

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Pahulje, K., 2013. Analiza sproščanja in odplavljanja zemljin s porečja. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentor Krasa, J.): 38 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Pahulje, K., 2013. Analiza sproščanja in odplavljanja zemljin s porečja. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Krasa, J.): 38 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

**PRVOSTOPENJSKI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM  
GK<sup>o</sup> " - V@uf \ (UN)**

Kandidat:

Diplomska naloga št.: 54/B-GR

Graduation thesis No.: 54/B-GR

**Mentorica:**

**Somentor:**

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 18. 09. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Podpisani Klemen Pahulje izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Analiza sproščanja in odplavljanja zemljin s porečja«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 9. 9. 2013

Klemen Pahulje

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 551.311.21:556.51(497.4)(043.2)  
**Avtor:** Klemen Pahulje  
**Mentor:** doc. dr. Mojca Šraj  
**Somentor:** doc. dr. Josef Krasa  
**Naslov:** Analiza sproščanja in odplavljanja zemljin s porečja  
**Tip dokumenta:** diplomska naloga – univerzitetni študij  
**Obseg in oprema:** 38 str., 14 pregl., 37 sl.  
**Ključne besede:** erozija tal, sproščanje, premeščanje, odplavljanje, geografski informacijski sistemi

### **Izvleček**

V diplomski nalogi je predstavljena analiza sproščanja, transporta in odlaganja zemljine s porečja. V prvem delu diplomske naloge je narejen splošen pregled erozije tal, njenih mehanizmov, oblik in dejavnikov. Poleg tega so predstavljeni tudi modeli za napovedovanje erozije tal in prostorske analize v geografskih informacijskih sistemih.

Posebno pozornost smo posvetili procesom erozije tal s porečja. S pomočjo vhodnih podatkov smo s programom ArcGis 10 analizirali površje in z modelom na podlagi enačbe USLE ocenili sproščanje zemljin zaradi vodne erozije s površinskih virov.

Glede na količino sprane zemljine smo napovedali odplavljanje oziroma količino zemljine, ki je zaradi erozije sprana s porečja in jo primerjali z izmerjeno količino zemljine v rezervoarju, kamor so se naplavine iztekale. Ugotovili smo, da je ujemanje med napovedano in izmerjeno količino zemljin zelo dobro. Zasluga za takšne rezultate pa gre predvsem natančnim vhodnim podatkom in meritvam na terenu.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 551.311.21:556.51(497.4)(043.2)  
**Author:** Klemen Pahulje  
**Supervisor:** Assist. Prof. Mojca Šraj, Ph. D.  
**Co-advisor:** Assist. Prof. Josef Krasa, Ph. D.  
**Title:** Analysis of soil detachment and sediment transport from watershed  
**Document type:** Graduation thesis – University studies  
**Scope and tools:** 38 p., 14 tab., 37 fig.  
**Keywords:** soil erosion, detachment, transport, sediment yield, geographic information systems

**Abstract**

Analysis of detachment, transport and dumping of sediments from river basins are presented in the thesis. In the first part there is a general view on the soil erosion, its mechanisms, forms and factors. With that, also models are added, which predict the soil erosion and spatial analysis in geographical information systems.

A special attention was consecrated to processes of soil erosion from the basin. With the help of the input information we analysed the surface using a program called ArcGis 10. Later on we evaluated detachment of sediments caused by the water erosion, which was done with a model on the basis of an USLE equation.

Considering the quantity of soil loss, we predicted the sediment yield or the quantity which had been removed from the basin. We compared it to the measured quantity of the sediments in the reservoir, where the sediments are flown into. We came to a closure, that the match between the predicted and measured quantity of the sediments is very good. The credit for getting these results goes to precise input information and the measurements on the fieldwork.

## **ZAHVALA**

Za pomoč in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Šraj in somentorju doc. dr. Josefu Krasi.

Posebna zahvala gre mojima staršema in sestri Evi, ki so verjeli vame in mi tekom celotnega študija stali ob strani.

Nazadnje bi se rad zahvalil tudi prijateljem in sošolcem, s katerimi smo v zadnjih nekaj letih preživeli marsikatero lepe trenutke.

**KAZALO VSEBINE**

<b>IZJAVE</b> .....	<b>II</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK</b> .....	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>ZAHVALA</b> .....	<b>V</b>
<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2 EROZIJA</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Splošno o eroziji tal</b> .....	<b>2</b>
2.1.1 Mehanizmi padavinske erozije tal .....	2
2.1.2 Oblike vodne erozije .....	3
2.1.3 Dejavniki površinske erozije tal .....	4
2.1.3.1 Hidrološke značilnosti .....	4
2.1.3.2 Oblikovanost površja .....	5
2.1.3.3 Kamninska sestava tal in fizikalne lastnosti tal .....	5
2.1.3.4 Pokrovnost tal .....	6
2.1.3.5 Gospodarski ukrepi .....	6
<b>2.2 Merjenje erozije tal</b> .....	<b>7</b>
<b>3 MODELIRANJE PADAVINSKE EROZIJE TAL</b> .....	<b>8</b>
<b>3.1 Empirični modeli</b> .....	<b>8</b>
3.1.1 Gavrilovičeva enačba .....	8
3.1.2 Enačba USLE .....	9
3.1.2.1 Dejavnik padavin in odtoka R .....	9
3.1.2.2 Dejavnik erodibilnosti zemljine K .....	9
3.1.2.3 Dejavnik dolžine pobočja L .....	10
3.1.2.4 Dejavnik naklona pobočja S .....	10
3.1.2.5 Dejavnik pokrovnosti in obdelave tal C .....	10
3.1.2.6 Dejavnik kmetijskih zaščitnih ukrepov P .....	10
3.1.3 Enačba RUSLE .....	10
<b>3.2 Procesno utemeljeni modeli</b> .....	<b>11</b>
3.2.1 Model WEPP .....	12
3.2.2 Model TOPOG .....	12
<b>3.3 Prostorske analize v GIS-ih</b> .....	<b>12</b>
3.3.1 Geografski informacijski sistemi (GIS) .....	12
3.3.2 Prostorske analize .....	13
3.3.3 Vektorski in rastrski podatkovni modeli .....	14
3.3.4 Program ArcGIS .....	14
<b>4 ANALIZA SPROŠČANJA IN ODPLAVLJANJA ZEMLJIN</b> .....	<b>15</b>
<b>4.1 Pregled stanja na Češkem</b> .....	<b>15</b>
<b>4.2 Predstavitev obravnavanega območja</b> .....	<b>15</b>
<b>4.3 Padavine</b> .....	<b>16</b>
<b>4.4 Analize</b> .....	<b>17</b>
4.4.1 Analize površja .....	17
4.4.1.1 Višinske črte in digitalni model višin .....	17



4.4.1.2	Raba tal .....	18
4.4.1.3	Naklon terena.....	19
4.4.1.4	Smer odtekanja.....	19
4.4.1.5	Akumulacija.....	20
4.4.2	Določitev faktorjev USLE.....	22
4.4.2.1	Faktor C.....	22
4.4.2.2	Faktor K.....	23
4.4.2.3	Faktor LS.....	24
4.4.2.4	Faktorja R in P.....	25
4.4.3	Sprana zemljina.....	26
4.4.4	Odplavljanje.....	28
4.4.4.1	Površina porečja F.....	28
4.4.4.2	Koeficient reliefa RR.....	29
4.4.4.3	Koeficient CN.....	29
4.4.5	Donos sedimentov v rezervoar.....	30
<b>5</b>	<b>MERITVE SPRANE ZEMLJINE .....</b>	<b>31</b>
5.1	Mesta meritev.....	31
5.2	Usedline v rezervoarju.....	32
<b>6</b>	<b>PRIMERJAVA REZULTATOV .....</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>35</b>
<b>VIRI</b>	<b>.....</b>	<b>36</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Oblike vodne erozije	3
Preglednica 2: Nadmorske višine porečja	17
Preglednica 3: Delež žitaric na obravnavanem območju	18
Preglednica 4: Deleži rabe tal obravnavanega območja	18
Preglednica 5: Nakloni terena v porečju	19
Preglednica 6: Vrednosti faktorja <i>C</i> za posamezno vrsto obdelave tal	22
Preglednica 7: Ovrednotenje različnih vrst kultur	23
Preglednica 8: Vrednosti faktorja <i>K</i> glede na kategorizacijo zemljin	23
Preglednica 9: Odvisnost koeficienta <i>m</i> od naklona pobočja	24
Preglednica 10: Ekstremne vrednosti sprane zemljine	27
Preglednica 11: Vrednosti faktorja <i>CN</i> v odvisnosti od rabe tal	29
Preglednica 12: Karakteristične vrednosti rezervoarjev	31
Preglednica 13: Debeline usedlin v rezervoarju	33
Preglednica 14: Izračunana in izmerjena vrednost debeline usedlin	34

## KAZALO SLIK

Slika 1: Vrste erozije tal na pobočju	4
Slika 2: Dinamika vodne erozije	6
Slika 3: Dimenzije ploskve USLE	7
Slika 4: Procesi erozije tal	11
Slika 5: Sestavine geografskega informacijskega sistema	13
Slika 6: Topografski prikaz lokacije obravnavanega območja	15
Slika 7: Lokacija obravnavanega območja	16
Slika 8: Povprečna letna višina padavin na Češkem	16
Slika 9: Vektorski prikaz višin s plastnicami	17
Slika 10: Rastrski prikaz višin z digitalnim modelom	17
Slika 11: Raba tal	18
Slika 12: Naklon terena	18
Slika 13: Prečni profil kotanje pred in po zapolnitvi na primerno vrednost	19
Slika 14: Prečni profil vrha pred in po odstranitvi na primerno vrednost	19
Slika 15: Karta nadmorskih višin	20
Slika 16: Smer odtekanja vode	20
Slika 17: Smeri odtekanja in akumulacija	20
Slika 18: Akumulacijski tok	21
Slika 19: Akumulacijski tok brez erozivnih območij	21
Slika 20: Vrednosti faktorja $C$	22
Slika 21: Kategorizacija zemljin	23
Slika 22: Vrednosti faktorja $K$	23
Slika 23: Uporaba orodja <i>Raster Calculator</i> za izračun faktorja $LS$	25
Slika 24: Vrednosti faktorja $LS$	25
Slika 25: Dolgoročna povprečna vrednost faktorja $R$	26
Slika 26: Uporaba orodja <i>Raster Calculator</i> za izračun količine sprane zemljine $A$	26
Slika 27: Količina sprane zemljine porečja	27
Slika 28: Povprečna količina sprane zemljine porečja	27
Slika 29: Izračun površine porečja $F$	28
Slika 30: Izračun višine iztoka in povprečna višine razvodnice	29
Slika 31: Izračun največje dolžine pritoka	29
Slika 32: Vrednosti faktorja $CN$	30
Slika 33: Izračun povprečne vrednosti faktorja $CN$	30
Slika 34: Ortofoto posnetek rezervoarja Bilovice	31
Slika 35: Mesta meritev usedlin	32
Slika 36: Debelina usedlin v TIN obliki	32
Slika 37: Debelina usedlin v rastrski obliki	32



## 1 UVOD

V današnjem času prihaja do vedno večjega zanimanja za izboljšanje vodnih virov, upravljanje porečij in večjo izrabo zemljišč. Takšno mišljenje pa se ni izoblikovalo v kratkem času, temveč na podlagi dolgoletnih opazovanj erozijskih procesov in odpravljanja njihovih posledic. Na delovanje erozije pogosto postanemo pozorni šele takrat, ko degradacija doseže večje razsežnosti. V večini primerov pa je takrat za protierozijske ukrepe že prepozno.

Tla so življenjski temelj in predpogoj za kmetijsko pridelavo in s tem za prehrano ljudi. Veliko težavo predstavlja erozija tal, ki pripelje do izgube rodovitnih tal in ima negativne posledice tudi na nekmetijskih površinah (Mikoš in Zupanc, 2000). Sprana zemljina se preko rečnega sistema odlaga v akumulacijah. Odloženi sedimenti zasedejo koristno prostornino akumulacije in s tem zmanjšujejo količino vode, ki je na voljo za proizvodnjo energije. Inženirski pristopi za določanje procesov usedanja plavin v rezervoarju se nanašajo na meritve sprane zemljine, ki se v rezervoarjih odloži. Rezultati meritev se uporabijo za razlago predhodnih erozijskih procesov in manj pogosto za njihova predvidevanja ter predstavljajo ključen dejavnik pri načrtovanju različnih objektov kot so jezovi ali rezervoarji (Summer in sod., 1998).

V diplomski nalogi smo analizirali izbrano porečje in s pomočjo enačbe USLE napovedali sproščanje oziroma odplavljane zemljine s porečja v rezervoar. Količino odplavljene zemljine smo v nadaljevanju primerjali z meritvami usedlin v rezervoarju.

## 2 EROZIJA

### 2.1 Splošno o eroziji tal

Erozija tal je vrsta mehanske degradacije tal, ki nastane zaradi delovanja naravnih dejavnikov, oziroma je mnogokrat antropogeno pogojena (odstranjevanje vrhnje prsti tal, kmetijska obdelava, krčenje gozdov ipd.) (Mikoš in Zupanc, 2000). Erozija tal ali denudacija je trifazni proces, sestavljen iz sproščanja, transporta in odlaganja zemljine ter predstavlja enega pomembnejših dejavnikov preoblikovanja zemeljskega površja. V splošnem se pojavlja kot posledica različnih zunanjih dejavnikov, od katerih sta najpogostejša delovanje tekoče vode in veter. Ne smemo pa pozabiti tudi na temperaturna nihanja, led, sneg in težnost. Ti vzroki predstavljajo izhodišče za delitev erozijskih pojavov, ki jih Pintar in Mikoš (1983) definirata takole:

- pojavi kemičnega, biološkega in fizikalnega preperevanja,
- vetrna erozija,
- snežna erozija,
- ledeniška erozija,
- vodna erozija,
- plazna erozija in
- podorna erozija.

Pogosto prihaja do medsebojnega prepletanja različnih dinamičnih sil narave, ki vodi mešane erozijske pojave. Največkrat je ta proces rezultat naravnih dejavnikov in ga imenujemo normalna ali geološka erozija, ki poleg procesov nižanja vključuje tudi procese nastanka tal. V nekaterih primerih pa erozijo tal povzroča tudi človeška dejavnost, ki jo imenujemo pospešena ali napredujoča erozija tal. Povzroča hitrejšo spremembo v naravni talni pokritosti in stanju tal (Mikoš in Zupanc, 2000). Kaže se predvsem v kmetijstvu, gradbeništvu, rudarstvu in turizmu, zato jo moramo upoštevati pri načrtovanju posegov v prostor in urejanju povodij (Petkovšek, 2000).

Čeprav je bilo že uvodoma povedano, da je erozija zaradi delovanja vetra zelo pomembna, pa bo v tej diplomski nalogi s pojmom "erozija tal" označeno površinsko spiranje in odplavljanje tal oziroma prsti zaradi delovanja tekoče vode, ki se tvori iz padavinske vode.

#### 2.1.1 Mehanizmi padavinske erozije tal

Zaradi delovanja tekoče vode, ki je posledica padavin ali taljenja ledu, pride na površini nezaščitenih tal do sproščanja talnih delcev. Sledi spiranje, odnašanje ter premeščanje talnih delcev zaradi erozijske sile tekoče vode skozi različne vrste erozij, ki bodo opisane v nadaljevanju (Summer in sod., 1998).

Erozija tal zaradi delovanja vode je najpogostejši pojav na kmetijskih površinah. Sproščanje talnih delcev (ločitev od matične podlage) nastopi zaradi dežnih kapelj, ki z veliko kinetično energijo udarijo ob tla. Tvori se vodni tok v obliki vodnih curkov in potočkov, ki erodirajo tla in so glavni vir premeščanja zemljin po pobočju. Premeščanje se najprej pojavi na slabo prepustnih tleh in narašča s hitrostjo vodnega toka. Z zmanjšanjem naklona pobočja se zmanjša tudi hitrost vodnega toka, ki vodi v odlaganje zemljine na prvo primerno območje ali odplavljanje v vodotok (Hahn in sod., 1994).

