

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Ljubljana, 2017

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE VODARSTVO IN
OKOLJSKO INŽENIRSTVO**

Kandidat/-ka:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

ZAHVALA

Za vse strokovne nasvete in pomoč pri nastajanju magistrske naloge se najlepše zahvaljujem mentorju, prof. dr. Matjažu Mikošu, in somentorju, asist. dr. Nejcu Bezaku.

Za posredovanje podatkov, uporabljenih v nalogi, se zahvaljujem Zorku Vičarju ter ARSO.

Uspešen zaključek študija prav tako ne bi bil mogoč brez najbližjih; hvala vam za vso podporo v preteklih letih.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	551.577.5:556.121(497.4)(043.3)
Avtor:	Manca Petek
Mentor:	prof. dr. Matjaž Mikoš
Somentor:	asist. dr. Nejc Bezak
Naslov:	Analiza erozivnosti padavin v Sloveniji
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	95 str., 32 pregl., 27 sl., 35 en.
Ključne besede:	Erozivnost padavin, erozija tal, padavine, RUSLE, R faktor, gostota erozivnosti, RIST, SAGA, analiza trenda, Mann-Kendall, Mann-Whitney, sezonskost, analiza občutljivosti, normaliziran kazalnik občutljivosti, standardni regresijski koeficient

Izveček

Za Slovenijo so značilni padavinski dogodki visoke intenzitete in krajšega trajanja, kar jo uvršča med območja z višjimi vrednostmi erozivnosti padavin v Evropi. V magistrski nalogi je predstavljeno stanje na področju analiz erozivnosti padavin in z njo povzročene erozije tal; opisane so vrste erozije, dejavniki, ter podrobno obravnavan eden izmed njih – dejavnik erozivnosti padavin. S pomočjo izbranih programskih orodij (R, RIST, Orange in SAGA) so bile za izbranih deset pluviografskih postaj po Sloveniji najprej izračunane vrednosti faktorja erozivnosti padavin in površinskega odtoka (R-faktorja) – in sicer po posameznih letih, mesecih, ter s pomočjo izbranih enačb po različnih avtorjih (Brown in Foster, van Dijk, Petan) tudi izvedena primerjava in analiza rezultatov. Eden od ciljev naloge je bila določitev občutljivosti vhodnih parametrov modela izračuna erozivnosti padavin in njihov vpliv na končno vrednost faktorja erozivnosti R , za kar je bila izvedena analiza občutljivosti s pomočjo metod normaliziranega kazalnika občutljivosti in standardnega regresijskega koeficienta. S pomočjo izračunanih letnih vrednosti R faktorja je bila izvedena analiza trenda z metodo Mann-Kendall, analizirana podobnost vzorcev s testom Mann-Whitney ter ovrednoteni rezultati glede na sorodne študije v preteklosti. Analizirana je bila tudi sezonskost faktorja R za izbrane pluviografske postaje v Sloveniji, ter s pomočjo analize sezonskih grafov izvedena klasifikacija vseh obravnavanih postaj glede na njihove sezonske značilnosti. Za izbrano območje porečja Save do vodomerne postaje Kranjska gora (v okolici pluviografske postaje Rateče) je bil predstavljen izračun erozije tal s pomočjo metode RUSLE, ter analizirani vplivi spreminjanja dejavnikov (R , K , LS , C , P) na končno oceno izgube tal zaradi erozije.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 551.577.5:556.121(497.4)(043.3)
Author: Manca Petek
Supervisor: Prof. Matjaž Mikoš, Ph.D.
Cosupervisor: Assist. Nejc Bezak, Ph.D.
Title: Rainfall erosivity analysis in Slovenia
Document type: Master's Thesis
Scope and tools: 95 p., 32 tab., 27 fig., 35 eq.
Keywords: Rainfall erosivity, soil erosion, rainfall, RUSLE, R-factor, erosivity density, RIST, SAGA, trend analysis, Mann-Kendall, Mann-Whitney, seasonality, sensitivity analysis, normalized sensitivity index, standardized regression coefficient

Abstract

Slovenia is characterised by rainfall events of high intensity and short duration, which puts it among areas with high rainfall erosivity values in Europe. This Master's thesis focuses on the current state in rainfall erosivity and soil erosion connected to it. Types of erosion, the physical forms and factors of soil erosion are presented, with in-depth analysis of one of its main characteristics – the rainfall erosivity factor *R*. Using various tools (R, RIST, Orange and SAGA), calculations and analyses were performed for selected pluviographic stations across Slovenia. R-factor was determined by year, month and in accordance with various equations of different authors (Brown and Foster, van Dijk, Petan), after which comparisons were drawn and results analysed. Determining the sensitivity of input model parameters and their effect on model output R-factor values was one of the goals of the study. This was achieved using sensitivity analysis tools – Normalized Sensitivity Index and Standardized Regression Coefficient. Using annual values of *R*-factor, a trend analysis was performed, using Mann-Kendall test, after which different samples were compared according to the Mann-Whitney test. The results were evaluated in comparison to similar studies and literature. The seasonality of R-factor for the selected pluviographic stations was analysed, along with the classification according to seasonality traits. For a selected area, the calculation of soil erosion was presented, according to the RUSLE method. The change in input parameters of RUSLE equation (*R*, *K*, *LS*, *C*, *P*) were analysed and their impact on soil erosion values evaluated.

