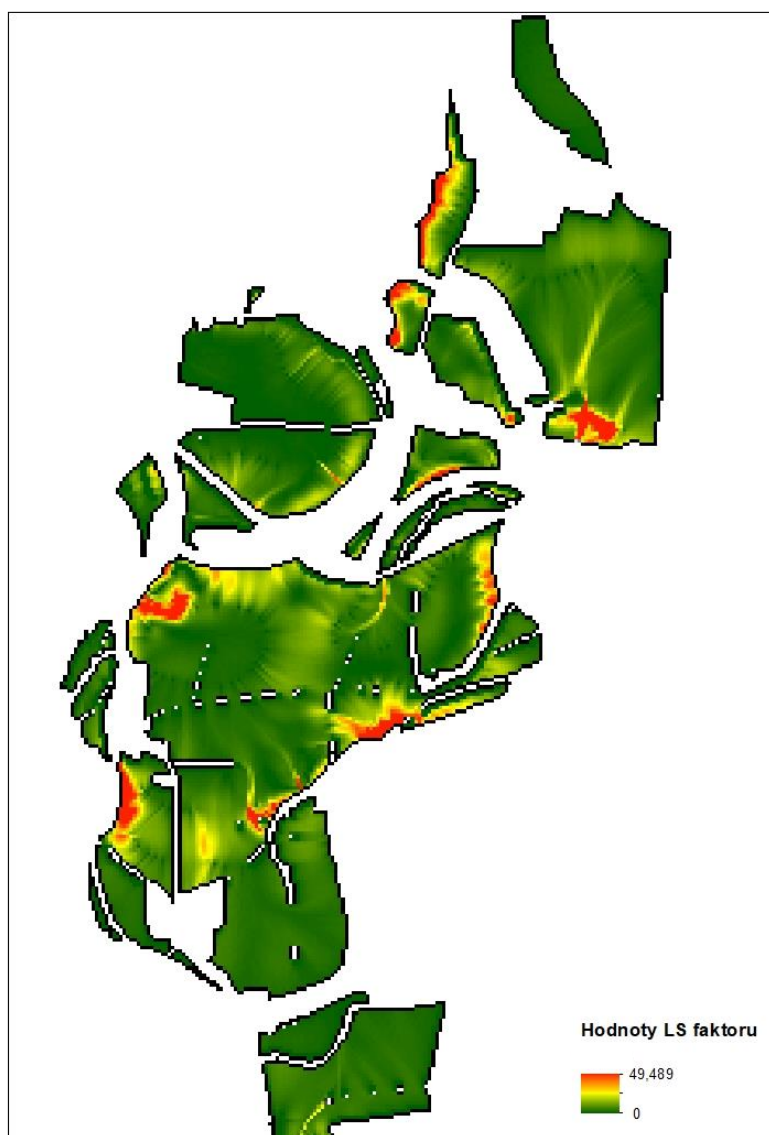


Obr. 34: Rastr směru odtoku vytvořený Metodou 12.





Obr. 35: Rastr akumulace odtoku vytvořený Metodou 12.



Obr. 36: Rastr LS faktoru vytvořený Metodou 12.

Následující tabulka ukazuje rozdíly v maximálních hodnotách směru odtoku, akumulace odtoku a LS faktoru v jednotlivých metodách.

	Maximální hodnoty směru odtoku	Maximální hodnoty akumulace odtoku	Maximální hodnoty LS faktoru
Metoda 1	128	13599	177,652
Metoda 2	128	3436	53,2982
Metoda 3	128	1827	84,3549
Metoda 4	128	11921	357,371
Metoda 5	128	3145	102,172
Metoda 6	128	1295	167,055
Metoda 7	358,977	19055,6	115,35
Metoda 8	359,215	3334,92	44,9341
Metoda 9	359,572	1229,13	51,3276
Metoda 10	358,493	13285,3	112,372
Metoda 11	359,215	3043,15	36,9625
Metoda 12	358,854	761,169	49,489

Tab. 2: Rozdíly v maximálních hodnotách směru odtoku, akumulace odtoku a LS faktoru v jednotlivých metodách.