Sproščanje talnih delcev se pri površinski eroziji pojavi ob nazadostnem pronicanju padavinske vode v tla, kar je posledica dveh mehanizmov (Mikoš in Zupanc, 2000):

- V primeru intenzivnih kratkotrajnih padavin (nad 10 mm/h) večinski del padavinske vode odteče po površju in le majhen del ponikne. Zaradi intenzivnosti padavin pride do zablantenja površinskega sloja tal in prekinitve navpičnih poti, skozi katere voda pronica v notranjost. Talni delci se ločijo od podlage in pomešani s padavinsko vodo odtečejo po površju.
- Podoben primer se zgodi v zimskem času, ko imajo tla zmanjšano infiltracijsko sposobnost in zato ponikne le manjši del padavinske vode, večinski del pa odteče po površju.

Izraz "stopnja sproščanja" pomeni količino zemljine, ki se sprosti v časovni enoti. Pri obravnavi celotnega porečja, stopnjo sproščanja običajno podamo v [t/leto]. Za specifično stopnjo sproščanja, ki je stopnja sproščanja na enoto površine, pa uporabljamo [t/ha/leto] oz. na manjših eksperimentalnih ploskvah [ $g/m^2/s$ ] (Petkovšek, 2002).

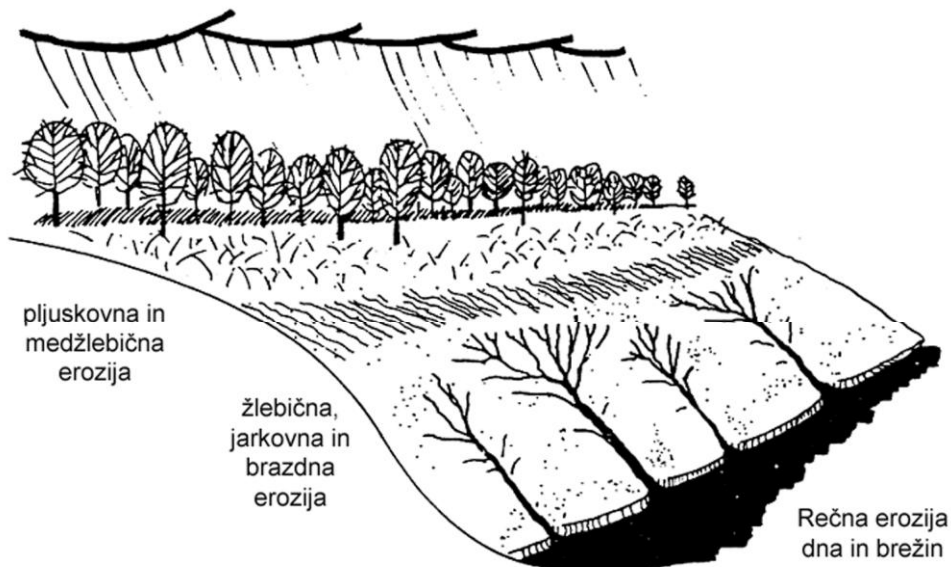
### 2.1.2 Oblike vodne erozije

Za načrtovanje protierozijskih ukrepov pred škodljivim delovanjem vode in vrednotenje intenzitete erozije tal na kmetijskih površinah je smiselno poznati različne oblike njenega delovanja na kmetijskih tleh. Mikoš in Zupanc (2000) jih definirata takole:

Preglednica 1: Oblike vodne erozije (Mikoš in Zupanc, 2000)

Oblika erozije	Povzročitelj	Opis
Pljuskovna	Vodne kaplje	Vodna kaplja ob trku s tlemi povzroči ločitev delcev od matične podlage. Učinek pljuskovne erozije se največkrat izraža v odvisnosti od intenzivnosti padavin ali kinetične energije vodnih kapelj.
Žlebična	Površinski vodni tok	Površinski vodni tok v obliki vodnih curkov in majhnih potočkov povzroči sproščanje in premeščanje talnih delcev. Pri tem nastajajo žlebiči, ki jih lahko s kasnejšo obdelavo tal zakrijemo. Stopnja žlebične erozije je odvisna od strižnih napetosti, s katerimi deluje odtekajoča voda na ostenje žlebiča.
Medžlebična	Vodne kaplje/ Površinski vodni tok	Nastane na površini med žlebiči, kjer se sproščanje in premeščanje začne zaradi pljuskanja vodnih kapelj ali plitvega površinskega odtoka. Njena stopnja je odvisna od topografije, lastnosti tal in intenzitete padavin.
Brazdna	Površinski vodni tok	Predstavlja prehodno obliko med žlebično in jarkovno erozijo. Njen nastanek je povezan z nadaljnim stekanjem manjših potočkov, ki povzročajo žlebično erozijo.
Jarkovna	Površinski vodni tok	Stopnjevana žlebična ali brazdna erozija in sicer do te mere, da nastalih jarkov ni možno enostavno izravnati z običajnimi obdelovalnimi orodji.

Pljuskovno, žlebično in medžlebično erozijo uvrščamo med površinsko erozijo, saj je koncentracija odtekajoče površinske vode še premajhna, da bi začela izrazito erodirati v globlje plasti tal. Pri globinski eroziji pa so jarki že tako globoki, da jih ni možno izravnati z običajnimi obdelovalnimi orodji, kot je to običajno pri površinski eroziji. Na sliki 1 so prikazane vrste erozije na pobočju.



Slika 1: Vrste erozije tal na pobočju (UNEP, 1994)

### 2.1.3 Dejavniki površinske erozije tal

Ugotovljeno je bilo, da so erozijski pojavi odvisni od naravnih dejavnikov in človeške dejavnosti v prostoru.

Pri procesu erozije sta pomembni erodibilnost tal in erozivnost vode, ki povzročata erozijo oz. sile, ki poskušajo delec zemljine premakniti, in sile, ki ga ohranjajo na začetni poziciji. Za ovrednotenje erozijskih pojavov in analizo območij v prostoru, ki so potencialno erozivno ogrožena, je prav gotovo temeljnega pomena dobro poznavanje naravnih danosti. Mikoš in Zupanc (2000) jih delita v štiri skupine:

- podnebje in vodnatost (hidrološke značilnosti),
- oblikovanost površja,
- kamninska sestava in fizikalne lastnosti tal,
- pokrovnost tal.

V peto skupino dejavnikov uvrščamo gospodarske ukrepe, ki predstavljajo človeške posege v prostor in vplivajo na dinamiko erozijskih pojavov.

#### 2.1.3.1 Hidrološke značilnosti

Med parametri hidroloških značilnosti so najpomembnejše padavine, predvsem njihova prostorska in časovna razporeditev ter površinski odtok. Višino padavin izražamo v [mm], intenziteto pa v [mm/h].

Intenziteta padavin je pomemben dejavnik pri preučevanju procesov erozije tal, saj je merjena na standardnih meteoroloških postajah in so podatki lahko dostopni. Maksimalna intenziteta kratkotrajnih neviht, ki trajajo 30 minut, naj bi bila najbolj uporabna statična vrednost za določanje erozijskega tveganja na obravnavanem območju (Hudson, 1995).

O površinskem odtoku govorimo, ko intenziteta padavin preseže stopnjo infiltracije. Z dolžino pobočja odtok narašča, postaja vedno bolj koncentriran in začne se tvorba žlebičev. Na pojav erozije tal vplivajo še vsebnost vode v tleh, temperatura in vlažnost zraka, smer in jakost vetra ter osončenost.



Mikoš (1995) podaja pravilo, da so za erozijske pojave pomembne predvsem ekstremne vrednosti parametrov naravnih danosti in manj njihova povprečja, tudi če so rezultat dolgotrajnih opazovanj. Pomembnejše je poznati intenzitete kratkotrajnih nalivov, kakor pa mesečna ali letna povprečja padavin.

### **2.1.3.2 Oblikovanost površja**

V to skupino spadajo oblikovni (morfološki) in topografski dejavniki, kot so oblika, dolžina in kot najpomembnejši dejavnik naklon ali nagibni kot pobočja (Mikoš in Zupanc, 2000).

Poznamo tri osnovne oblike pobočij, in sicer izbočeno (konveksno), vbočeno (konkavno) in ravno. Pri konveksnem se naklon navzdol povečuje, pri konkavnem zmanjšuje, pri ravnem pa se naklon ne spreminja. Izgube tal so najmanjše na vbočenem (konkavnem) pobočju, saj se tu zadrži več vode, infiltracija je večja, manj vode odteče po pobočju in s tem je erozija tal manjša. Sledi ravna oblika pobočja in nazadnje izbočena, kjer je erozija tal največja.

Z večanjem dolžine pobočja erozija tal narašča, zato poskušamo s preventivnimi protierozijskimi ukrepi zmanjšati dolžino pobočja, po katerem si voda ustvarja nove poti. S tem zmanjšamo hitrost vodnega toka, koncentracijo talnih delcev v odtekajoči vodi in izgubo tal.

Tudi z večanjem naklona erozija tal narašča, saj naklon vpliva na hitrost odtekanja vode. Na strmšem pobočju prihaja do hitrejšega odtekanja vode in zato je močnejše tudi odnašanje delcev. Vpliv naklona pobočja se lahko z vegetacijo, obdelavo tal in mehanskimi postopki, kot je npr. gradnja teras, zniža, nikoli pa se povsem ne izniči.

### **2.1.3.3 Kamninska sestava tal in fizikalne lastnosti tal**

Najpomembnejša fizikalna lastnost zemljin, ko je govora o erozijskih procesih, je erodibilnost ali podvrženost erodiranju (Mikoš, 1995). Večja erodibilnost pomeni manjši odpor posameznega zrna zemljine dinamičnim silam vode, vetra, snega in težnosti. Odvisna je od odpornosti delcev proti trganju oziroma od lastnosti tal, kot so poroznost, gostota, prepustnost, vsebnost organske snovi, stabilnost agregatov, vsebnost vode in infiltracijska sposobnost tal (Mikoš, 1995).

Tla z visokim deležem meljastih delcev so zelo erodibilna in zato najbolj ogrožena, saj se talni delci meljastih tal enostavno premeščajo. Erozijsko bolj odporna so peščena tla, katerih delci nudijo večjo zaščito pred udarci dežnih kapelj in tako zmanjšujejo erodibilnost tal. Peščena tla so visoko prepustna, kar posledično pomeni relativno majhen površinski odtok. Podoben odpor nudijo tudi tla s prevladujočim deležem glinenih delcev ali visoko vsebnostjo organskih (humusnih) snovi, saj te vežejo talne delce v stabilne strukturne agregate, ki se bolj upirajo pljuskanju dežnih kapelj in izboljšajo prepustnost tal (Mikoš in Zupanc, 2000).

Vsebnost vode v tleh, ki je odvisna od podnebnih značilnosti in oblikovanosti površja, je odločilna za delež padavin, ki površinsko odteče. Visoka začetna nasičenost zemljine namreč zmanjša infiltracijsko sposobnost tal, s tem pa se površinski odtok poveča.

### 2.1.3.4 Pokrovnost tal

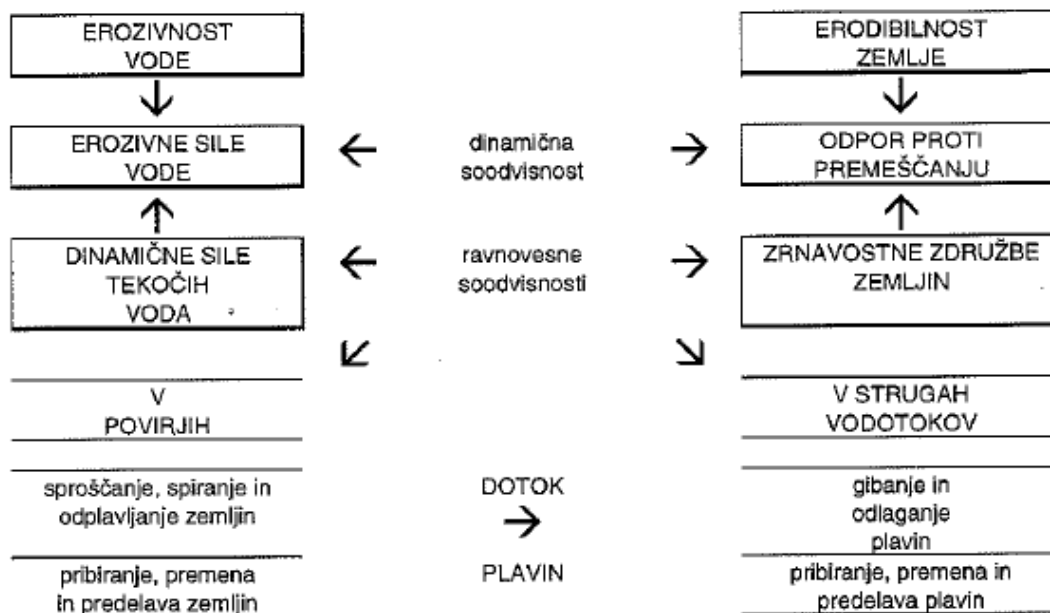
Rastlinski pokrov ali vegetacija vpliva na padavine, površinski odtok in sestavo tal ter daje zaščito pred erozijo. Razlikujemo med zračnim in prizemnim rastlinskim pokrovom (Mikoš in Zupanc, 2000).

Zračni pokrov (nadzemni deli rastlin) varuje prst pred neposrednim delovanjem dežnih kapelj, saj zniža njihovo kinetično energijo. Gostejše kot je rastje, več padavin prestreže, kar pa ne varuje tal pred erozivnostjo površinskega odtoka.

Prizemni rastlinski pokrov (rastline, kamenje, pesek, odmrlo listje) pa neposredno vpliva na zmanjšanje erozije zaradi površinskega odtoka, saj poveča infiltracijsko sposobnost tal in utrdi vrhno plast tal. Stopnja zaščite tal je odvisna predvsem od vrste in gostote rastlin, ki tvorijo rastlinski pokrov, medvrstne razdalje in kolobarja. Pokrovnost tal in primerna obdelava tal lahko precej zmanjšata posledice erozije zaradi padavin, ne moreta pa je povsem preprečiti.

### 2.1.3.5 Gospodarski ukrepi

Naravnim danostim se kot peti dejavnik pridružujejo gospodarski ukrepi, ki so posledica človeške dejavnosti v prostoru. Mednje prištevamo krčenje gozdov, odstranjevanje vrhnje plasti tal in kmetijsko obdelavo. Gospodarski ukrepi vplivajo na naravne erozijske dejavnike, rodovitnost ter obseg erozije tal. Odražajo se skozi vrsto rabe tal, vrsto obdelave tal, lego njivskih površin, smer obdelave in možnost zaščite pred erozijo. Posebno pozornost je treba posvetiti kmetijskim površinam z zelo rodovitnimi tlemi in tistim, kjer so procesi antropogenih vplivov na erozijske procese že dalj časa prisotni (Mikoš in Zupanc, 2000). Dinamika vodne erozije ja prikazana na sliki 2.



Slika 2: Dinamika vodne erozije (Mikoš, 1995)

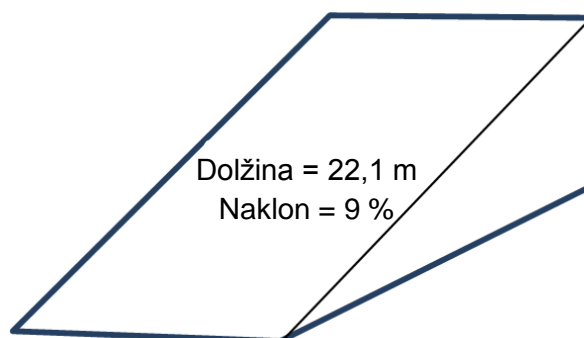
## 2.2 Merjenje erozije tal

Razumevanje erozijskih procesov temelji na raziskavah, kjer se z različnimi tehnikami meri odtok vode in zemljin z omejene površine. Razlogi za meritev erozije tal so: pregled erozije, znanstvene raziskave erozije ter razvoj in ocena ukrepov za nadzor nad erozijo (Toy in sod., 2002).

Podatke o koeficientih za izračun erozije tal lahko pridobimo na terenu ali s simuliranjem naravnih razmer v laboratoriju. Najbolj optimalne podatke dobimo z meritvami na terenu, kjer pa je zaradi spreminjajočih se razmer težje kontrolirati vzroke in procese erozije tal (Morgan, 2005). Prednost poskusov v laboratoriju je prevsem možnost kontrole nad posameznimi parametri. Težava je zagotavljanje razmer, ki so podobne naravnim. Na poskusnih ploskvah pride do vpliva robnih učinkov, kot so vpliv robov na odtok in talno vodo ter rast rastlin (Petkovšek, 2002).