KAZALO VSEBINE

ZAHVALA	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION.....	IV
KAZALO PREGLEDNIC	IX
KAZALO GRAFIKONOV	XI
KAZALO SLIK.....	XII
OKRAJŠAVE	XIV
1 UVOD	1
1.1 Opis problematike in relevantnost problema	1
1.2 Hipoteze	3
1.3 Cilji	4
2 PREGLED PODROČJA IN LITERATURE	5
2.1 Padavine	5
2.1.1 Razporeditev padavin v Sloveniji	5
2.1.2 Meritve padavin	6
2.2 Erozijska tal.....	8
2.2.1 Erozijska, erozivnost in erodibilnost.....	8
2.2.2 Tla, prst ali zemlja?.....	9
2.2.3 Dejavniki erozije tal.....	10
2.2.4 Oblike erozije tal	12
2.2.5 Erozijska v Sloveniji	14
2.3 (R)USLE	15
2.3.1 K - dejavnik erodibilnosti tal	16
2.3.2 LS – dejavnik dolžine in naklona površja	17
2.3.3 C – dejavnik pokrovnosti.....	17
2.3.4 P – dejavnik zaščitnih ukrepov.....	18
2.4 Erozivnost padavin	19
2.4.1 R – dejavnik erozivnosti padavin.....	19

2.4.2	Gostota erozivnosti	22
2.4.3	Kinetična energija dežja	23
3	PODATKI IN METODE	26
3.1	Postaje s podatki	26
3.2	Razdelitev postaj glede na podnebne tipe	28
3.3	RIST - Rainfall Intensity Summarization Tool	31
3.4	Analiza občutljivosti	33
3.4.1	Standardni regresijski koeficient (SRK)	34
3.4.2	Normaliziran kazalnik občutljivosti (NKO)	35
3.5	Statistični testi	37
3.5.1	Mann-Kendallov test	37
3.5.2	Mann-Whitneyev U test	39
3.6	Analiza sezonskosti	40
3.7	RUSLE	42
4	REZULTATI	44
4.1	Rateče (864 m nmv)	46
4.1.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	46
4.1.2	Analiza trendov	47
4.2	Postojna (533 m nmv)	48
4.2.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	48
4.2.2	Analiza trendov	49
4.3	Šmarata (580 m nmv)	50
4.3.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	50
4.3.2	Analiza trendov	50
4.4	Ljubljana Bežigrad (299 m nmv)	52
4.4.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	52
4.4.2	Analiza trendov	52
4.5	Novo mesto (220 m nmv)	54
4.5.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	54

4.5.2	Analiza trendov	54
4.6	Celje (242 m nmv)	56
4.6.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	56
4.6.2	Analiza trendov	56
4.7	Slovenske Konjice (330 m nmv).....	58
4.7.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	58
4.7.2	Analiza trendov	58
4.8	Murska Sobota (187 m nmv).....	60
4.8.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	60
4.8.2	Analiza trendov	61
4.9	Vogel (1535 m nmv)	62
4.9.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	62
4.9.2	Analiza trendov	62
4.10	Portorož (2 m nmv)	64
4.10.1	Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi	64
4.10.2	Analiza trendov	64
5	ANALIZA REZULTATOV	66
5.1	Primerjava različnih enačb za oceno dejavnika erozivnosti R na primeru izbrane pluviografske postaje.....	66
5.2	Analiza trendov za vse analizirane pluviografske postaje.....	67
5.3	Analiza sezonskosti	69
5.4	Analiza erozivnih dogodkov	72
5.5	Analiza občutljivosti	75
5.5.1	Standardiziran regresijski koeficient.....	75
5.5.2	Normaliziran kazalnik občutljivosti	76
5.6	RUSLE in porečje Save Dolinke do Kranjske gore.....	79
5.6.1	Potencialna izguba tal v odvisnosti od izračuna dejavnika R po različnih enačbah za kinetično energijo dežja.....	79
5.6.2	Vpliv spremembe velikosti celice DMV.....	81
5.6.3	Vpliv dejavnika erodibilnosti tal (K)	83

5.6.4	Vpliv rabe tal.....	84
6	SKLEPI.....	86
7	VIRI IN LITERATURA.....	89

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Dejavniki splošne oblike enačbe USLE in njihove enote.....	16
Preglednica 2: Vrednosti dejavnika R v relevantnih študijah	21
Preglednica 3: Izbrane pluviografske postaje po Sloveniji s identifikacijskimi št. in leti začetka ter konca meritev	26
Preglednica 4: Določitev podnebnih tipov izbranim merilnim postajam	29
Preglednica 5: Pregled uporabljenih enačb za analizirane postaje po Petan (2010)	30
Preglednica 6: Vhodni parametri analize občutljivosti z NKO	36
Preglednica 7: Parametri RUSLE enačbe, njihov razpon vrednosti v praktičnem prikazu na testnem porečju in vir podatkov	43
Preglednica 8: Rezultati analize po Mann-Kendallu za Rateče, obdobje 1976-2016	47
Preglednica 9: : Rezultati analize po Mann-Whitneyu za Rateče, obdobje 1977-2016	47
Preglednica 10: Rezultati analize po Mann-Kendallu za Postojno, obdobje 1976-2016.....	49
Preglednica 11: : Rezultati analize po Mann-Whitneyu za Postojno, obdobje 1977-2016.....	49
Preglednica 12: Rezultati analize po Mann-Kendallu za Šmarato, obdobje 1976-2016	51
Preglednica 13: : Rezultati analize po Mann-Whitneyu za Šmarato, obdobje 1977-2016	51
Preglednica 14: Rezultati analize po Mann-Kendallu za Ljubljano - Bežigrad, obdobje 1949-2016	53
Preglednica 15: Rezultati analize po Mann-Whitneyu za Ljubljano - Bežigrad, obdobje 1957-2016	53
Preglednica 16: Rezultati analize Mann-Kendall za Novo mesto, obdobje 1971-2016	55
Preglednica 17: Rezultati analize Mann-Whitney za Novo mesto, obdobje 1977-2016	55
Preglednica 18: Rezultati analize Mann-Kendall za Celje, obdobje 1971-2016	57
Preglednica 19: Rezultati analize Mann-Whitney za Celje, obdobje 1977-2016	57
Preglednica 20: Rezultati analize Mann-Kendall za Slovenske Konjice, obdobje 1976-2016	59
Preglednica 21: Rezultati analize Mann-Whitney za Slovenske Konjice, obdobje 1977-2016	59
Preglednica 22: Rezultati analize Mann-Kendall za Mursko Soboto, obdobje 1976-2016	61
Preglednica 23: Rezultati analize Mann-Whitney za Mursko Soboto, obdobje 1977-2016 ...	61
Preglednica 24: Rezultati analize Mann-Kendall za Vogel, obdobje 1983-2016	63
Preglednica 25: Rezultati analize Mann-Whitney za Vogel, obdobje 1987-2016	63
Preglednica 26: Rezultati analize Mann-Kendall za Portorož, obdobje 1993-2016.....	65
Preglednica 27: Rezultati analize Mann-Whitney za Portorož, obdobje 1997-2016.....	65
Preglednica 28: Srednja vrednost količine erozivnih padavinskih dogodkov v letu za posamezne postaje.....	74
Preglednica 29: Rezultati analize občutljivosti s SRK.....	76