## Diskuze

### 1 Porovnání rastrů směru odtoku

Rastry vytvořené metodami 1-6 jsou tvořeny plochami s přesnými hranicemi, které mají po celé své ploše stejnou hodnotu. Oproti tomu rastry vytvořené metodami 7-12 neobsahují přesné hranice mezi místy s rozdílnými hodnotami. Hodnoty jsou zde rozloženy do větší škály, než je tomu u metod 1-6. Maximální dosažené hodnoty u metod 1-6 jsou 128. Metody 7-12 dosahují maximálních hodnot v rozmezí 358-389. Použité rozlišení má vliv na rozpoznání míst s různými hodnotami. Při použití rozlišení 5 m jsou jednotlivá místa s různými hodnotami lépe patrná než u rozlišení 15 m. Toto platí pro všechny metody.

### 2 Porovnání rastrů akumulace odtoku

U všech výsledků je patrný pokles rozmezí hodnot v rastru se zvyšujícím se rozlišením. Vyšší rozlišení u rastrů 1-6 způsobuje, že vyšší hodnoty pokrývají větší plochu, než je tomu u rastrů s nižším rozlišením. Rastry, kde byla při vytvoření rastru směru odtoku zvolena možnost *Force all edge cells to flow outward* a metoda D8, vykazují větší množství ploch, do kterých bude probíhat povrchový odtok oproti ostatním rastrům.

Mezi rastry vytvořenými metodou DINF jsou rozdíly v maximálních hodnotách. Rastry se zvolenou možností *Force all edge cells to flow outward* mají nižší maximální hodnoty než rastry, u kterých tato možnost nebyla zvolena.

Rastry vytvořené metodou D8 mají oproti rastrům vytvořeným metodou DINF „hranatější“ okraje plochy, kam bude směřovat odtok.

### **3 Porovnání rastrů LS faktoru**

Maximální hodnoty u všech rastrů s rozlišením 10 m jsou nejnižší. Následují rastry s rozlišením 15 m.

Při srovnání rastrů 1-3 s rastry 7-9 je patrné nižší rozpětí hodnot u rastrů 7-9. Rastry 4-6 mají násobně vyšší maximální hodnoty než rastry 10-12.

U rastrů vytvořených metodou DINF jsou plynulejší přechody mezi místy s různými hodnotami než u rastrů vytvořených metodou D8.

U metody DINF nejsou velké rozdíly mezi použitím možnosti *Force all edge cells to flow outward* a jejím vynecháním.

V případě rastrů vytvořených metodou D8 jsou maximální hodnoty rastrů s možností *Force all edge cells to flow outward* cca dvojnásobné oproti rastrů, kde byla tato možnost vynechána.

## **Závěr**

Z výsledků je patrné, že v rámci jednoho softwaru lze dosáhnout se stejnými vstupními daty různých výsledků, a to za použití různých možností při tvorbě jednotlivých rastrů. Pro získání co nejlepší představy o daném území jsou z použitých rozlišení nejvýhodnější rastry s rozlišením 5 m. Například při porovnání rastrů LS faktoru vzniklých metodami 1 a 3 je vidět velký rozdíl mezi hodnotami, kde maximální hodnota u metody 3 je oproti metodě 1 více než poloviční.

Zvolení možnosti *Force all edge cells to flow outward* při tvorbě rastru směru odtoku způsobuje výrazné rozdíly u rastrů vytvořených metodou D8. U rastrů, které byly vytvořeny metodou DINF nejsou rozdíly velké.

Pro stanovení LS faktoru je lepší využít tvorbu rastrů směru odtoku a akumulace odtoku metodou DINF než D8. Metoda DINF na rozdíl od D8 nevytváří v rastru ostré hrany a lépe tak zobrazuje skutečný stav.

Nejpřesnější metodou pro výpočet LS faktoru je Metoda 7. Naopak nevhodná je Metoda 6.