Glavni namen merjenja erozije tal je snovanje znanstvenih teorij, na podlagi katerih se razvijejo erozijski modeli. Meritve erozije tal predstavljajo osnovo za načrtovanje protierozivnih ukrepov in ocenitev njihove uspešnosti (Kirkby in sod., 1980).

Erozijske ploskve oziroma plati so fizično izoliran del tal znane velikosti, naklona, dolžine in tipa zemljine (slika 3). Uporabljajo se za merjenje odtoka in izgube zemljine. Standardna ali najbolj razširjena vrsta erozijskih ploskev so tako imenovane USLE ploskve. Dolžina take ploskve meri 22,1 m, širina 1,8 m, njen naklon pa je 9 % (Morgan, 2005). Te ploskve so dovolj široke, da lahko vpliv robov zanemarimo, in dovolj dolge, da se na njih pojavijo žlebiči. S spreminjanjem parametrov lahko ugotovimo njihov vpliv na sproščanje sedimentov oziroma izgubo zemljine s ploskve. Na podlagi rezultatov poskusov na teh ploskvah je bila dobljena univerzalna enačba izgube zemljine ( $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$ ) (Petkovšek, 2002).



Slika 3: Dimenzije ploskve USLE

### 3 MODELIRANJE PDAVINSKE EROZIJE TAL

Meritve erozije tal lahko izvajamo na terenu ali v laboratoriju. Meritve na terenu so zaradi spremenljivih razmer, oblike površja in dolgoročnih raziskav težko izvedljive. Dolgoročne raziskave se uporabljajo pri ugotavljanju sproščanja zemljin glede na spremembo rabe tal, podnebja, protierozijskih ukrepov in za pridobivanje podatkov, ki niso odvisni od ekstremnih dogodkov oziroma nekaj letnih padavinskih odstopanj od normalnih vrednosti.

Tako se je pojavila nuja po razvoju modelov erozije tal, ki predstavljajo najenostavnejši način za izračun izgube zemljine. Uporabiti je potrebno najprimernejši model erozije tal, pri tem pa je treba poznati namembnost modela in karakteristične značilnosti obravnavanega območja, saj lahko le na tak način zagotovimo verodostojnost rezultatov. Uporabnost ter zanesljivost modela lahko preverimo s primerjavo rezultatov s terenskimi meritvami.

Model erozije tal uporabljamo z namenom napovedi erozije tal ali razlage določenega dogajanja. Težnja v razvoju modelov erozije tal je razumeti proces erozije, delovanje modela in razumevanje odziva modela na spremembe (Miko, 2005).

Metode za vrednotenje erozije tal lahko razdelimo na dve skupini, in sicer na empirične oz. polempirične in procesno utemeljene modele.

#### 3.1 Empirični modeli

Empirični modeli sodijo med tradicionalne metode za napovedovanje erozije tal (Petkovšek, 2000). Poleg imena "empirični modeli" se uporablja tudi naziv "empirično utemeljeni ali indeksno utemeljeni modeli". Empiričen model potrebuje obsežno bazo podatkov, ki mora vsebovati čim bolj natančne podatke o razmerah na terenu (Miko, 2005). Značilna primera takšnega modela sta Gavrilovičeva enačba in enačba USLE.

##### 3.1.1 Gavrilovičeva enačba

Gavrilovičeva enačba izhaja iz gozdarstva (hudourništva) in je doživela dokaj široko uporabo na slovenskih porečjih. Prednost metode je njena razumljivost in da je njena uporaba enostavna, slabost pa, da se končni kvantitativni rezultat jakosti erozije tal izračuna iz kvalitativnih ocen parametrov, zastopanih v enačbi (Staut in Mikoš, 2008).

Za Sredozemlje je Gavrilović (1970) za izračun srednjega letnega sproščanja zemljin  $W$  [ $m^3/leto$ ] zaradi vodne erozije predlagal naslednjo enačbo:

$$W = 3,14 \cdot H_Y \cdot K_T \cdot K_Z^{1,5} \cdot F_W, \quad (1)$$

kjer je:

$H_Y$  srednje letne padavine [mm],

$K_T$  temperaturni koeficient območja, ki je funkcija srednje letne temperature,

$K_Z$  erozijski koeficient območja, ki se oceni na podlagi ustreznih preglednic ali izračuna po enačbi,

$F_W$  površina povodja [ $km^2$ ].

Enačba je bila preverjena na podatkih z območja nekdanje Jugoslavije in Severne Afrike (Petkovšek, 2000).

Pintar in sodelavci (1986) so Gavrilovićevo enačbo priredili za Slovenijo. Srednje letne padavine  $H_V$  so zamenjali z maksimalno višino dnevnih padavin  $H_{D,max}$ , temperaturni koeficient  $K_T$  pa opustili. Tako so za napovedovanje sproščanja plavin predlagali spremenjeno enačbo:

$$W = 20 \cdot H_{D,max} \cdot K_Z^{1,5} \cdot F_W. \quad (2)$$

### 3.1.2 Enačba USLE

Univerzalna enačba izgube zemljine (USLE, angl. *Universal Soil Loss Equation*) je empiričen model, ki je namenjen napovedovanju sproščanja zemljin. Metoda izhaja s področja kmetijstva, saj so tam sproščanje in nadaljnji procesi erozije najbolj intenzivni. Enačba je bila uporabljena pri načrtovanju napovedovanja vpliva rabe tal na erozijo. Model USLE je sestavljen iz glavne enačbe in pomožnih enačb oziroma preglednic ter grafikonov za določanje posameznih vrednosti glavne enačbe (Hahn in sod., 1994).

Osnovna enačba USLE za vrednotenje povprečne letne izgube zemljine  $A$  [t/ha] je zastavljena v obliki zmnožka šestih dejavnikov:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P. \quad (3)$$

Hahn in sodelavci (1994) so jih definirali takole:

- $R$  dejavnik padavin in odtoka,
- $K$  dejavnik erodibilnosti zemljine,
- $L$  dejavnik dolžine pobočja,
- $S$  dejavnik naklona pobočja,
- $C$  dejavnik pokrovnosti in obdelave tal,
- $P$  dejavnik kmetijskih zaščitnih ukrepov.

Dejavnike lahko razdelimo na aktivne hidrološke in topografske dejavnike ( $R$ ,  $L$ ,  $S$ ) in reaktivne dejavnike ( $K$ ,  $C$ ,  $P$ ), ki kvantificirajo erodibilnost, pokrovnost in zaščitne ukrepe tal (Petkovšek, 2000).

#### 3.1.2.1 Dejavnik padavin in odtoka $R$

Dejavnik padavin in odtoka  $R$  je odvisen od geografske lokacije (USLE, 2012). Z večanjem intenzivnosti in trajanja padavin se posledično večja tudi dejavnik padavin in odtoka.  $R$  predstavlja število enot dežja za energijo padavin in odtok, in vode iz taljenja snega za odtok [MJ mm/ha h leto] (Petkovšek, 2000). Dejavniki erozivnosti padavin  $R$  je določen s kinetično energijo padavin  $E$  in maksimalno 30-minutno intenziteto padavin (Kirkby in sod., 1980).

#### 3.1.2.2 Dejavniki erodibilnosti zemljine $K$

Dejavnik erodibilnosti zemljine  $K$  je merilo odpornosti talnih delcev proti trganju oziroma sproščanju in premeščanju glede na standardne razmere (raba tal, padec in dolžina pobočja) (Petkovšek, 2000). Predstavlja povprečno letno izgubo zemljine na enoto dejavnika padavin in odtoka  $R$ , zato ima enake enote kot povprečna letna izguba zemljine  $A$  [t/ha leto] (Miko,

2005). Vrednost  $K$  temelji na meritvah oziroma primerjavi značilnosti obravnavane zemljine in značilnosti že merjenih zemljin. Večja erodibilnost pomeni manjši odpor posameznega zrna zemljine proti dinamičnim silam vode.

### 3.1.2.3 Dejavnik dolžine pobočja $L$

Dejavnik dolžine pobočja  $L$  predstavlja razmerje med izgubo tal pri podani dolžini in standardni dolžini (22,1 m). Z večanjem dolžine pobočja se veča tudi sproščanje zemljine. Dolžina pobočja je določena kot razdalja od točke izvora površinskega toka do točke, kjer se pobočje zravna in pride do odlaganja materiala ali kjer odtok vstopi v definiran kanal (Kirkby in sod., 1980). Enačbe za izračun faktorja  $L$  so namenjene uporabi za enostavna pobočja in ne za ostale oblike območij. Območja sestavljenih ali konveksnih in konkavnih oblik moramo razdeliti na posamezne segmente, ki imajo enake lastnosti po celotni dolžini (Miko, 2005).

### 3.1.2.4 Dejavnik naklona pobočja $S$

Dejavnik naklona pobočja  $S$  predstavlja razmerje med izgubo tal pri podanem padcu in standardnem padcu (9 %) (Petkovšek, 2000). Enačbe za izračun dejavnika  $S$  so, kot pri dejavniku  $L$ , namenjene izračunu za enostavna pobočja z enakimi lastnostmi po vsej dolžini.

### 3.1.2.5 Dejavnik pokrovnosti in obdelave tal $C$

Dejavnik pokrovnosti in obdelave tal  $C$  predstavlja razmerje med izgubo tal pri podani pokrovnosti in izgubo tal z neobdelanega polja (Petkovšek, 2000). Dejavnik vključuje vplive pokrova, stopnje produktivnosti, zaporednja pridelkov, dolžine rasne dobe, postopkov obdelave in porazdelitev padavin (Kirkby in sod., 1980). Zaradi spreminjanja stopnje erozije z življenjskim ciklom pridelka je potrebna razdelitev leta na posamezne periode. Za periode se izračunajo posamezne vrednosti izgube zemljine, ki se nato glede na delež prispevka prištejejo k celoti in dobimo letno vrednost dejavnika  $C$  (Miko, 2005).

### 3.1.2.6 Dejavnik kmetijskih zaščitnih ukrepov $P$

Dejavnik kmetijskih zaščitnih ukrepov  $P$  predstavlja razmerje med izgubo zemljine s polja, ki se obdeluje s podanimi ukrepi, in izgubo zemljine s polja, ki se obdeluje z oranjem navzgor in navzdol (Petkovšek, 2000). Za pobočja, kjer ni zaščitnih ukrepov, je vrednost faktorja  $P$  enaka 1.

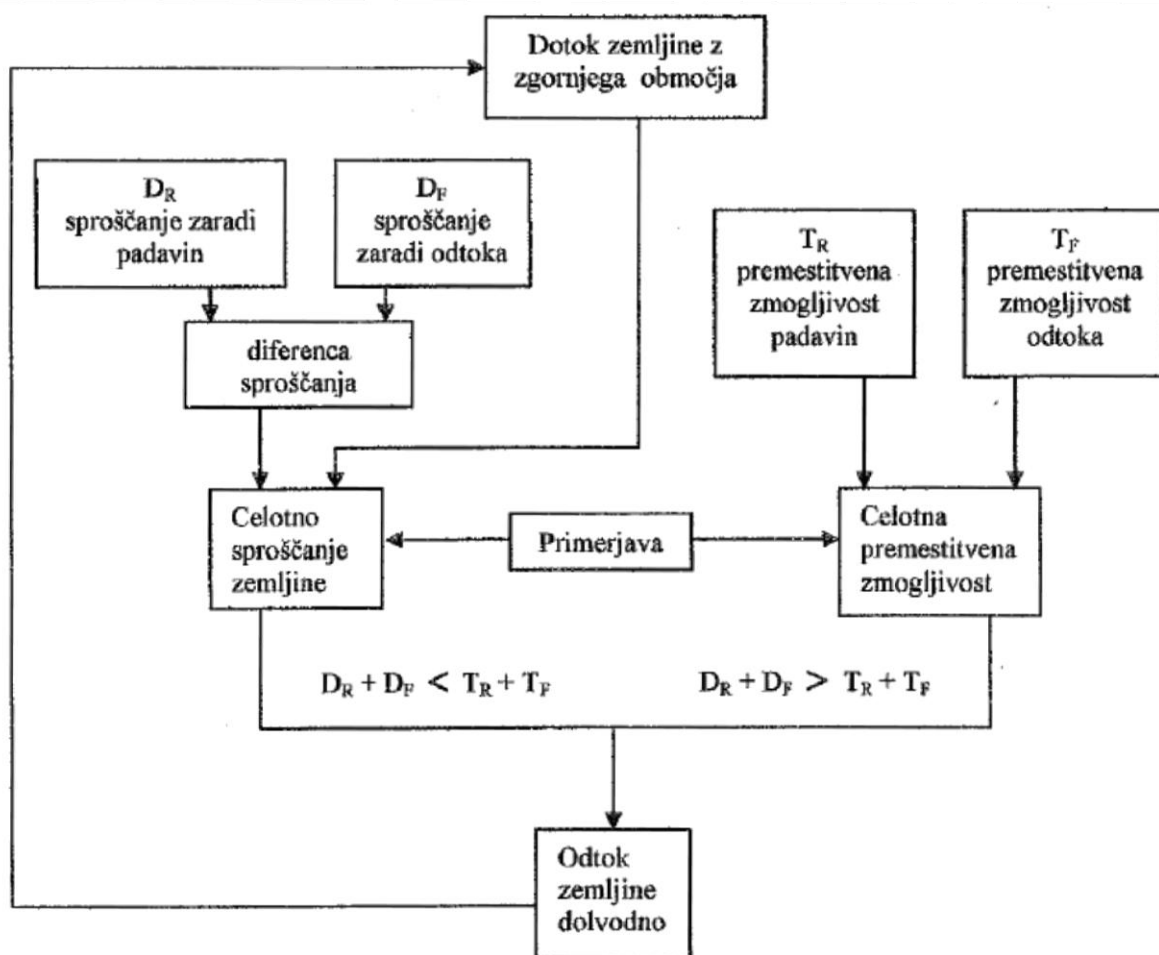
## 3.1.3 Enačba RUSLE

Prvotno je bila enačba USLE razvita za napovedovanje srednje letne izgube zemljine s kmetijskih zemljišč. Njena slabost je, da je ne moremo uporabiti za izračun izgube zemljine za posamezen dogodek, t.j. naliv, za izračun jarkovne erozije, niti za izračune, kjer vrednosti dejavnikov niso določene. V novejšem času je bil model USLE modificiran in izboljšán z novimi spoznanji in je zdaj znan pod imenom MUSLE (Modified USLE) oz. RUSLE (Revised USLE). Glavna sprememba se kaže v dejavniku erozivnost, ki je na novo definiran, ter izboljšavi oblike topografskega dejavnika. Na podlagi teh dveh algoritmov je mogoče napovedati erozijo tudi ob posameznem dogodku, t.j. nalivu (Petkovšek, 2002).

### 3.2 Procesno utemeljeni modeli

Procesno utemeljeni modeli so naslednja stopnja v razvoju empiričnih modelov. Količina sproščenih zemljin, ki jo lahko napovedujemo z empiričnimi in polempiričnimi modeli, v večini primerov ni enaka odplavljanju oziroma količini zemljine, ki je bila dejansko odstranjena s pobočja in je dosegla izbrani presek vodotoka. Na pobočju se namreč pojavijo razmere, ko voda ni več sposobna odnašati vsega erodiranega materiala, in zato nastopi odlaganje (Petkovšek, 2000).

Te sodobne metode za napovedovanje odplavljanja zemljin zato temeljijo na modelih, ki upoštevajo celoten cikel erozijskega procesa, ki je sestavljen iz sproščanja, premeščanja, odlaganja in njihovih medsebojnih vplivov (Petkovšek, 2000). Diagram poteka izračuna je razviden s slike 4, ki je povzeta po Miko (2005). Shemo sta prvotno oblikovala Meyer in Wischmeier (1969), povzel pa jo je Morgan (2005).



Slika 4: Procesi erozije tal (Miko, 2005)

Procesno utemeljene modele odlikuje širša raba možnosti, napovedovanje in prostorska razporeditev odtoka in sedimentov ter večja časovna fleksibilnost (tudi za posamezen naliv) (Miko, 2005).

V nadaljevanju sta opisana dva od vrste procesno utemeljenih modelov, razvitih v zadnjih letih, in sicer modela WEPP in TOPOG.