Preglednica 30: Rezultati analize občutljivosti z NKO za posamezne parametre – temnejši odtenek kaže na večjo občutljivost.....	77
Preglednica 31: Rezultati analize občutljivosti z NKO za različne postaje in parametre – temnejši odtenek kaže na višjo občutljivost.....	77
Preglednica 32: Rezultati RUSLE enačbe za različne vrednosti dejavnika R.	79

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Vrednosti R za podatke med 1976 in 2016, Rateče (izračunano z orodjem RIST)	46
Grafikon 2: Vrednosti R za podatke med 1971 in 2016, Postojna (izračunano z orodjem RIST)	48
Grafikon 3: Vrednosti R za podatke med 1976 in 2016, Šmarata (izračunano z orodjem RIST)	50
Grafikon 4: Vrednosti R za podatke med 1949 in 2016, Ljubljana Bežigrad (izračunano z orodjem RIST)	52
Grafikon 5: Vrednosti R za podatke med 1971 in 2016, Novo mesto (izračunano z orodjem RIST)	54
Grafikon 6: Vrednosti R za podatke med 1971 in 2016, Celje (izračunano z orodjem RIST)	56
Grafikon 7: Vrednosti R za podatke med 1976 in 2016, Slovenske Konjice (izračunano z orodjem RIST)	58
Grafikon 8: Vrednosti R za podatke med 1971 in 2016, Murska Sobota (izračunano z orodjem RIST)	60
Grafikon 9: Vrednosti R za podatke med 1983 in 2016, Vogel (izračunano z orodjem RIST)	62
Grafikon 10: Vrednosti R za podatke med 1993 in 2016, Portorož (izračunano z orodjem RIST)	64
Grafikon 11: Primerjava letnih vrednosti dejavnika erozivnosti, izračunano po različnih enačbah za oceno kinetične energije za obdobje med 1976 in 2016, postaja Rateče	66
Grafikon 12: Povprečno število erozivnih padavinskih dogodkov po mesecih in v letu ter izračunana vrednost dejavnika erozivnosti za postaje	74
Grafikon 13: Primerjava ocen letnih količin izgube tal A (v t/ha/leto) z uporabo različnih velikosti celice digitalnega modela višin	82
Grafikon 14: Primerjava letnih količin izgub tal A (v t/ha/leto) za porečje Save Dolinke nad Kranjsko goro, ocenjenih z uporabo različnih vrednosti dejavnika erodibilnosti tal K	83
Grafikon 15: Primerjava letnih količin izgub tal A (v t/ha/leto) za porečje Save Dolinke nad Kranjsko goro z uporabo različnih kart pokrovnosti tal CLC Corine	85

KAZALO SLIK

Slika 1: Povprečna letna višina korigiranih padavin in njihova prostorska razporeditev v obdobju med 1971 in 2000 (ARSO, 2017)	5
Slika 2: Pluviograf tipa Hellman (Friedrichs, 2017)	6
Slika 3: Mreža postaj z ombrografi (pluviografi) po Sloveniji leta 2005 (Vičar & Ahčin, 2005). 7	7
Slika 4: Mreža postaj z ombrografi (pluviografi) po Sloveniji leta 2017	7
Slika 5: Shema glavnih dejavnikov, ki vplivajo na erozijo tal s pomočjo delovanja vode (Prevod po Smithson in sod. (2002), str. 560)	9
Slika 6: Vrste erozije tal in lokacija njihovega pojavljanja na pobočju (Petan, 2010, str. 17). 13	13
Slika 7: Karta erozivnosti padavin v Evropski uniji s Švico (Panagos in sod., 2015a; str. 808)	20
Slika 8: Gostota erozivnosti v Evropi (Panagos in sod., 2015a, str. 810).....	22
Slika 9: Razporeditev izbranih pluviografskih postaj po Sloveniji na sloju povprečne letne višine padavin	27
Slika 10: Podnebni tipi Slovenije (GIS, 2017)	29
Slika 11: Vstopno okno programa RIST (a) in vnos datotek s podatki ter določitev zahtev vhodne datoteke v programu RIST (b)	31
Slika 12: Možnosti izpisa produktov računa ("Output") v programu RIST (a) in dodatne možnosti za izračun z metodo RUSLE v programu RIST (b).....	32
Slika 13: Datoteka z rezultati izračuna programa RIST	32
Slika 14: Zgradba modela za analizo podobnosti grafov sezonskosti v orodju Orange.....	41
Slika 15: Položaj testnega porečja Sava - Kranjska Gora (1111)	42
Slika 16: SAGA, porazdelitev dejavnika K (a), C (na podlagi CLC Corine 2006; b) in LS (na podlagi DMV5) na obravnavanem območju.....	43
Slika 17: Izračunane vrednosti R za izbrane postaje v celotnem obdobju njihovih razpoložljivih podatkov (izračun z orodjem RIST, metoda Brown & Foster).....	45
Slika 18: Povprečne letne vrednosti padavin na posameznih postajah, izračunano na osnovi pluviografskih podatkov.....	45
Slika 19: Analiza po Mann-Kendallu za vse analizirane pluviografske postaje	68
Slika 20: Grafi sezonskosti dejavnika erozivnosti padavin za analizirane pluviografske postaje v Sloveniji	70
Slika 21: Dendogrami različnih tehnik računanja razdalj na osnovi atributov slik razporeditve dejavnika erozivnosti tekom leta	71
Slika 22: Povprečne vrednosti dejavnika R, gostote erozivnosti in količine padavin po mesecih za analizirane pluviografske postaje v Sloveniji in njihova celotna analizirana obdobja (enačba Brown & Foster, izračunano s pomočjo RIST).....	73