## Seznam použité literatury

- ASHRAF, M. I., ZHAO, Z., BOURQUE, CH. P.-A., MENG, F.-R., 2012: *GIS-evaluation of two slope-calculation methods regarding their suitability in slope analysis using high-precision LiDAR digital elevation models*. Hydrological Processes 26
- BURROUGH, P. A., MCDONNELL, R. A., 1998: *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York.
- COOPER, W., 2013: *Multi-Flow Direction Algorithms in GIS*. University of Pennsylvania, USA.
- DESMET, P., GROVERS, G., 1996: *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units*. Journal of Soil and Water Conservation, 51.
- DUNN, M., HICKEY, R., 1998: *The Effect of Slope Algorithms on Slope Estimates within a GIS*. Cartography 27.
- FAIRFIELD, J., LEYMARIE, P., 1991: *Drainage networks from grid digital elevation models*. Water Resources Research.
- FOSTER, G. R., WISCHMEIER, W.H., 1974: *Evaluating Irregular Slopes for Soil Loss Prediction*. Transactions of the Asae, 17.
- GRIFFIN, M. L., BEASLEY, D. B., FLETCHER, J. J., FOSTER, G. R., 1988: *Estimating soil loss on topographically non-uniform field and farm units*. Journal of Soil and Water Conservation, 43.
- HRABALÍKOVÁ, M., 2015: *Príspevek k hodnocení různých přístupů v modelování ztráty půdy vodní erozí v prostředí GIS*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí. Disertační práce.
- HRABALÍKOVÁ M., JANEČEK M., 2017: *Comparison of different approaches to LS factor calculations based on a measured soil loss under simulated rainfall*. Soil & Water Res.

JANEČEK, M., 2008: *Základy erodologie*. Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze.

JANEČEK, M. & KOL., 2012: *Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodika*. Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze.

JENSON, S. K., DOMINGUE, J. O., 1988: *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.

MCCOOL, D. K., FOSTER, G. R., MUTCHLER, C. K., MEYER, L. D., 1989: *Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation*. Transactions of the Asae, 32.

MCCOOL, D. K., FOSTER, G. R., WEESIES, G. A., 1997: *Slope Length and Steepness Factors (LS)*. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service (USDA-ARS). Handbook 703.

MITÁŠOVÁ, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M., IVERSON, L. R., 1996: *Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS*. Geographical Information Systems, 10.

MOORE, I. D., BURCH, G. J., 1986: *Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation*. Soil Science Society of America Journal, 50.

MOORE, I. D., WILSON, J. P., 1992: *Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation*. Journal of Soil and Water Conservation, 47.

NEARING, M. A., 1997: *A Single, Continuous Function for Slope Steepness Influence on Soil Loss*. Soil Science Society of America Journal, 61.

QUINN, P. F., BEVEN, K. J., CHEVALLIER, P., PLANCHON, O., 1991: *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models*. Hydrol. Processes.

RENARD, K. G., FOSTER, G. R., WEESIES, G. A., MCCOOL, D. K., YODER, D. C., 1997: *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. United States Department of Agriculture, The United States of America.

TARBOTON, D. G., 1997: *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. Water Resources Research, 33.

TARBOTON, D. G., 2015: *D-Infinity Transport Limited Accumulation*. Online: <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/help53/DInfinityTransportLimitedAccumulation.html>, cit. 18. 12. 2018

VAN OOST, K., GROVERS, G., DESMET, P., 2000: *Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage*. Landscape Ecology, 15.

WILLIAMS, J. R., BERNDT, H. D. 1977: *Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watersheds*. Soil Cons. Soc. of Am

WILSON, J. P., 1986: *Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds*. Journal of Soil and Water Conservation.

WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D., 1978: *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning*. United States Department of Agriculture, The United States of America.

ZEVENBERGEN, L. W., THORNE, C. R., 1987: *Quantitative analysis of land surface topography*. Earth Surface Proc. and Landforms, 12.

ZHANG et al., 2013: *Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor*. Computers & Geosciences, 52.