### **3.2.1 Model WEPP**

WEPP predstavlja kratico za Water Erosion Prediction Project, kar pomeni Projekt za napovedovanje vodne erozije. Zasnovan je na podlagi obširne baze podatkov in namenjen napovedovanju erozijskih procesov na enotnem pobočju ali pa v manjših porečjih, načrtovanju projektov in zaščitnih ukrepov ter pregledu in oceni stanja. Model obravnava procese, kot so: žlebična in medžlebična erozija, premeščanje in odlaganje, infiltracijo, konsolidacijo zemljin, vpliv tal in pokrovnosti na sproščanje in infiltracijo, zablatenje površine, površinski odtok, rast rastlin, razgradnjo organskih ostankov ter mnoge druge procese. Sčasoma naj bi WEPP nadomestil enačbo USLE in njene različice (Petkovšek, 2000).

### **3.2.2 Model TOPOG**

Model temelji na natančni analizi površja, kar pa zahteva kakovostne podatke. Namenjen je za raziskovalne analize, opise topografskih atributov, prostorsko napovedovanje vodne bilance ter nevarnosti površinske erozije in plazanja. Uporablja se tudi za simulacijo nestalnih hidroloških pojavov v porečju, modeliranje in spreminjanje rasti ter posledični vpliv na odtok vode s porečja, modeliranje širjenja polutantov in dinamike plavin na površini porečja. Priporočljiva uporaba modela je na porečjih, manjših od velikosti 10 km<sup>2</sup> (Petkovšek, 2000).

## **3.3 Prostorske analize v GIS-ih**

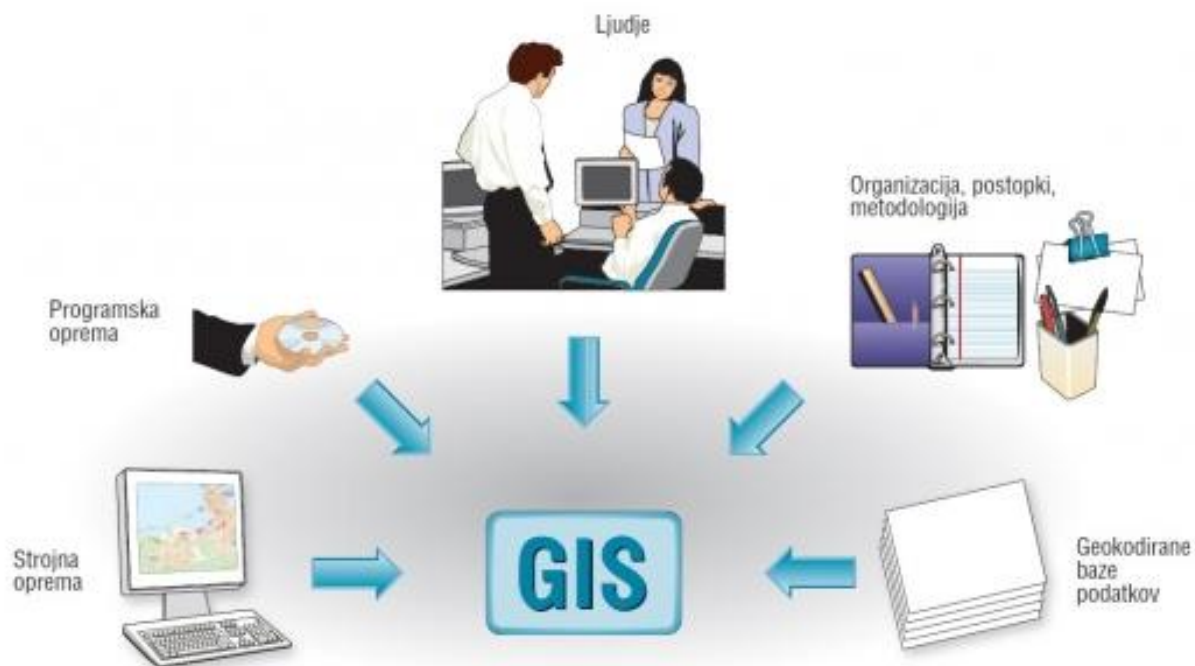
### **3.3.1 Geografski informacijski sistemi (GIS)**

Geografske informacijske sisteme je težko natančno opredeliti, saj zanje obstaja kar nekaj različnih definicij.

Geografski informacijski sistem (GIS) je podatkovno procesni sistem, ki je podprt s strojno in programsko računalniško opremo. Uporablja se za zajemanje, obdelavo, prikazovanje, povezovanje in shranjevanje prostorskih oziroma geografskih podatkov, ki so določeni z opisnimi, lokacijskimi in kartografskimi lastnostmi. Bistveni poudarek geografskih informacijskih sistemov pa je poleg prej naštetega predvsem v različnih analizah prostorskih podatkov, iz katerih ustvarijo neko novo informacijo (Šumrada, 2005).

ESRI (2012) GIS opisuje kot sistem, ki nam omogoče vpogled, razumevanje in interpretacijo podatkov na različne načine. Vzorci, trendi ter odnosi med podatki pa se razkrivajo v obliki poročil, zemljevidov, globusov in grafikonov. GIS nam lahko pomaga najti najprimernejši način rešitve problema, poleg tega pa ga je možno vključiti v vsak informacijski sistem.





Slika 5: Sestavine geografskega informacijskega sistema (Monolit, 2012)

Možnost uporabe geografskih informacijskih sistemov je zelo široka. GIS najdemo v ekologiji, geografiji, geodeziji, arheologiji, hidrologiji in drugih vedah, vezanih na prostor oziroma povsod kjer imamo na voljo sestavine geografskega informacijskega sistema (slika 5).

### 3.3.2 Prostorske analize

Temeljna funkcionalna namembnost tehnologije GIS so predvsem prostorske analize. Opredelimo jih kot postopke, s katerimi obdelujemo prostorske podatke in iz njih ustvarjamo nove podatke in informacije. Prostorski podatki, ki se zbirajo in obnavljajo v GIS-podatkovnih bazah, so poleg posredovanja in izmenjave med različnimi uporabniki namenjeni analitični izrabi v podatkih akumuliranega vedenja o izbranem področju obravnave. Prostorski podatki morajo zadostovati kakovosti, ki tvori niz sestavin ali elementov, kot so razne natančnosti, popolnost in usklajenost v bazi podatkov GIS. Cilj je s pomočjo analitičnih postopkov s podatki ustvariti novo predstavitev, interpretacijo in znanje o prostoru, ki ga podajajo prostorske informacije oziroma odkrivanje novih podatkovnih povezav, ki so sicer brez uporabe tehnoloških pristopov GIS težko razvidne ali določljive (Šumrada, 2005).

Tradicionalno sta bila pri prostorskih analizah v veljavi dva pristopa, ki se med seboj dopolnjujeta. Prvi se je opiral na grafične prikaze in prikazoval pojave na podlagi naravnega in družbenega okolja, v katerem so umeščeni, kar omogoča raziskavo in prikaz prostorske soodvisnosti. Drugi pristop k prostorskim analizam pa skuša pojav kvantitativno in statistično obdelati (Kvamme in sod., 1997).

### 3.3.3 Vektorski in rastrski podatkovni modeli

Šumrada (2005) opisuje dva načina shranjevanja podatkov, in sicer vektorskega in rastrskega. Vektorski podatkovni model temelji na obliki, položaju in povezanosti prostorskih pojavov. Geografski pojavi so določeni z grafičnimi gradniki, kot so točke, črte in območja, podana z zaključnimi obodnimi poligoni. Gradniki se lahko ločeno opredelijo s ključnimi točkami, podanimi v koordinatnem sistemu, in topološkimi povezavami med njimi. Vektorska organizacija grafičnih podatkov temelji na vozliščih, ki so s koordinatami podane točke, osnovni gradnik za sestavo eno- oziroma dvorazsežnih likov (Šumrada, 2005).

V rastrskem podatkovnem modelu je področje obravnave predstavljeno dvorazsežno v smislu pravih celic, ki so navadno kvadrati, načeloma pa so lahko tudi trikotniki, šestkotniki in drugi pravilni mnogokotniki. V rastrskem modelu je poudarek na vsebini in sestavi oziroma notranjosti območij. Celica se pojmuje kot točkovni podatek, ki podaja ločljivost rastrskega modela. Njen položaj je enolično določen s številko vrstice in stolpca v mreži ali matriki.

Sodobni sistemi GIS imajo vgrajene različne tehnike za avtomatsko in polavtomatsko pretvorbo med vektorskimi in rastrskimi podatki in obratno. Vektorski podatki se pretvorijo v rastrske s procesom rasterizacije. Pretvorba rastrskih podatkov v vektorske pa se imenuje vektorizacija. Pri procesu rasterizacije se črte in poligoni najprej prekrijejo z mrežo ustrezne gostote oziroma ločljivosti. Vsaki celici, kateri središče pade v določen poligon, se določi ustrezno vrednost, ki je identična atributni vrednosti poligona. Proces vektorizacije pa je mnogo bolj težaven in procesno zahtevnejši. Različni programi za vektorizacijo pogosto dajejo različne rezultate, čeprav izhajajo iz enakih rastrskih podatkov. Pri pretvorbi se določen del podatkov izgubi, tako da so dobljeni vektorski podatki zmeraj manj natančni od izvora (Kvamme in sod., 1997).

### 3.3.4 Program ArcGIS

ArcGIS je geografski informacijski sistem, ki je eden izmed najbolj razširjenih GIS orodij v svetu. Uporabnikom omogoča zbiranje, obdelavo in shranjevanje prostorskih podatkov. Poleg tega omogoča analizo in izmenjavo novih geografskih informacij med posamezniki, skupinami ali organizacijami (ESRI, 2012).

## 4 ANALIZA SPROŠČANJA IN ODPLAVLJANJA ZEMLJIN

### 4.1 Pregled stanja na Češkem

Transport sedimentov iz obdelovalnih površin v vodotoke predstavlja na Češkem velik problem. Med obdobjem kolektivizacije oziroma odprave zasebne lastnine je bil porušen pokrajinski vzorec in v mnogih regijah se je začela intenzivna kmetijska proizvodnja. Težave z erozijo tal so se v veliki meri stopnjevale. V večini rezervoarjev se je kakovost vode zaradi usedlin, ki jih je prinašala reka, drastično poslabšala. Dodatno so na kakovost vode vplivali tudi razni kmetijsko-kemični preparati, gnojila in odpadni produkti kmetijske proizvodnje. Zaradi velike količine usedlin se je posledično zmanjšala tudi zmogljivost za shranjevanje v rezervoarjih (Krasa in sod., 2013).

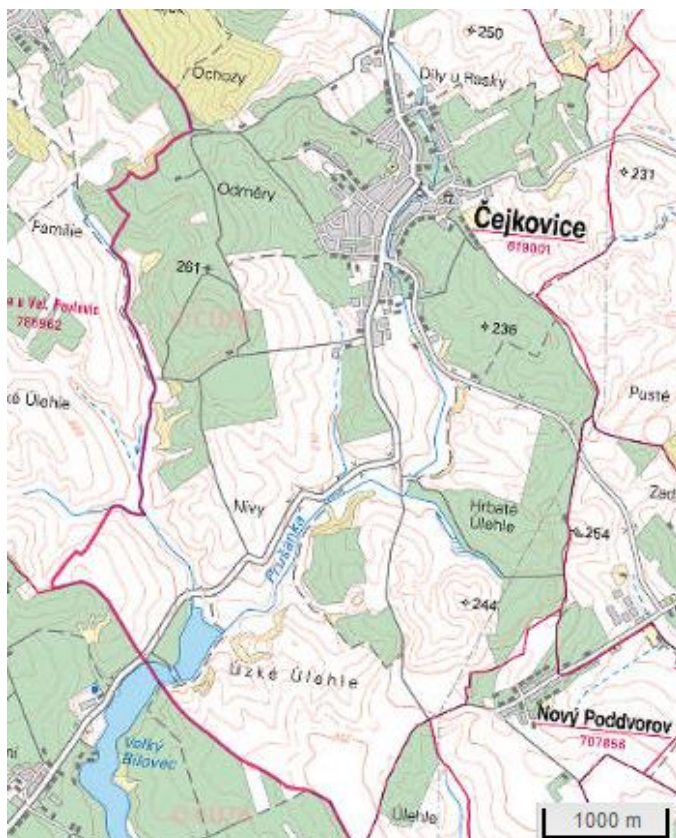
### 4.2 Predstavitev obravnavanega območja

Obravnavano območje leži na Češkem, in sicer na skrajnem jugovzhodnem delu države (označeno s puščico) (slika 6). Od glavnega mesta Prage je oddaljen 260 km, od meje z Avstrijo pa 25 km.



Slika 6: Topografski prikaz lokacije obravnavanega območja (Google Maps, 2013)

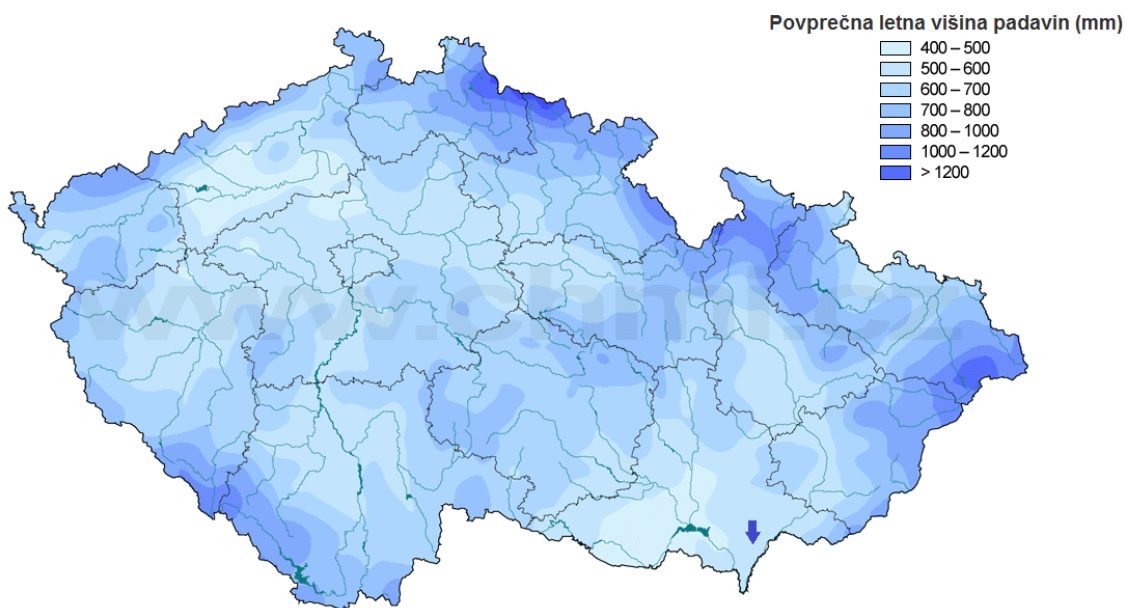
Na severozahodu je območje omejeno z gričevnatim svetom z najvišjo nadmorsko višino 340 m in vasjo Vrbice. Teren proti jugu pada, tako da je povprečna nadmorska višina območja 220 m. Na jugu območje omejuje rezervoar Bilovice, ki leži na nadmorski višini 188 m, na vzhodu pa je območje omejeno z vasjo Stary Poddvorov. Natančneje območje obsega porečje potoka Prušanka in njenega pritoka Vrbičanka, ki sta si vrezali strugo v smeri od severa proti jugu (slika 7). Površina porečja meri 32,5 km<sup>2</sup>. Potok Prušanka teče skozi vas Čejkovice s približno 2500 prebivalci. V območju porečja je dolga 12 km, njen povprečni letni pretok pa ja 0,045 m<sup>3</sup>/s (Krasa, 2013).



Slika 7: Lokacija obravnavanega območja (Geoportal, 2013)

### 4.3 Padavine

Povprečne letne padavine se na Češkem gibljejo med 400–1500 mm (slika 8). Na obravnavanem območju, ki je na sliki 8 označeno s puščico pa je povprečna letna višina padavin 500 mm.