Slika 23: Grafični prikaz potencialne izgube tal v porečju Save Dolinke, izračunane s pomočjo enačbe Brown & Foster za oceno dejavnika erozivnosti padavin R; osnovna, maksimalna in minimalna vrednost (od leve proti desni) v t/ha/leto.	80
Slika 24: Digitalni modeli višin z velikostjo celice 5, 20 in 100 m (zgoraj, po vrsti z leve) ter pripadajoči izračuni dejavnika LS, porečje Sava - Kranjska Gora (1111).....	81
Slika 25: Izračun potencialne izgube tal A (t/ha.leto) v porečju Save Dolinke nad Kranjsko goro, ocenjen s pomočjo različne velikosti celice DMV; DMV5, DMV20, DMV100 (z leve proti desni).....	82
Slika 26: Vpliv spremembe vrednosti dejavnika K na erozijo tal (a - $K=0,012$, b - $K=0,024$, c - $K=0,036$).....	83
Slika 27: Podlage CLC Corine za različna leta podatkov o pokrovnosti tal, obrezana na obravnavano območje.....	84

OKRAJŠAVE

BF	enačba erozivnosti po Brown & Foster (1987)
CLC	CORINE Land Cover
DMV	digitalni model višin
GIS	geografski informacijski sistem
NDVI	normiran diferencialni vegetacijski indeks
NKO	normaliziran kazalnik občutljivosti (ang. <i>Normalized Sensitivity Index</i> ; NSI)
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation (Popravljen univerzalna (splošna) enačba izgube prsti)
SAGA	ang. <i>System for Automated Geoscientific Analyses</i>
SRK	standardni regresijski koeficient
USDA	United States Department of Agriculture
USLE	Universal Soil Loss Equation (univerzalna enačba izgube prsti)
VD	enačba erozivnosti po van Dijk in sod. (2002)

1 UVOD

1.1 Opis problematike in relevantnost problema

Kmetijstvo je panoga, ki zagotavlja hrano in s tem preživetje človeške vrste. Ob večanju števila svetovnega prebivalstva in vedno višji potrebi po globalni zalogi hrane, bo pridelava večjih količin hrane ena glavnih nalog kmetijstva. Vendar neustrezne tehnike obdelovanja zemlje, intenzivna pridelava, večanje kmetijskih površin in podnebne spremembe predstavljajo izzive, ki jih moramo rešiti. S sedanjimi trendi erozije rodovitnih tal in ob upoštevanju trenutnih praks, bo v prihodnje vedno težje dohajati realne potrebe po hrani. Uspešno preprečevanje erozije tal na rodovitnih območjih bo torej ena pomembnejših nalog človeštva v prihajajočih desetletjih.

Erozija tal predstavlja izziv na obdelanih kmetijskih površinah, saj odnašanje zgornje plasti tal pomeni manjšanje kakovosti in produktivnosti teh območij za kmetijsko izrabo. V Sloveniji po nekaterih ocenah na ta način izgubimo med 3,7 in 4,5 ton gradiva na hektar oz. med 6 in 9 milijoni ton gradiva letno, kar doprinese k povprečnemu erozijskemu zniževanju površja med 0,03 in 0,04 mm, ravno tako na letni ravni (Komac & Zorn, 2005b). Kmetijske površine so za erozijo bistveno bolj ranljive kot zaščitene gozdne; Mikoš in Zupanc (2000) navajata, da na kmetijskih površinah lahko letno pride do izpiranja od 5 do 10 mm rodovitnih tal, izjemoma celo več. Meritve erozije prsti v Sloveniji sta povzela Komac in Zorn (2005b); vrednosti precej odstopajo v odvisnosti od avtorja, vrste analiziranih tal, prevladujočega tipa erozije ter metode za njen izračun. Globalno, izgubo tal kot posledico erozije tal ocenjujejo na 5 t/ha letno (Myers, 1991).

Metod za zmanjševanje vpliva erozije na kmetijskih tleh je veliko, tradicionalno pa so bile na območju Slovenije različne po regijah; npr. »v obalnem gričevju zatravljajo pasove med posameznimi vrstami poljščin, v vzhodni Sloveniji kopljejo odtočne jarke za preusmerjanje vode« (Komac & Zorn, 2005b). Podrobneje sta razširjenost teh metod, uporabo in njihovo učinkovitost opisala Komac in Zorn (2005a in 2005b).

Pregled literature kaže na to, da študije erozije tal v Sloveniji niso redkost, vendar je temu področju glede na visoko stopnjo ranljivosti tal zaradi erozije namenjeno premalo pozornosti. Medtem, ko so se prve stalne terenske meritve izvajale le poredko – v Smastu v občini Kobarid je npr. do leta 1989 delovala poskusna postaja za merjenje spiranja tal pod vplivom različnega rastja – pa so bili računski modeli pogostejše uporabljani. Potreba po kvantifikaciji erozije tal je v 20. stoletju prinesla velike napredke na tem področju. Razvile so se tehnike, enačbe in modeli

ocenjevanja izgube tal. Poleg kasneje opisane metode (R)USLE za modeliranje erozije tal in oceno izgube tal (poglavje 2.3), se je v Sloveniji v preteklosti precej uporabljala Gavrilovičeva enačba, ki za izračun povprečnega (potencialnega) letnega sproščanja zemljin $W [m^3/leto]$ uporablja površino povodja $F_W [km^2]$, srednje letne padavine $H_Y [mm]$, temperaturni K_T in erozijski K_Z koeficient območja (Petkovšek, 2000).

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

Enačba je bila uporabljena za več ocen potencialnega sproščanja tal v Sloveniji, ker pa je bila prvotno razvita za območja v Sredozemlju, se je v nekaterih kasnejših študijah uporabljala t.i. spremenjena/prirejena Gavrilovičeva enačba po Pintarju (Petkovšek, 2000; Komac & Zorn, 2005b), ki je konstanto 3,14, srednje letne padavine $H_Y [mm]$ in temperaturni koeficient K_T nadomestil s konstanto 20 in maksimalnimi dnevnimi (24-h) padavinami (mm).

Medtem, ko so v luči klimatskih sprememb nekateri temperaturni trendi, zlasti v Sloveniji, precej jasni in enoznačni (Dolinar in sod., 2014), pa ima razporeditev padavin bistveno večjo spremenljivost, kar otežuje enostaven prikaz časovnih trendov. Na letni ravni se je količina padavin v Sloveniji statistično značilno zmanjšala, predvsem na zahodu države: med leti 1961 in 2011 je bil trend zmanjševanja od 2 do 4 % na deset let, na nekaterih postajah celo do 20 %. Opazni so tudi trendi na sezonski ravni, in sicer se količina padavin statistično značilno zmanjšuje v spomladanskem času (ob obali, v Posočju in na spodnjem robu Kamniško-Savinjskih Alp), poleti (na jugozahodu Slovenije) in pozimi (manj izrazito, na severni polovici države). Za enako obdobje je očiten tudi trend zmanjševanja dvodnevni ekstremov. Panagos in sod. (2017a) so v študiji prihodnjih trendov ocenili, da bo območje Slovenije priča zmanjšanju dejavnika erozivnosti R ; iz srednje vrednosti $2302 MJ mm ha^{-1} h^{-1}$ v letu 2010, na srednjo vrednost $1780 MJ mm ha^{-1} h^{-1}$ v letu 2050, kar predstavlja 22,7% zmanjšanje (vendar avtorji območje Slovenije še vedno uvrščajo med regije, kjer bo erozivnost padavin najvišja v Evropi). Iz omenjenega smo tako sklepali na prvo hipotezo magistrske naloge (i), ki poveže erozivnost padavin s količino padavin in negativnimi trendi na območju Slovenije. Globalni trendi kljub temu kažejo na dvig srednje vrednosti erozivnosti padavin R ; do 18% v Evropi (Panagos in sod., 2017a) in 17% v ZDA (Nearing in sod., 2004), do leta 2050.

Erozivnost padavin je na območju Slovenije precej pestra, kar je predvsem posledica podnebne raznolikosti. Vse-evropska raziskava erozivnosti padavin, ki so jo izvedli Panagos in sod. (2015a), je med šestimi postajami z najvišjo vrednostjo erozivnosti (kasneje razloženega, t.i. dejavnika R) v Evropski uniji s Švico, identificirala pet, ki se nahajajo v

Sloveniji – natančneje v Posočju (Kal nad Kanalom, Log pod Mangartom, Lokve, Kneške Ravne) in merilna postaja na Voglu. Vrednosti so na omenjenih postajah presegale $5000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, podobno pa je v omenjenem delu Slovenije tudi (Petan, 2010) izračunal visoke vrednosti R (nad $8000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ na postajah Vogel in Kal nad Kanalom; nad $10000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ na postaji Kneške Ravne), medtem ko študije v drugih regijah Slovenije konsistentno prikazujejo nižjo erozivnost (Petan in sod., 2010; Mikoš in sod., 2006; Petkovšek & Mikoš, 2004). Predvsem je opazen znaten razkorak v vrednostih erozivnosti padavin na zahodu in vzhodu države, kar so potrdili Ceglar in sod. (2008), Petan (2010; str. 177) ter Ballabio in sod. (2017); slednja študija uvršča Slovenijo tudi med območja v Evropi z najvišjo vrednostjo erozivnosti padavin v poletnem času.

Več o eroziji tal in erozivnosti padavin vsebuje prvi del naloge, ki služi kot pregled trenutnega stanja in znanja na področju. S pomočjo obstoječe literature so razloženi pojmi in natančneje opisana problematika, ki se iz splošnejše erozije tal usmeri ožje na enega od njenih dejavnikov – erozivnost padavin in površinskega odtoka. Opisana je enačba $RUSLE$, ki je najpogostejše uporabljana za račun izgube tal, ter natančneje obravnavan dejavnik R , ki je predmet obravnave te naloge. V poglavju 3 je predstavljenih deset pluviografskih postaj v Sloveniji, natančneje pa so opisane tudi metode, uporabljene za izračune erozivnosti padavin; tako dejavnika erozivnosti kot kasnejše analize občutljivosti, sezonskosti in trendov. Rezultati tega in njihov komentar so predstavljeni v poglavjih 4 in 5, zadnje vsebinsko poglavje (6) pa vsebuje povzetek najpomembnejših ugotovitev, razprava rezultatov v odnosu do postavljenih hipotez in predloge za nadaljnje delo na tem področju. Na koncu so navedeni viri in dodane priloge.

1.2 Hipoteze

Na osnovi pregledane literature in avtorjev, navedenih v prejšnjem poglavju, sta bili za raziskovanje definirani dve hipotezi, ki ju želi naloga potrditi oz. ovreči;

- (i) Erozivnost padavin, opisana s faktorjem R , se v Sloveniji v zadnjih desetletjih zmanjšuje.
- (ii) Izbrani parametri, ki določajo erozivne dogodke, imajo izrazit vpliv na izračunano letno vrednost parametra erozivnosti padavin R .

1.3 Cilji

Intenziteto in kinetično energijo padavin ter njuno soodvisnost je za območje Slovenije podrobno analiziral že Petan (2010), v zadnjih letih pa so se z erozivnostjo ukvarjali tudi Bezak in sod. (2015), Petan in sod. (2010) in Mikoš in sod. (2006). Glede na daljnosežne posledice, ki jih erozivnost padavin ter posledična erozija tal predstavljata, je nadaljnji razvoj področja pomemben in nujen. Slednje je tudi eden izmed ciljev naloge, ki poleg ostalega skuša doseči še naslednje:

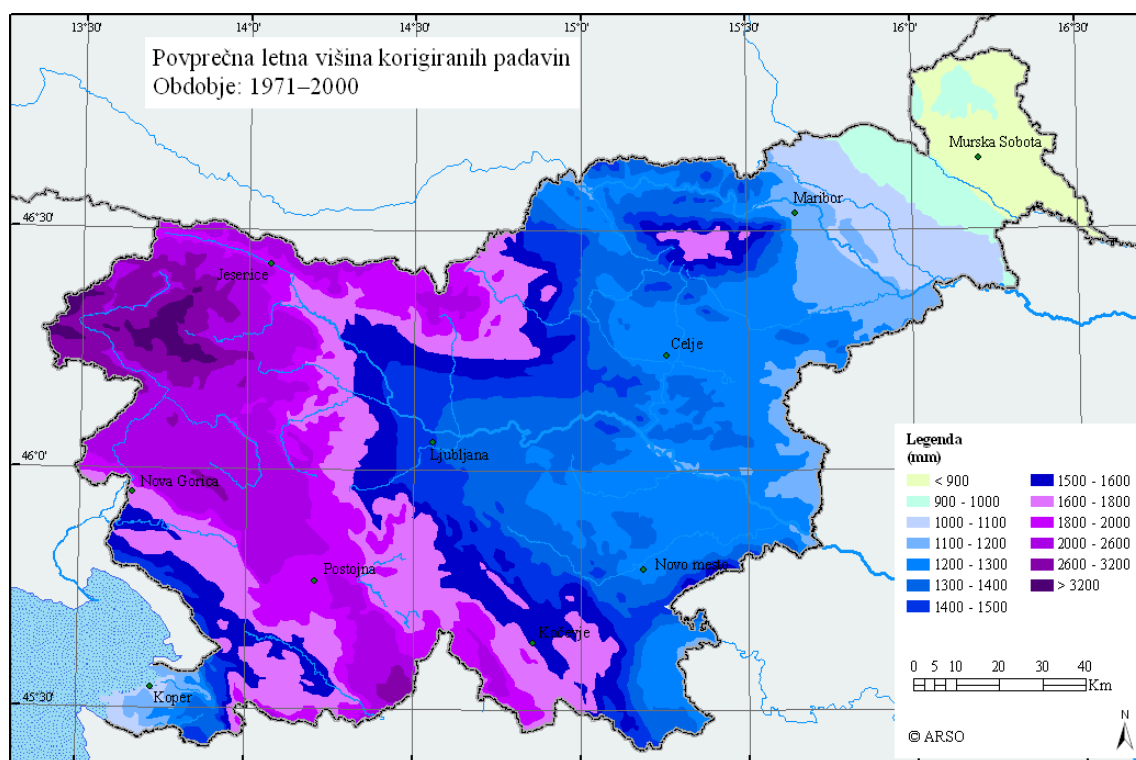
- Nadgraditi znanje o erozivnosti padavin v Sloveniji;
- Pripraviti pregled že opravljenega dela na področju raziskovanja erozivnosti padavin tako na globalni ravni kot v Sloveniji in bližnji okolici;
- Predstaviti priporočila (na osnovi pridobljenega znanja in sklepov) za nadaljnje raziskovanje erozivnosti padavin in posledično erozije tal;
- Določiti vpliv natančnosti vhodnih parametrov za izračun erozivnosti padavin na končno vrednost faktorja erozivnosti R
- Ugotoviti, kakšni trendi so prisotni v vrednosti erozivnosti padavin v različnih geografskih delih Slovenije
- Uporabiti izračunane vrednosti erozije tal s pomočjo enačbe RUSLE in s pomočjo ustrezne programske opreme grafično predstaviti rezultate

2 PREGLED PODROČJA IN LITERATURE

2.1 Padavine

2.1.1 Razporeditev padavin v Sloveniji

Letna količina padavin v Sloveniji se v prostoru precej spreminja (slika 1). Najbolj nanjo vplivata oblikovanost površja (orografija) in veter, medtem ko tip reliefa in orientacija (privetna – zavetna stran orografskih pregrad) vplivata na količino orografskih padavin. Te v primerjavi s konvektivnimi padavinami v Sloveniji prevladujejo. Tip reliefa in orientacija vplivata na veter, zaradi katerega je lahko količina padavin, izmerjena v gorskem in hribovitem svetu, precej podcenjena (ARSO, 2017).



Slika 1: Povprečna letna višina korigiranih padavin in njihova prostorska razporeditev v obdobju med 1971 in 2000 (ARSO, 2017)

2.1.2 Meritve padavin

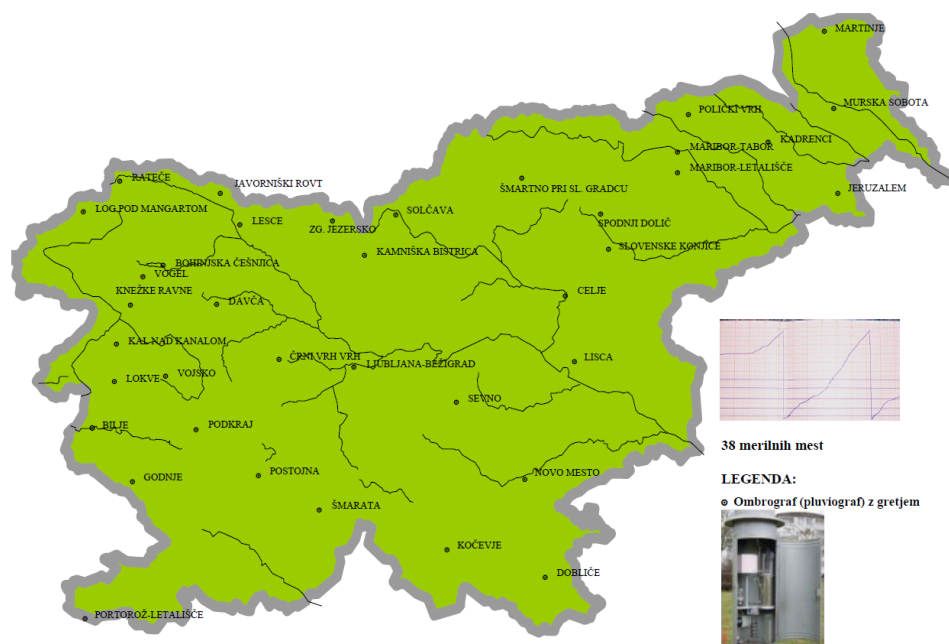
Meritve padavin v Sloveniji izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). Izvajajo se meritve višine padavin, ki se meri na meteoroloških postajah dnevno ob sedmi uri zjutraj ter predstavlja višino padavin v zadnjih štiriindvajsetih urah (ARSO, 2017).