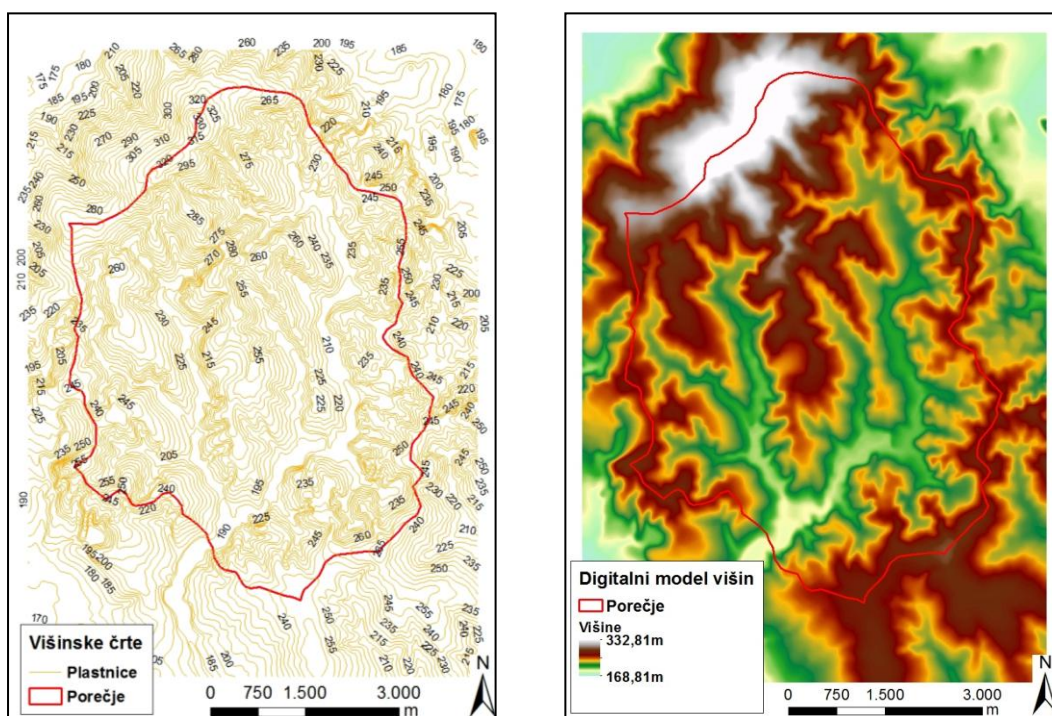
Slika 8: Povprečna letna višina padavin na Češkem (Czech Hydrometeorological Institute, 2013)

## 4.4 Analize

Izbrano porečje je bilo analizirano s pomočjo programa ArcGIS. Vhodni podatki so podani v obliki rastrskih in vektorskih podatkov. Predstavljajo rabo tal, višinske črte, karto kategorizacije zemljin, razvodnico porečja, lego rezervoarja in meritve globine nanosov v rezervoarju. Vhodni podatki so bili z uporabo programskih orodij oziroma postopkov obdelani, iz njih pa so bili ustvarjeni novi podatki in informacije.

### 4.4.1 Analize površja

#### 4.4.1.1 Višinske črte in digitalni model višin



Slika 9: Vektorski prikaz višin s plastnicami Slika 10: Rastrski prikaz višin z digitalnim modelom

Osnova analize spiranja zemljine s porečja so višinske črte oziroma plastnice območja in predstavljajo izhodišče za nadaljnjo analizo (slika 9) (Sylabus akcion, 2012). Podane so v vektorskem podatkovnem modelu z zaključnimi obodnimi poligoni. Digitalni model višin je ustvarjen s procesom rasterizacije, ki pretvori vektorske podatke v rastrske oziroma naredi interpolacijo poligonov v raster (slika 10). Velikost celice v rastru je 15x15 m oziroma 225 m<sup>2</sup>.

Nadmorska višina območja se giblje med 168,81 m in 332,81 m. V porečju je najbolj gričevnat severozahodni del, kjer se griči vzpenjajo do 332,08 m nadmorske višine (preglednica 2). Teren pada od severa proti jugu, vidna je formacija ozkih dolin, po katerih tečejo pritoki potoka Prušanka.

Preglednica 2: Nadmorske višine porečja

	Najmanjša	Največja	Povprečna	Razlika največja-najmanjša
Nadmorska višina porečja [m]	185,82	332,08	233,33	146,26

#### 4.4.1.2 Raba tal

Na karti rabe tal obravnavanega območja prevladujejo obdelovalne površine, ki zavzemajo skoraj tri četrtine območja (slika 11) (Sylabus akcion, 2012). Prevladujejo predvsem žitarice, katerih delež je podan v preglednici 3.

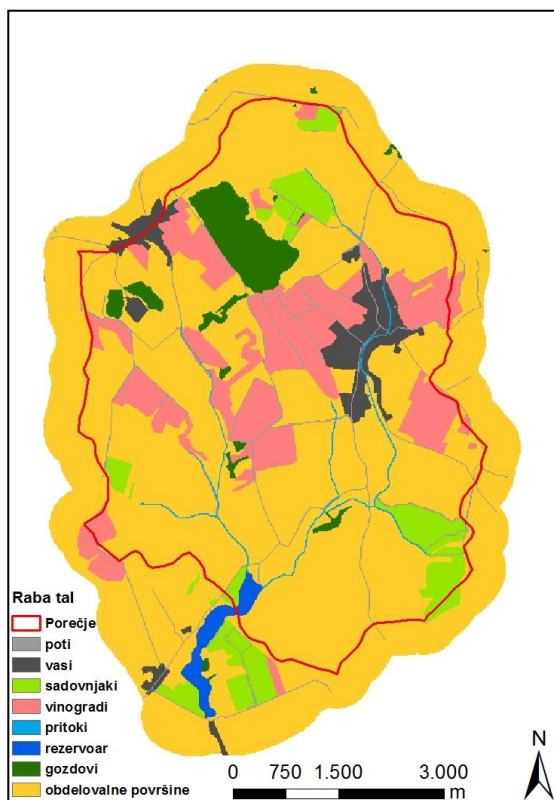
Preglednica 3: Delež žitaric na obravnavanem območju

Vrsta	Koruza	Pšenica	Ječmen	Kalčki
Delež [%]	40	30	15	15

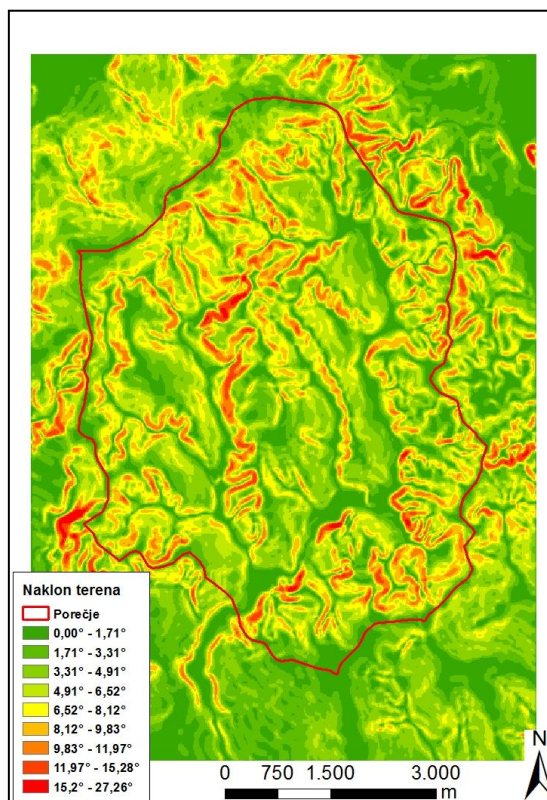
Pomembna kmetijska panoga je vinogradništvo, ki skupaj s sadovnjaki pokriva skoraj petino celotnega območja. Preostanek predstavljajo vasi, gozdovi, poti in pritoki, ki se izlivajo v rezervoar. Deleži posamezne rabe tal območja so podani v preglednici 4.

Preglednica 4: Deleži rabe tal obravnavanega območja

Raba tal	Število celic	Površina [m <sup>2</sup> ]	Površina [%]
Poti	4667	1050075	2,13
Vasi	7456	1677600	3,40
Sadovnjaki	11434	2572650	5,22
Vinogradi	26380	5935500	12,04
Pritoki	1290	290250	0,59
Rezervoar	2127	478575	0,97
Gozdovi	7196	1619100	3,29
Obdelovane površine	158468	35655300	72,35
<b>Skupaj</b>	<b>219018</b>	<b>49279050</b>	<b>100</b>



Slika 11: Raba tal



Slika 12: Naklon terena

#### 4.4.1.3 Naklon terena

Naklon terena se meri s spremembo z-koordinate na določeni razdalji v stopinjah ali odstotkih. Stopinje se uporabljajo predvsem v znanstvenih študijah, odstotki pa pri prometnih in drugih študijah. Podatkovni sloj z nakloni se samodejno klasificira v 9 razredov po Jenksovi metodi naravnih mej (Bobnar in sod., 2005).

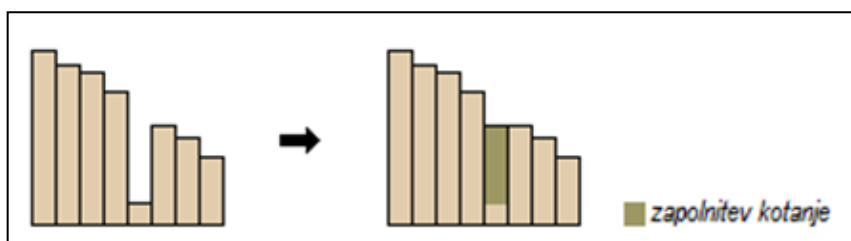
Naklon terena v porečju se giblje med  $0^\circ$  in  $21,07^\circ$  (slika 12; preglednica 5). Pričakuje se, da bo erozija tal najizrazitejša prav v območju največjih naklonov, saj prihaja na strmejših pobočjih do hitrejšega odtekanja vode in zato je močnejše tudi odnašanje delcev. Najstrmejša območja porečja so pokrita predvsem z gozdovi, nekaj pa je tudi vinogradov in sadovnjakov, vendar naklon na teh površinah ni tako izrazit. Položnejše dele pa pokrivajo vasi in obdelovalne površine.

Preglednica 5: Nakloni terena v porečju

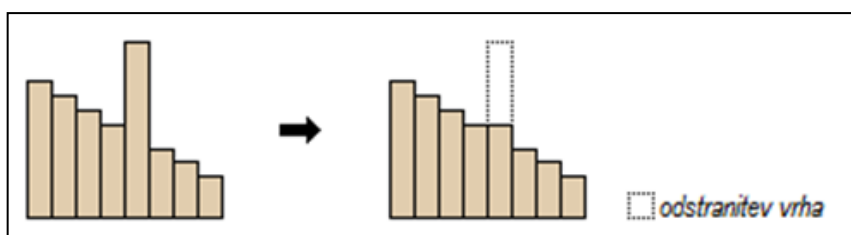
	Najmanjši	Največji	Povprečni
Naklon porečja [°]	0,01	21,07	5,28

#### 4.4.1.4 Smer odtekanja

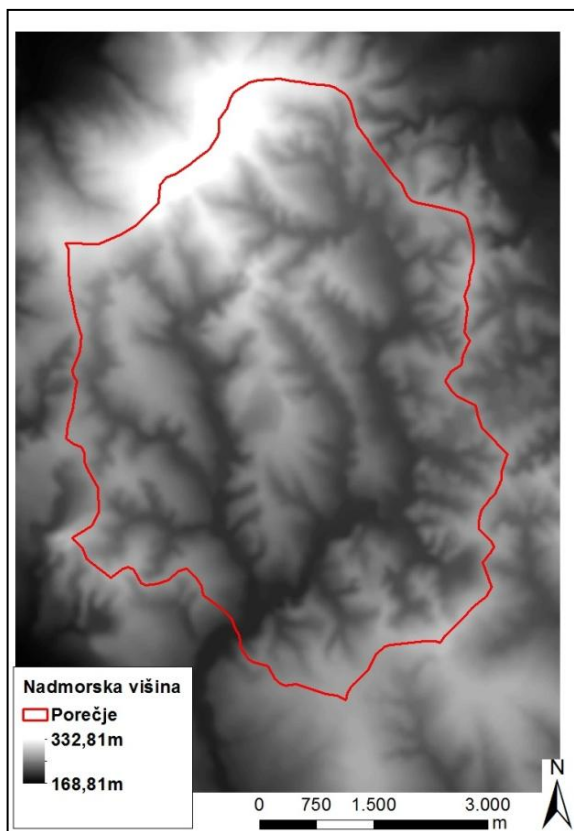
Kotanje in vrhovi, ki glede na okolico izstopajo od pričakovane oblike površja, predstavljajo pogost problem za nadaljnje analize, zato jih je potrebno zaokrožiti na primerne vrednosti. Kotanje je potrebno zapolniti, vrhove pa znižati do te mere, da ne pride do prekinitev drenažnega omrežja. S programom ArcGIS je bilo to doseženo z orodjem *Fill*. Delovanje orodja prikazuje sliki 13 in 14.



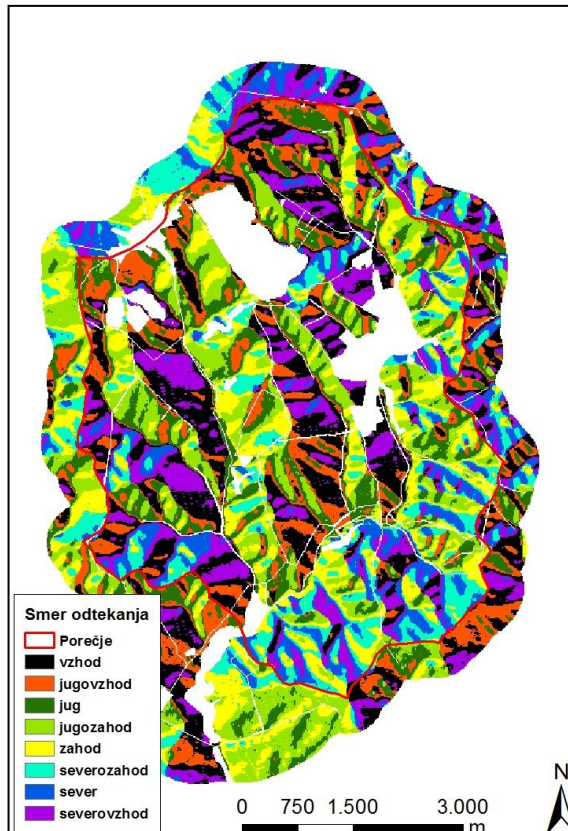
Slika 13: Prečni profil kotanje pred in po zapolnitvi na primerno vrednost



Slika 14: Prečni profil vrha pred in po odstranitvi na primerno vrednost



Slika 15: Karta nadmorskih višin

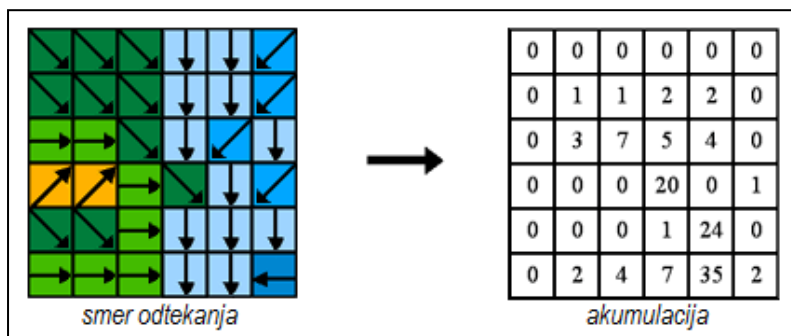


Slika 16: Smer odtekanja vode

Na ta način smo izdelali karto nadmorskih višin (slika 15), ki prikazuje nekoliko spremenjen digitalni model višin in jo potrebujemo za izdelavo karte smeri odtekanja (slika 16). Določitev smeri toka iz vsake celice v rastru je eden izmed osnovnih načinov prepoznavanja hidroloških značilnosti površja. Spremembe v smeri odtekanja vode so najbolj opazne na meji razvodnice. Še posebno na severozahodnem delu, kjer je teren najvišji, je lepo vidna meja, na kateri vode odtekajo proti severu ali proti jugu. V naseljih, na poteh, v potokih, rezervoarju in gozdu pa je erozija tako majhna, da smo jo zanemarili, zato te površine v rezultatih smeri odtekanja vode niso prikazane.