Kot vhodne podatke v magistrski nalogi smo uporabili podatke izbranih ombrografov (pluviografov) širom Slovenije. Tudi te meritve izvaja ARSO, ki skrbi za mrežo pluviografov in njeno nadgradnjo. ARSO uporablja t.i. Hellmannov pluviograf (slika 2), ki samodejno zapisuje količino in čas trajanja padavin. Pomemben del pluviografa je grelna naprava, ki omogoča taljenje snežnih padavin in posledično njihovo registracijo.



Slika 2: Pluviograf tipa Hellman (Friedrichs, 2017)

Merilna mreža je v letu 2005 obsegala 38 merilnih mest, opremljenih s pluviografi (slika 3, Vičar & Ahčin, 2005). V letu 2017 (slika 4) se je mreža pluviografov deloma spremenila in za nekaj postaj zmanjšala, na 32 (Vičar, 2017).



Slika 3: Mreža postaj z ombrografi (pluviografi) po Sloveniji leta 2005 (Vičar & Ahčin, 2005)



Slika 4: Mreža postaj z ombrografi (pluviografi) po Sloveniji leta 2017

2.2 Erozijski tal

Erozijski tal je naravni proces, za katerega je značilno odnašanje tal oz. degradacija tal. Je vzrok današnji oblikovanosti površja in reliefnim oblikam na Zemlji, predstavlja pa tudi kroženje snovi – od nastanka preperine, do njenega transporta in odlaganja na drugem mestu (erozijsko – sedimentacijski krog). Naraven proces (**geološka erozija**) je znatno pospešil človek s svojimi dejavnostmi, ter dal tudi ime tovrstni obliki; **pospešena oz. napredujoča erozijski tal** (Mikoš & Zupanc, 2000). Kmetijska dejavnost, gradbeništvo, turizem in drugo so dejavnosti, ki so porušile naravno ravnovesje nastanka in odnašanja prsti pod plastjo vegetacijske zaščite. Erozijski tal so z enostavno odvisnostjo predstavili Renard in sod. (1997):

$$E = f(C, S, T, SS, M) \quad (2)$$

Pri čemer E predstavlja erozijski tal, ki je funkcija podnebja (C), lastnosti tal (S), topografije (T), stanja tal (SS) in človeških dejavnosti (M).

2.2.1 Erozijski, erozivnost in erodibilnost

Medtem, ko je **erozijski** definirana kot »dinamični proces, ki povzroči odstranitev Zemljinih materialov« (prevod Smithson in sod., 2002), ga Komac & Zorn (2005) označita za proces, ki prizadene zgornjo plast tal, to pa avtorja nazivata kot *prst*. Nadaljnje se v literaturi pojavljajo tudi izrazi **preperevanje** (ang. *weathering*), **masovno odnašanje** (ang. *mass wasting*) in **denudacija** (ang. *denudation*). Slednjo Mikoš (2000) definira kot površinsko spiranje in odplavljanje - zajema tako preperevanje kot tudi odnašanje, v primerjavi z erozijski pa je proces denudacije predvsem ploskoven. Komac & Zorn (2005) procesa ločita tudi glede na naklon; denudacija naj bi bila tako značilna za nižje nagnjenosti pobočja (med 2 in 3°); erozijski, ki prednjači v linijskem odnašanju, pa se pojavlja pri višjih naklonih površja (nad 6°).

Erozivnost se nanaša na erozivno moč padavin, vodnega toka ali drugega medija za sproščanje in odnašanje delcev. Je pomemben dejavnik erozije tal, ki bo natančneje predstavljen v prihajajočih poglavjih.

Erodibilnost opisuje dovzetnost oz. nagnjenost Zemljinih materialov za erozijski, krajše definirano tudi kot »podvrženost spiranju« (Mikoš, 2000). Dejavnike erozivnosti in erodibilnosti v odnosu do erozije tal prikazuje slika 5.

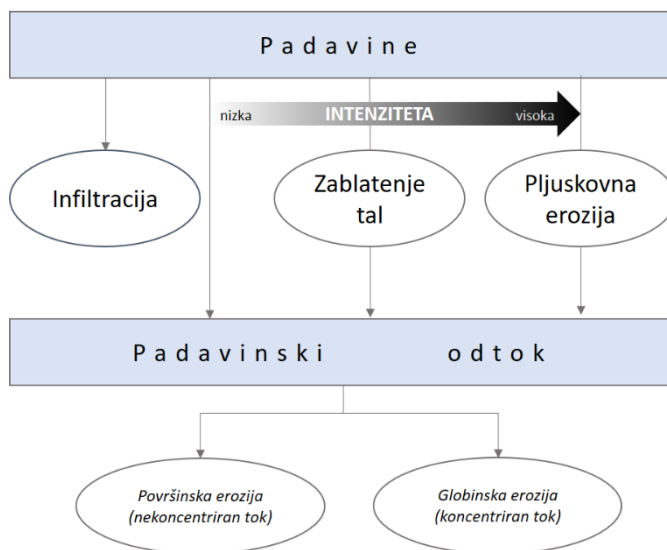
DEJAVNIKI EROZIVNOSTI

PADAVINSKI DEJAVNIKI

velikost kapljic, hitrost, razporeditev, kot in smer, intenziteta dežja, pogostost, trajanje

ODTOČNI DEJAVNIKI

količina do/odtoka, globina toka, hitrost, pogostost, obseg, trajanje, vsebnost sedimentov



DEJAVNIKI ERODIBILNOSTI

LASTNOSTI TAL/PRSTI

velikost delcev, lastnosti tvorjenja skupkov, kohezivnost, sprijetost, zmožnost infiltracije

RASTLINSTVO

talni pokrov, tip rastlinja, stopnja zaščite

TOPOGRAFIJA

naklon in dolžina pobočja, hrapavost površja, konvergenca in divergenca toka

RABA ZEMLJIŠČ

npr. horizontalno oranje, stabilizacija jarkov, rotacije, uporaba določenih rastlin za zasaditev, terasiranje, mulčenje, vsebnost organskih snovi