**4.4.1.5 Akumulacija**

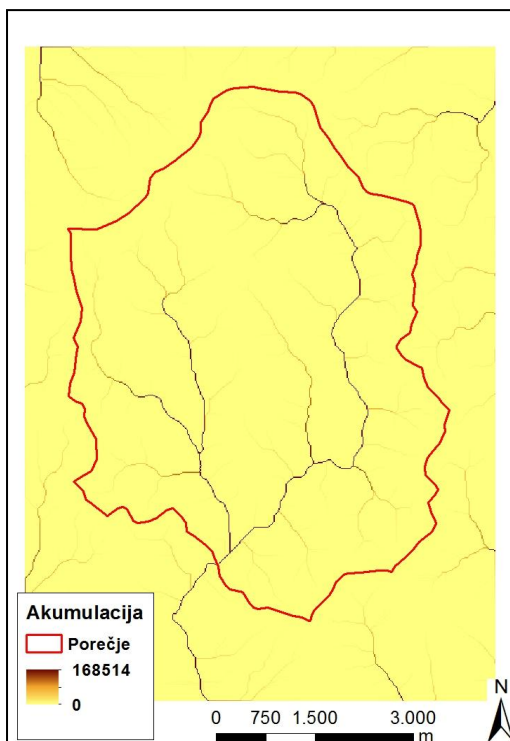
Vsaka celica se izteka v sosednjo glede na najbolj strmo smer padca terena in ima začetno vrednost 1. Vrednost celice, v katero se iztekajo druge, je odvisna od predhodnih vrednosti vstopajočih celic oziroma njihove vsote. Slika 17 prikazuje smer iztekanja vsake celice in število celic, ki se iztekajo v naslednjo celico glede na smer odtekanja.



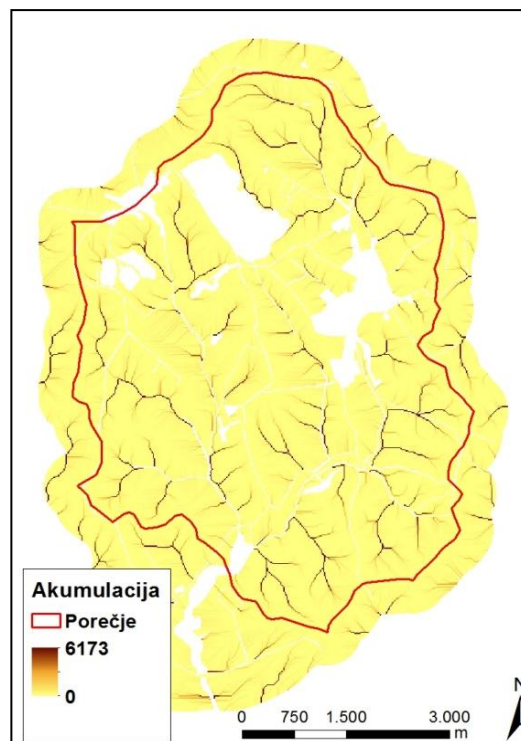
Slika 17: Smeri odtekanja in akumulacija



Z uporabo orodja *Flow accumulation* in predhodno ustvarjene karte smeri odtokanja je bil ustvarjen akumulacijski tok v porečju (slika 18) kot nakopičenje vrednosti vseh celic. V porečju se skupaj izteče 144556 celic, ki zavzamejo območje velikosti 32,5 km<sup>2</sup>.



Slika 18: Akumulacijski tok

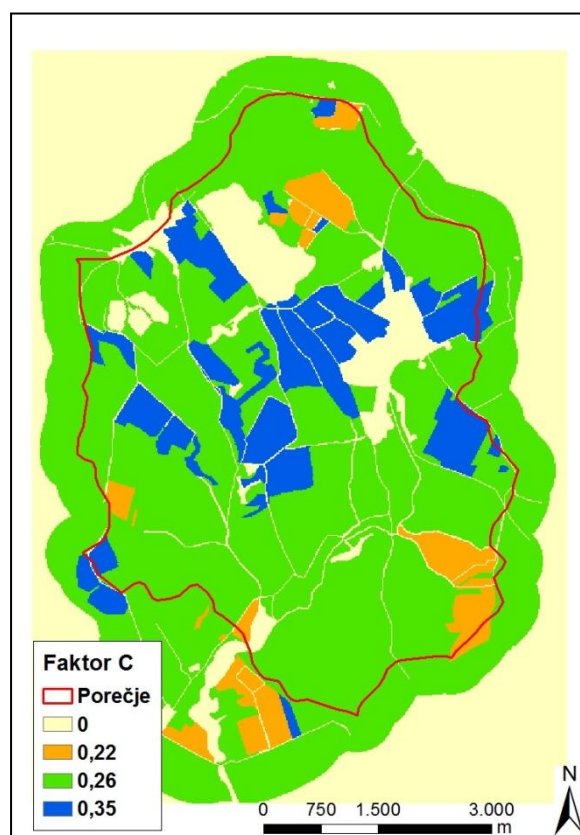


Slika 19: Akumulacijski tok brez erozivnih območij

Na sliki 19 je prikazano, kako so iz obravnave odstranjena območja, kjer je predpostavljeno, da ne pride do erozivnega delovanja. Posledično se je skupna velikost porečja zmanjšala na 28,45 km<sup>2</sup>. Zaradi odstranitve neerozivnih območij so prispevna območja akumulacijskih tokov nekoliko manjša, saj se prispevno območje oziroma akumulacijski tok zaključi na stiku z neerozivnim območjem. Največje prispevno območje posledično zajame 6173 celic, kar ustreza površini 1,4 km<sup>2</sup>.

## 4.4.2 Določitev faktorjev USLE

### 4.4.2.1 Faktor C



Slika 20: Vrednosti faktorja C

Faktor C oziroma dejavnik pokrovnosti in obdelave tal predstavlja razmerje med izgubo tal pri podani pokrovnosti in izgubo tal iz neobdelanega polja. Faktor C je v primeru neerozivnih pogojev oziroma popolne zaščite enak 0, za gola tla, ki so najbolj izpostavljena eroziji, pa je enak 1.

Vrednosti faktorja C za posamezno vrsto obdelave tal (slika 20) so prikazane v preglednici 6. Poti, vasi, potoki, rezervoar in gozdovi so predpostavljeni kot neerozibilna območja, ki jim pripada vrednost 0, sledijo sadovnjaki, obdelovalne površine in vinogradi, ki so s faktorjem 0,35 v porečju najbolj izpostavljeni eroziji tal.

Preglednica 6: Vrednosti faktorja C za posamezno vrsto obdelave tal (Sylabus akcion, 2012)

Raba tal	Faktor C
Vinogradi	0,35
Obdelovalne površine	0,26
Sadovnjaki	0,22
Poti, vasi, potoki, rezervoar, gozdovi	0

Med obdelovalne površine spadajo različne vrste kultur. Ovrednotene so bile po površini in pripadajočem faktorju C, na podlagi tega pa je bil izračunan povprečni faktor C, kar je prikazano v preglednici 7.

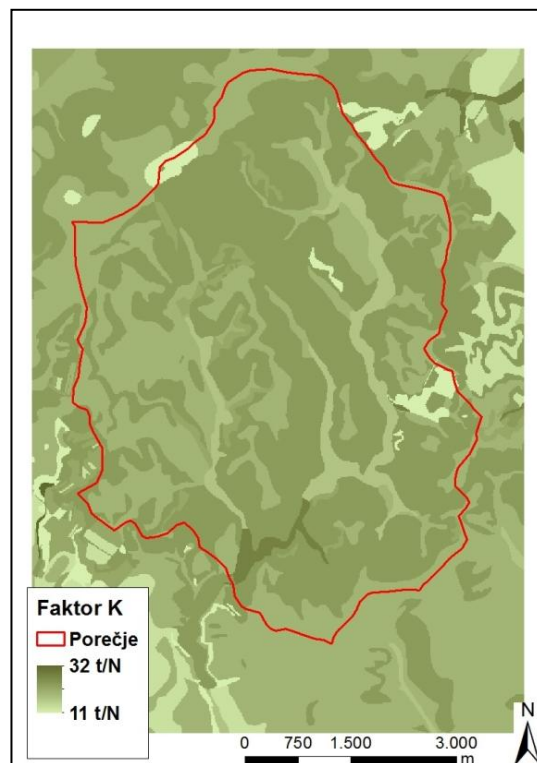
Preglednica 7: Ovrednotenje različnih vrst kultur (Sylabus akcion, 2012)

Obdelovalne površine	Površina v [%]	Faktor C
Koruza	40	0,50
Pšenica	30	0,12
Kalčki	15	0,02
Ječmen	15	0,15
Skupaj	100	Povp. 0,26

#### 4.4.2.2 Faktor K



Slika 21: Kategorizacija zemljin



Slika 22: Vrednosti faktorja K

Kategorizacija zemljin (slika 21) predstavlja vhodni podatek za določitev faktorja  $K$  (Sylabus akcion, 2012). Na obravnavanem območju je veliko različnih vrst zemljin med katerimi prevladuje černoziem. Predstavljajo osnovo za določitev faktorja  $K$  oziroma dejavnika erodibilnosti zemljine, ki je merilo obpornosti talnih delcev proti trganju oziroma sproščanju in premeščanju (slika 22). Faktorji erodibilnosti zemljine temeljijo na osnovi vsebnosti mulja (teksture) in vsebnosti organskih snovi v zemljini. Karto erodibilnosti zemljine smo dobili z reklasifikacijo vrednosti kategorije zemljine v vrednosti erozivnosti tal, ki so prikazane v preglednici 8.

Preglednica 8: Vrednosti faktorja  $K$  glede na kategorizacijo zemljin (Sylabus akcion, 2012)

Kategorija zemljine	Faktor K [t/N]	Kategorija zemljine	Faktor K [t/N]	Kategorija zemljine	Faktor K [t/N]
1	0,24	19	0,25	60	0,23
3	0,25	20	0,21	61	0,25
4	0,14	21	0,11	62	0,28
5	0,21	22	0,19	67	0,32
6	0,24	40	0,18	230	0,26
7	0,19	41	0,25	240	0,26
8	0,26	58	0,28	250	0,26

Večji dejavnik erodibilnosti  $K$  predstavlja manjši odpor posameznega zrna zemljin dinamičnim silam vode. Nizek faktor erodibilnost imajo tla s prevladujočim deležem glinenih ali peščenih delcev ter tla z visoko vsebnostjo organskih snovi, ki se bolj upirajo pljuskanju dežnih kapelj in imajo večjo prepustnost. Visok faktor erodibilnosti pa imajo tla z visokim deležem meljastih delcev, saj se drobni delci enostavno premeščajo (Mikoš in Zupanc, 2000).

#### 4.4.2.3 Faktor $LS$

Za analizo dejavnika dolžine in naklona pobočja je bila uporabljena standardna ali najbolj razširjena vrsta erozijskih ploskev, in sicer t.i. USLE ploskev, katere dolžina meri 22,1 m in naklon 9 %. Čeprav dejavnika dolžine in naklona v enačbi USLE nastopata kot samostojna faktorja, ju pogosto obravnavamo kot skupen dejavnik  $LS$ .

V literaturi obstaja več vrst enačb za izračun faktorja  $LS$ , saj so se sčasoma posodabljale in dopolnjevale. Za potrebe analize je bila za izračun faktorja  $LS$  uporabljena spodnja enačba (Mitasova in sod., 1999):

$$LS = \left( \frac{\text{prispevno območje na enoto širine}}{22,1} \right)^m * \left( \frac{\sin(\theta)}{0,09} \right)^n \quad (4)$$

kjer je:

$\theta$  naklon v [°],

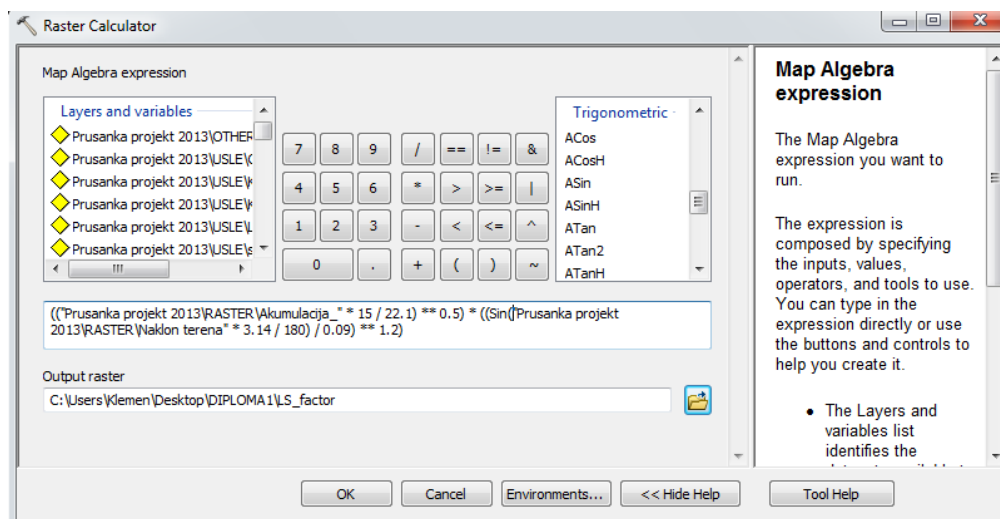
$m, n$  koeficienta.

Značilne vrednosti za koeficienta  $m$  in  $n$  se gibljejo med 0,4 - 0,6 za  $m$  in 1,0 - 1,4 za  $n$ . Koeficienta sta odvisna od vrste toka. Ob večji razpršenosti toka in večji pokrovnosti sta koeficienta  $m$  in  $n$  nižja. Višje vrednosti pa uporabimo pri bolj turbolentnem toku (Mitasova, 2013). Odvisnost koeficienta  $m$  od naklona pobočja je prikazana v preglednici 9. Za potrebe izračuna faktorja  $LS$  so bile uporabljene srednje vrednosti obeh koeficientov, in sicer  $m = 0,5$  in  $n = 1,2$ .

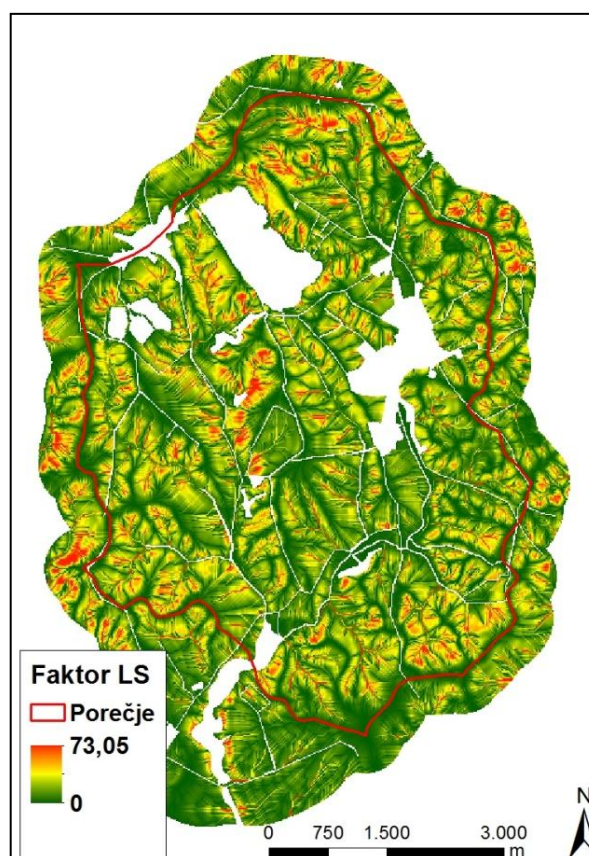
Preglednica 9: Odvisnost koeficienta  $m$  od naklona pobočja (Kirkby in sod., 1980)

Naklon [%]	Koeficient $m$
< 1	0,2
1 ≤ naklon ≤ 3	0,3
3 < naklon < 5	0,4
≥ 5	0,5

Vhodni podatek v enačbo izračuna faktorja  $LS$  predstavlja karta akumulacije porečja, pri kateri so bila odstranjena neerodibilna območja (slika 19) in naklon terena v stopinjah (slika 12), ki se pretvori v radiane. Pomembna so predvsem prispevna območja akumulacijskega toka, ki predstavljajo število celic, ki se nakopičijo v izbrano celico. Na sliki 23 je primer uporabe orodja *Raster Calculator* v programu ArcGIS za izračun faktorja  $LS$  (slika 24).



Slika 23: Uporaba orodja *Raster Calculator* za izračun faktorja *LS*



Slika 24: Vrednosti faktorja *LS*

#### 4.4.2.4 Faktorja *R* in *P*

Faktor *R* oziroma dejavnik padavin in odtoka je bil določen na podlagi raziskave dolgoročne povprečne vrednosti faktorja *R* na Češkem (Krasa, 2008). Obravnavano območje, ki je na sliki 25 označeno s puščico, je v neposredni bližini črte, ki označuje vrednost faktorja *R* 35 [N/ha leto], zato je bila ta vrednost uporabljena za izračun sprane zemljine.

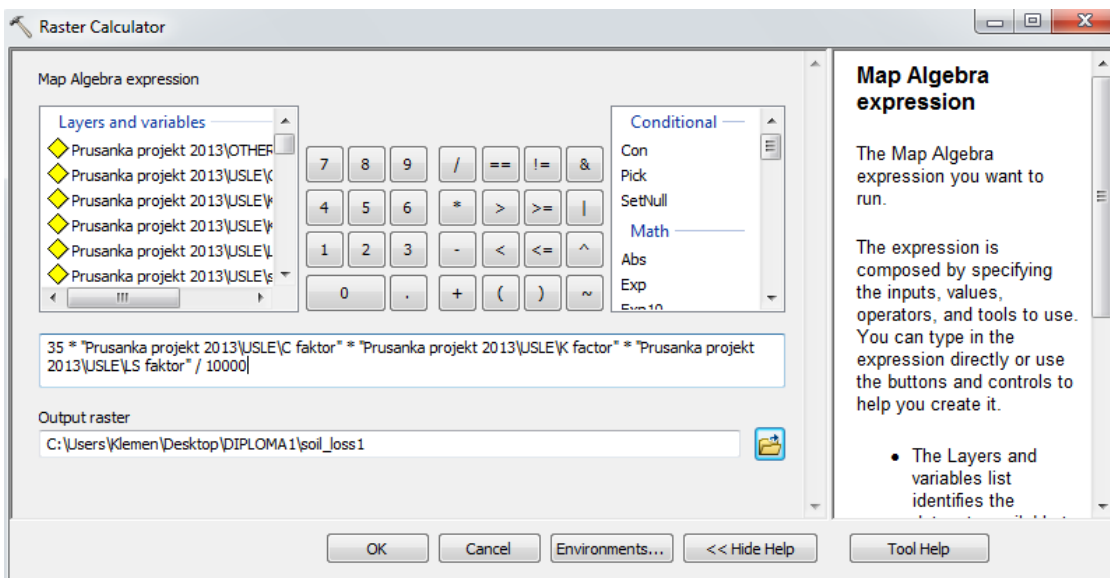
Slika 25: Dolgoročna povprečna vrednost faktorja  $R$ 

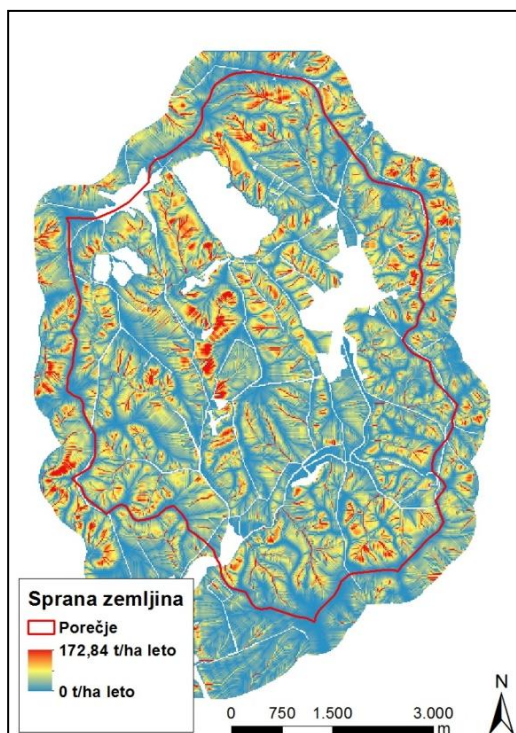
Faktor  $P$  oziroma dejavnik kmetijskih zaščitnih ukrepov je bil ovrednoten z vrednostjo 1, saj na obravnavanem območju ni zaščitnih ukrepov.

#### 4.4.3 Sprana zemljina

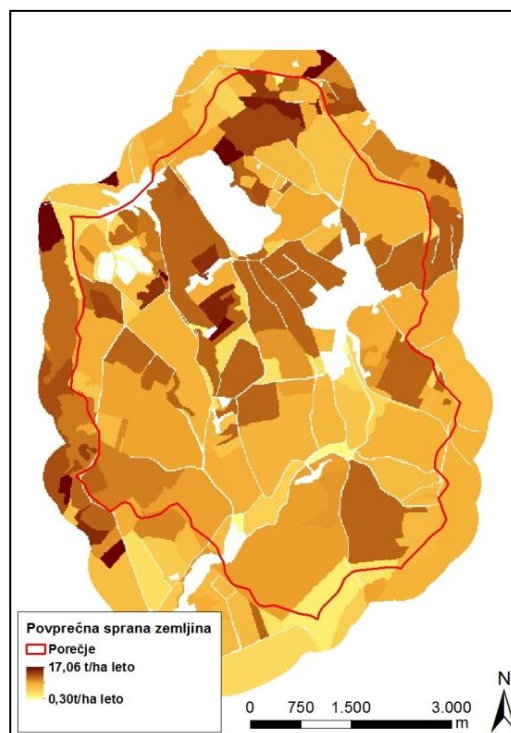
Sprana zemljina iz vsake celice velikosti 225 m<sup>2</sup> analiziranega območja je bila izračunana z uporabo osnovne enačbe USLE (enačba 3) za vrednotenje povprečne letne izgube tal  $A$  [t/ha leto].

Na sliki 26 je primer uporabe orodja *Raster Calculator* v programu ArcGIS za izračun sprane zemljine  $A$  [t/ha leto] v vsaki celici.

Slika 26: Uporaba orodja *Raster Calculator* za izračun količine sprane zemljine  $A$



Slika 27: Količina sprane zemljine porečja



Slika 28: Povprečna količina sprane zemljine porečja

Povprečna količina sprane zemljine glede na rabo tal je največja na območjih obdelovalnih površin, in sicer na posameznih parcelah tudi do 17,06 t/ha na leto (slika 28). Ekstremne vrednosti sprane zemljine (slika 27) so predstavljene v preglednici 10.

Preglednica 10: Ekstremne vrednosti sprane zemljine

	Najmanjša	Največja	Povprečje	Skupaj	Površina [km <sup>2</sup> ]
<b>Količina sprane zemljine [t/ha leto]</b>	0	172,84	5,23	661458,30	28,45

Skupna količina sprane zemljine s porečja znaša 661458,30 t/ha na leto v vsaki celici. Zanima pa nas predvsem skupna sprana zemljina v porečju. Skupno vsoto pomnožimo s površino ene celice, ki meri 225 m<sup>2</sup> in delimo s površino enega hektara, ki meri 10000 m<sup>2</sup>. S preprostim računom dobimo rezultat skupne izgube zemljine v porečju, ki znaša 14882,8 t/leto.

Skupno izgubo zemljine s porečja pretvorimo v enoto [m<sup>3</sup>/leto] s podano gostoto sedimentov, katere vrednost znaša 1,2 t/m<sup>3</sup> (Sylabus akcion, 2012).

$$\text{Skupna izguba zemljine} = \frac{14882,8 \text{ t/leto}}{1,2 \text{ t/m}^3} = 12402,3 \text{ m}^3/\text{leto} \quad (5)$$

Z upoštevanjem celotnega porečja, vključno z območji, kjer je erozija tal zanemarjena, izračunamo povprečno skupno izgubo zemljine v [m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> leto].

$$\text{Povprečna skupna izguba zemljine} = \frac{12402,3 \text{ m}^3/\text{leto}}{32,5 \text{ km}^2} = 381,6 \text{ m}^3/\text{km}^2 \text{ leto} \quad (6)$$

Rezultat nam pove, da se z obravnavanega porečja vsako leto v povprečju sprostijo 0,3816 mm zemljine. Če primerjamo te vrednosti s povprečnim erozijskim sproščanjem zemljin v Sloveniji, ki znaša 250 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/leto, kar je enakovredno znižanju površja za 0,25 mm/leto, opazimo, da se z obravnavanega območja odstrani občutno več zemljine. Tak rezultat se lahko pripiše predvsem veliki površini obdelovalnih površin. Obdelovalne površine so namreč bolj podvržene erozijskemu sproščanju zemljin kakor druge površine (Mikoš in Zupanc, 2000).

#### 4.4.4 Odplavljanje

V prejšnji točki analize smo prišli do rezultata, ki predstavlja količino sproščanja zemljin oziroma skupno količino sprane zemljine v porečju. Ta pa pogosto ni enaka odplavljanju oziroma količini zemljine, ki je bila dejansko odstranjena s porečja. Na pobočju se pojavijo razmere, ko voda ni več sposobna odnašati vsega erozivnega materiala. Pretok plavin je večji od premestitvene zmogljivosti in zato nastopi odlaganje. Ponavadi odplavljanje oziroma transport sedimentov ni na voljo kot rezultat neposrednega merjenja, vendar ga ocenimo z enačbo koeficienta odplavljanja SDR (angl. *Sediment Delivery Ratio*)

$$SDR = \frac{\text{donos sedimentov}}{\text{skupna izguba zemljine}} = \frac{SY}{A} [\%] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} SDR &= \text{funkcija (območje, relief, CN)} = a * F^b * RR^c * CN^d = \\ &= 1,366 * 10^{-11} * (32,53 \text{ km}^2)^{-0,0988} * (6,60 \text{ m/km})^{0,3629} * 80,18^{5,444} = \\ &= 0,4459 \rightarrow 44,59 \% \end{aligned} \quad (8)$$

Vrednost koeficienta odplavljanja v porečju je 0,4459, kar pomeni, da se s porečja v rezervoar odplavi 44,59 % vseh zemljin, ki se sprostijo na površini.

kjer so:

$$a = 1,366 * 10^{-11},$$

$$b = -0,0988,$$

$$c = 0,3629,$$

$$d = 5,444,$$

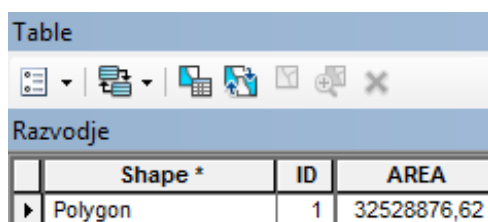
$F$  površina porečja [km<sup>2</sup>],

$RR$  koeficient reliefa,

$CN$  koeficient.

##### 4.4.4.1 Površina porečja $F$

Porečje se razteza na površini 32,53 km<sup>2</sup>. Na sliki 29 je z orodjem *Zonal Statistic as Table* v programu ArcGIS izračunana površina porečja v m<sup>2</sup>.



Shape *	ID	AREA
Polygon	1	32528876,62

Slika 29: Izračun površine porečja  $F$

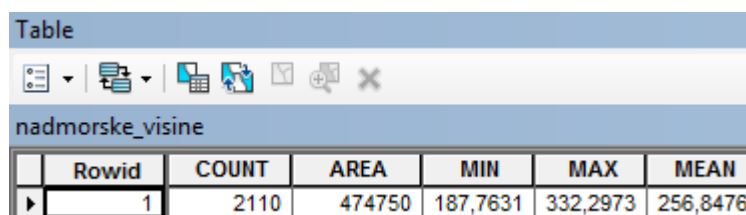


#### 4.4.4.2 Koeficient reliefa *RR*

Koeficient reliefa *RR* izračunamo po enačbi:

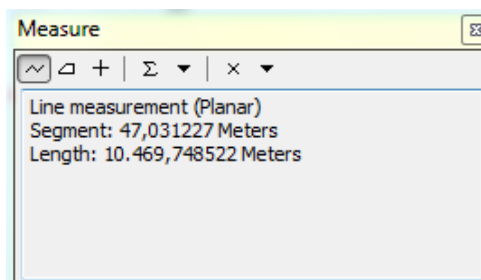
$$RR = \frac{\text{povprečna višina razvodnice} - \text{višina iztoka}}{\text{največja dolžina pritoka}} = \quad (9)$$
$$= \frac{256,8476 \text{ m} - 187,7631 \text{ m}}{10,4697 \text{ km}} = 6,60 \text{ m/km}$$

Potrebne podatke in sicer povprečno višino razvodnice ter višino iztoka za določitev faktorja *RR* dobimo z orodjem *Zonal Statistic as Table* (slika 30). Največjo dolžino pritoka dobimo z orodjem *Measure* (slika 31) v programu ArcGIS.



Rowid	COUNT	AREA	MIN	MAX	MEAN
1	2110	474750	187,7631	332,2973	256,8476

Slika 30: Izračun višine iztoka in povprečna višine razvodnice



Line measurement (Planar)
Segment: 47,031227 Meters
Length: 10.469,748522 Meters

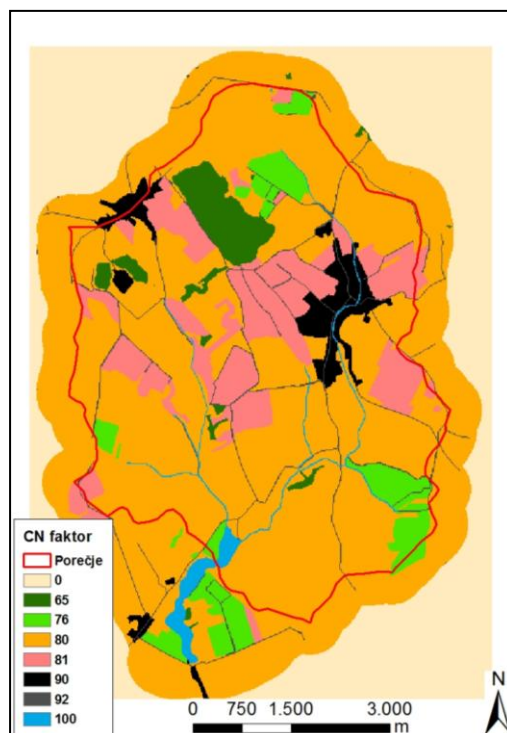
Slika 31: Izračun največje dolžine pritoka

#### 4.4.4.3 Koeficient *CN*

Koeficient *CN* se uporablja za določitev površinskega odtoka v odvisnosti od padavin. Z njim se opiše lastnosti zemljine, kot je raba in vrsta tal ter predhodna vlažnost zemljine. Visoka vrednost koeficienta *CN* pomeni velik površinski odtok s porečja. Koeficient *CN* je določen glede na rabo tal (preglednica 11) (slika 32).

Preglednica 11: Vrednosti faktorja *CN* v odvisnosti od rabe tal (Sylabus akcion, 2012)

Raba tal	Faktor <i>CN</i>
Poti	92
Vasi	90
Sadovnjaki	76
Vinogradi	81
Pritoki	100
Rezervoar	100
Gozdovi	65
Obdelovalne površine	80



Slika 32: Vrednosti faktorja CN

Povprečno vrednost koeficienta CN (*Average SCS curve number value within the watershed*) smo pridobili z orodjem *Zonal Statistic as Table* (slika 33) in sicer 80,18.

Table						
cn_faktor						
Rowid	ID	COUNT	AREA	MIN	MAX	MEAN
1	1	144556	3252510	65	100	80,17962

Slika 33: Izračun povprečne vrednosti faktorja CN

#### 4.4.5 Donos sedimentov v rezervoar

Donos sedimentov izračunamo s preoblikovanjem že omenjene enačbe koeficienta odplavljanja (enačba 7):

$$SDR = \frac{\text{donos sedimentov}}{\text{skupna izguba zemljine}} = \frac{SY}{A} [\%] \rightarrow SY = A * SDR \quad (10)$$

$$SY = A * SDR = 14882,8 \text{ t/leto} * 0,4459 = 6636,2 \text{ t/leto}$$

Upoštevajoč trajanje donosov (21 let), gostote sedimentov ( $1,2 \text{ t/m}^3$ ) in koeficienta *Reservoir Trapping Efficiency* z vrednostjo 0,95, ki predstavlja razmerje med usedlimi sedimenti in celotno količino vstopnih sedimentov v rezervoar (Sylabus akcion, 2012), dobimo končno vrednosti usedlin v rezervoarju.

$$SY_{\text{končna}} = \frac{A * SDR * 21 * 0,95}{1,2 \text{ t/m}^3} = \frac{14882,8 \text{ t/leto} * 0,4459 * 21 \text{ let} * 0,95}{1,2 \text{ t/m}^3} = 110327 \text{ m}^3 \quad (11)$$

## 5 MERITVE SPRANE ZEMLJINE

Rezervoar Bilovice je sestavljen iz treh med seboj povezanih zadrževalnikov vode. Imenujejo se po številkah 1, 2 in 3 v nasprotni smeri toka potoka Prušanke (preglednica 12). Zgornji rezervoar je torej rezervoar 3, ki je na sliki 34 označen z rumeno črto.

Preglednica 12: Karakteristične vrednosti rezervoarjev (Krasa, 2013)

	Rezervoar 1	Rezervoar 2	Rezervoar 3
Nadmorska višina [m]	187,3	187,5	188,8
Površina [ha]	17,2	15,0	11,1
Prostornina [km <sup>3</sup> ]	0,376	0,138	0,142



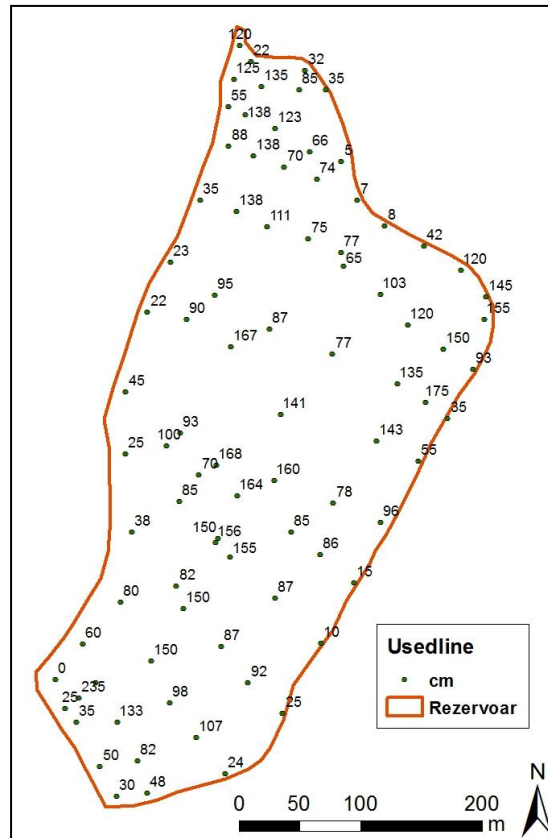
Slika 34: Ortofoto posnetek rezervoarja Bilovice (Sylabus akcion, 2012)

Glavni namen sistema je kopičenje vode za potrebe namakanja ter regulacija pretoka potoka Prušanke ( $Q_{\text{MIN}} = 8 \text{ l/s}$ ), ki zagotavlja požarno vodo in zadostno količino vode za ribolov (Krasa, 2013).

### 5.1 Mesta meritev

Meritve so izvedli strokovni delavci Fakultete za gradbeništvo v Pragi ob pomoči zunanjih sodelavcev. Meritve so bile izvedene v dveh fazah in sicer na rezervoarju 1 in 2 nato pa še na rezervoarju 3, ki je predmet naše nadaljne obravnave.

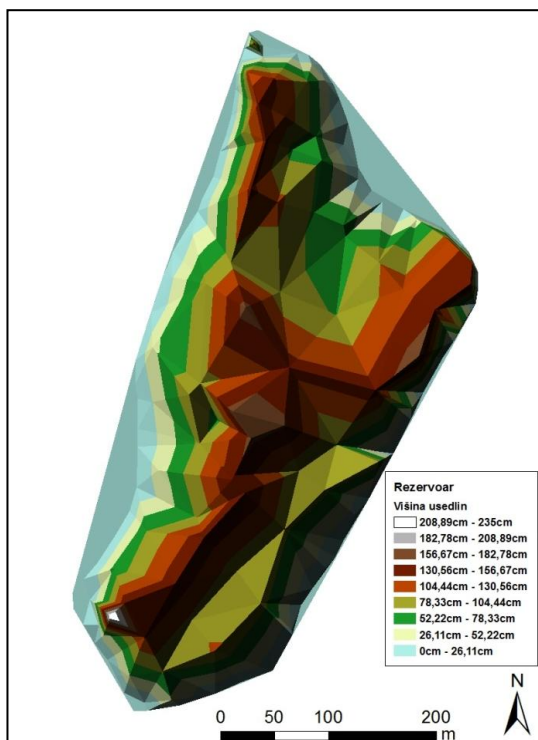
Karta merilnih mest debeline usedlin (slika 35) predstavlja vhodni podatek v analizo (Sylabus akcion, 2012). Na območju rezervoarja 3 je bilo izvedenih 86 meritev debeline usedlin, kar zagotavlja dokaj visoko zanesljivost končnih izračunov globine in prostornine usedlin v rezervoarju (slika 35). Vzdolž robov rezervoarja se je globina sedimentov gibala od 0–10 cm, vzdolž trase prvotnega kanala pa 150–170 cm (Krasa, 2013).



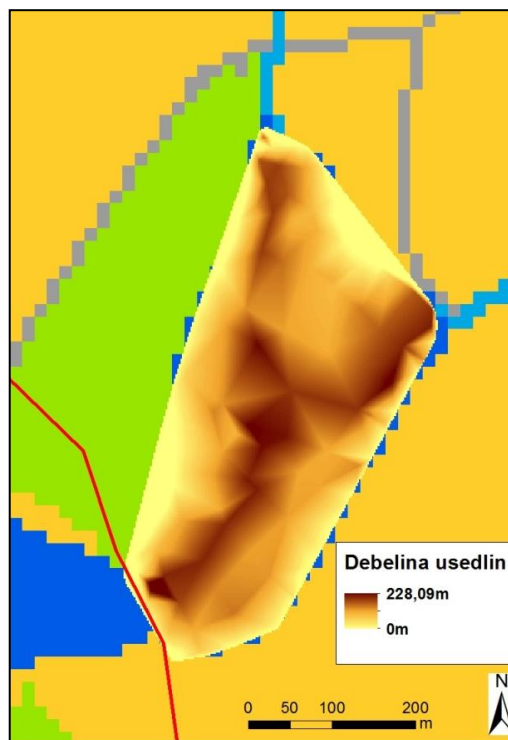
Slika 35: Mesta meritev usedlin

## 5.2 Usedline v rezervoarju

Na podlagi meritev debeline sedimentov smo ustvarili karto debeline usedlin v TIN (mreža neenakih trikotnikov) (slika 36) in rasterski obliki (slika 37).



Slika 36: Debelina usedlin v TIN obliki



Slika 37: Debelina usedlin v rastrski obliki

Karakteristične debeline usedlin v rezervoarju so podane v preglednici 13.

Preglednica 13: Debeline usedlin v rezervoarju

	<b>Najmanjša</b>	<b>Največja</b>	<b>Povprečje</b>	<b>Vsota</b>
<b>Debelina usedline [cm]</b>	0	235	94,3	2.796.083

Pri pretvorbi debeline usedlin iz oblike TIN v rastersko obliko se rezultati nekoliko razlikujejo od dejanskih. Največja debelina usedlin v rasterski obliki je 228,09 cm. Napako lahko pripišemo predvsem ločljivosti rasterskega zapisa, saj lahko celice izpuščajo pomembne detajle, ker je velikost in s tem gostota celic enaka. S karte debeline usedlin v rastrski obliki je lepo razvidno mesto vstopa vodnega toka in tok skozi rezervoar, saj je tam debelina usedlin najdebelejša.

Vsota debeline usedlin vseh celic, iz katerih se sedimenti odložijo v rezervoarju je 2.796.083 cm. Glede na velikost celice, ki meri 2x2 m, je za rezultat v enoti [m<sup>3</sup>] je potrebno deliti vsoto s 25, pri čemer se dobi končno izmerjeno količino sedimentov v rezervoarju in sicer 111.843 m<sup>3</sup>.

## 6 PRIMERJAVA REZULTATOV

S pomočjo vhodnih podatkov smo z orodji programa ArcGIS ustvarjali nove podatke oziroma delne rezultate, ki smo jih uporabili za končni izračun količine sprane zemljine iz porečja v rezervoar. Izračunana količina sprane zemljine iz porečja v rezervoar nam sama so sebi ne pove veliko, zato smo jo primerjali z izmerjeno količino usedlin v rezervoarju. Iz preglednice 14 je razvidno, da sta izračunana vrednost usedlin in izmerjena vrednost usedlin, ki se odložijo v rezervoarju skoraj enaki. Razlika med vrednostima je  $1516 \text{ m}^3$ , kar predstavlja 1,4 % izmerjene vrednosti. Rezultat kaže na zelo dobro ujemanje med izračunano in izmerjeno količino usedlin. Analiza površja in metoda za izračun sprane zemljine USLE se je izkazala za zelo točno, saj bi rezultate težko izračunali bolje oziroma bližje izmerjeni vrednosti.

Preglednica 14: Izračunana in izmerjena vrednost debeline usedlin

	Izračunana vrednost	Izmerjena vrednost
<b>Količina usedlin [<math>\text{m}^3</math>]</b>	110.327	111.843

## 7 ZAKLJUČEK

V okviru naloge smo obravnavali erozijo prsti v porečju potoka Prušanka na Češkem. Na podlagi modela erozije tal smo s pomočjo enačbe USLE napovedali količino sprane zemljine s porečja. V posameznih celicah smo dobili ekstremno visoke vrednosti sprane zemljine, kar pa ne pomeni, da se tolikšna količina zemljine z obravnavanih celic dejansko odplavi. Lahko rečemo, da je lokalno v teh celicah sproščanje veliko večje kot v ostalih celicah. Z izračunom povprečnih vrednosti sprane zemljine v okolici teh celic pa dobimo boljši približek dejanskega stanja sproščanja zemljin.

Glede na količino sprane zemljine smo napovedali vrednost koeficienta odplavljanja oziroma količino zemljine, sprane s porečja. S porečja se odplavi 44,59 % vseh zemljin, ki se preko rečnega sistema odložijo v rezervoarju. Več kot polovica sprane zemljine pa se le premesti na druga območja.

Uporabnost oziroma zanesljivost modela smo preverili s primerjavo izračunanega donosa sedimentov v rezervoar v obdobju 21 let in terenskimi meritvami usedlin v rezervoarju. Razlika med izmerjeno in izračunano količino usedlin v rezervoarju je le 1,4 %, kar pomeni zelo dobro ujemanje. Napoved donosa sedimentov v rezervoar bi težko izračunali bolje, saj se je sedanja metoda izkazala za zelo točno. Zasluga za tak rezultat pa gre natančnim vhodnim podatkom, natančni analizi in meritvam na terenu.

## VIRI

Bobnar, S., Drobne, S., Šumrada, R. 2005. Vaje iz prostorskih analiz v ArcGIS-u. Priročnik za vaje iz prostorskih analiz v GIS-orodju ArcGIS. Ljubljana: 91 str.

ESRI – Environmental Systems Research Institute. 2013.

<http://www.esri.com/what-is-gis> (Pridobljeno 4. 7. 2013.)

Gavrilović, S. 1970. Savremeni načini proračunavanja bujičnih nanosa i izrada karata erozije. Posvet Erozijska, bujični tokovi i rečni nanos. Institut Jaroslav Černi, Beograd, 85–100

Geoportal. 2013.

<http://geoportal.gov.cz/en/web/guest/map?wms=http://ags1.geology.cz/ArcGIS/services/wms/GM500K/MapServer/WMServer> (Pridobljeno 5. 7. 2013.)

Google Maps. 2013.

<https://maps.google.si/maps?hl=sl&tab=wl> (Pridobljeno 5. 7. 2013.)

Hahn, C. T., Barfield, B. J., Hayes, J. C. 1994. Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments. San Diego, Academic Press, Inc.: 588 str.

Hudson, N. 1995. Soil Conservation. Fully Revised and Updated Third Edition. London, Batsford Book: 391 str.

Kirkby, M. J. (ur.), Morgan, R. P. C. (ur.), Bubenzer, G. D., Cooke, R. U., De Ploey, J., Evans, R., Gabriels, D., Mitchell, J. K., Thornes, J. B., Wilson, S. J. 1980. Soil Erosion. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, John Wiley & Sons, Ltd.: 312 str.

Krasa, J. 2008. Dolgoročne povprečne vrednosti faktorja R na Češkem. ČVUT v Praze, Fakulta stavebni, Katedra hydromelioraci a krajinného inženýrství. 2013.

[http://storm.fsv.cvut.cz/on\\_line/piv3/mapa\\_R\\_faktor\\_dlouhodoby.jpg](http://storm.fsv.cvut.cz/on_line/piv3/mapa_R_faktor_dlouhodoby.jpg) (Pridobljeno 15. 8. 2013.)

Krasa, J. 2013. Projekt COST OC 623.001. ČVUT v Praze, Fakulta stavebni. Osebna komunikacija. (28. 7. 2013.)

Krasa, J., Dostal, T., Becvar, M., Vrana, K. 2013. Sediment transport in large watersheds in the Czech Republic. Osebna komunikacija. (27. 7. 2013.)

Kvamme, K., Oštir-Sedej, K., Stančič, Z., Šumrada, R. 1997. Geografski informacijski sistemi. Ljubljana, Znanstveno-raziskovalni center slovenske akademije znanosti in umetnosti: 476 str.

Meyer, L. D., Wischmeier, W. H. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Trans. ASAE 12(6), 5: 754–758.



Miko, M. 2005. Površinska erozija tal. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za vodarstvo in komunalno inženirstvo: 56 str.

Mikoš, M. 1995. Soodvisnost erozijskih pojavov v prostoru. Gozdarski vestnik 53, 10: 342–351.

Mikoš, M., Zupanc, V. 2000. Erozija tal na kmetijskih površinah. Sodobno kmetijstvo 33: 419–423.

Mitasova, H. 2013. Using Soil Erosion Modeling for Improved Conservation Planning: A GIS-based Tutorial. Geographic Modeling Systems Lab, UIUC. 2013.

<http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/reports/CerlErosionTutorial/denix/Models%20and%20Processes/RUSLE3d/RUSLE3d.htm> (Pridobljeno 10. 8. 2013.)

Mitasova, H., Mitas, L., Brown, W. M., Johnston, D. M. 1999. Terrain modeling and Soil Erosion Simulations for Fort Hood and Fort Polk test areas. Illinois, University of Illinois at Urbana-Champaign, Geographic Modeling and Systems Laboratory. 2013.

<http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/reports/cerl99/rep99.html> (Pridobljeno 10. 8. 2013.)

Monolit 2012, Informacijski sistemi d.o.o. Geografski informacijski sistemi. 2013.

<http://www.monolit.si/resitve-in-storitve/geografski-informacijski-sistem/> (Pridobljeno 4. 7. 2013.)

Morgan, R. P. C. 2005. Soil Erosion & Conservation. Third Edition. Malden, Oxford, Carlton, Blackwell Publishing company: 304 str.

Petkovšek, G. 2000. Procesno utemeljeno modeliranje erozije tal. = Process Based Soil Erosion Modelling. Acta hydrotechnica 18/28, 20: 41–60.

Petkovšek, G. 2002. Kvantifikacija in modeliranje erozije tal z aplikacijo na povodju Dragonje. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 205 str.

Pintar, J., Mikoš, M. 1983. Izdelava smernic in normativov z globalno usmeritvijo urejanja po ekosistemih, pojavnosti in ekološki primernosti ter načinov gospodarjenja s povirji voda. Ljubljana, Poročilo VGI C-432: 133 str.

Pintar, J., Mikoš, M., Verbovšek, V. 1986. Elementi okolju prilagojenega urejanja vodotokov. Drugi kongres o vodama Jugoslavije, Ljubljana, knjiga II, 800–814.

Povprečna letna višina padavin v [mm]. Czech Hydrometeorological Institute. 2013.

<http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/images/sra6190.gif> (Pridobljeno 15. 8. 2013.)

Sylabus akcion. 2012. Soil conservation and challenge for the future? Application of soil erosion models for evaluating efficiency of mitigation measures. CTU Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Irrigation, Drainage and Landscape Engineering: 11 str.

Staut, M., Mikoš, M. 2008. Spremembe intenzivnosti erozije v porečju Dragonje v drugi polovici 20. stoletja. ANNALES - Ser. hist. nat - 18, 16: 137–152.

Summer, W., Klaghofer, E., Zhang, W. 1998. Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes. Wallingford, Institute of Hydrology, IAHS Press: 453 str.

Šumrada, R. 2005. Strukture podatkov in prostorske analize. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 284 str.

Toy, T. J., Foster, G. R., Renard, K. G. 2002. Soil Erosion. Processes, Prediction, Measurement, and Control. New York, John Wiley & Sons, Inc.: 338 str.

UNEP. 1994. Guidelines for Sediment Control Practises in the Insular Caribbean. Kingston, UNEP Caribbean Environment Programme, CEP Technical Report No. 32: 58 str.

USLE - Universal Soil Loss Equation. 2013.

<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-051.htm> (Pridobljeno 6. 7. 2013.)