Slika 5: Shema glavnih dejavnikov, ki vplivajo na erozijo tal s pomočjo delovanja vode (Prevod po Smithson in sod. (2002), str. 560)

2.2.2 Tla, prst ali zemlja?

Slovenski jezik pozna več izrazov za tla (nem. Boden, izvedenka Bodenerosion – erozija tal), ki so si sicer pomensko blizu, vendar je njihova razločitev ključna za uspešno strokovno (in tudi poljudno) komuniciranje. Dilemo izrazoslovja je celostno naslovil Vrščaj (2013), ki različne pojme opiše in argumentira namen ter smiselnost njihove uporabe. **Tla** definira kot »*tvorbo na površini zemlje z logično zgradbo, ki se razvija in spreminja v prostoru in času*«. Tla torej obsegajo vse t.i. horizonte na določenem mestu, ter predstavljajo celoten **sistem različnih kemijskih, bioloških in fizikalnih lastnosti**. Ker zgradba tal ni stalna, ampak se spreminja, se poleg nje spreminjajo tudi namembnost in funkcija tal; rodovitnost lahko sčasoma upade, v ospredje pa takrat pridejo druge funkcije, kot so kroženje snovi, nevtralizacija in filtracija (Vrščaj, 2013). Izraz *tla* tako zajema široko področje, medtem ko se nekateri drugi izrazi, predstavljeni v nadaljevanju, nanašajo zgolj na nekatere funkcije in lastnosti tal.

Prst se kot pojem pogosteje uporablja pri naslavljanju **zgornjega, rodovitnega in s humusom bogatega dela tal**. Kot takega so pojem opredelili začetniki pedologije na Slovenskem v prejšnjem stoletju. Gre za staroslovansko in baltsko besedo (Snoj, 2015), ki je zgodovinsko ponazarjala tudi *prah* in *suho zemljo*, besedo pa poznajo tudi drugi slovanski jeziki.

Drugi izrazi, uporabljeni v poljudnem jeziku, so med drugim tudi **ilovka** in **ilovica** (ki se nanašata na specifično mešanico gline, melja in peska, besedi pa se na našem ozemlju pogosto uporabljata), **jerina** (na Krasu) in **jerovica** (umetno vpeljan strokoven izraz za jerino).

Zelo širok spekter uporabe ima tudi pojem **zemlja**. Medtem, ko se je v začetku razvoja pedologije pri nas precej uporabljal v strokovni literaturi (pedolog dr. Bogdan Vovk), je danes pojem le redko uporabljen v literaturi, njegova raba pa je omejena predvsem na pogovorno okolje.

Gre tudi za pristop različnih strok; tako geografija in pedogeografija pogosteje uporabljata izraz *prst*, pedologija in uradni dokumenti (zakonodaja) pa *tla*. Angleški pojem *soil* (slov. zemljina, izvedenka *soil erosion* – erozija tal, a tudi *soil mechanics* – mehanika tal) se tako prevaja različno in včasih nekonsistentno, v pričujočem delu pa bomo sledili priporočilu Mikoša (2000), ter v povezavi z erozijo površja uporabljali izraz **erozija tal**.

2.2.3 Dejavniki erozije tal

Erozija tal je naraven proces in posledica delovanja naravnih sil; kadar slednje drži, govorimo o naravni – **geološki** – eroziji. Naravnim dejavnikom se pri procesu pogosto pridruži človek s svojim delovanjem; različni posegi v prostor pospešijo naraven proces erozije, ta pa pogosto postane bolj destruktivna in ogrožajoča za ekosistem. V tem primeru govorimo o antropogeno pospešeni – **napredujoči** – eroziji tal, ki lahko poruši ravnovesje v ekosistemu, vodi v degradacijo tal in ima posledično tudi ekonomske posledice za kmetijski sektor in posameznike v njem (Salvati & Carlucci, 2013).

Poleg osnovnih dejavnikov (voda, sneg, led, veter, težnost), na erozijo vplivajo še drugi naravni in antropogeni dejavniki, ki jih razdelimo v 5 skupin (Petan, 2010; Mikoš & Zupanc, 2000):

i. Podnebni in hidrološki dejavniki

- Padavine; višina padavin in intenziteta padavin (predvsem ekstremne vrednosti), ki določata energijo padavin (natančneje v poglavjih 2.1 in 2.4);
- Površinski odtok;
- Mikroklimatske značilnosti, kot vlaga v tleh, osončenost, temperatura, jakost in smer vetra ter vlažnost zraka;

- Podnebne spremembe, ki bodo v prihodnosti vplivale na režim padavin, temperature zraka, posledično pa tudi na floro in favno (več so o tem napisali Dolinar in sod. (2014)).

ii. **Oblikovanost površja**

- Vpliv topografskih dejavnikov:
 - naklon (z njim se poveča turbulenca površinskega toka),
 - dolžina (krajša dolžina zmanjša erozivnost) in
 - orientacija pobočja (predvsem v primeru orografskih padavin).
- Vpliv morfoloških dejavnikov: vbočenost oz. izbočenost površja (največja stopnja erozije se pojavi na izbočenem površju, najmanjša pa na vbočenem).

iii. **Fizikalne značilnosti tal** določajo erodibilnost tal (nagnjenost k erodiranju). Med bolj odporna tla sodijo glinena in peščena, medtem ko so meljasta tla bolj erodibilna. Fizikalne lastnosti, ki določajo odpornost tal na erozijo so:

- tekstura,
- struktura,
- delež organskih snovi,
- stabilnost talnih delcev,
- infiltracijska sposobnost in
- nasičenost z vodo

iv. **Pokrovnost tal** bistveno vpliva na erodibilnost tal, na čemer slonijo tudi protierozijski zaščitni ukrepi. Med naravnima zaščitnima pokrovoma ločimo dva:

- Zračni pokrov, ki varuje tako, da zniža kinetično energijo kapljic;
- Prizemni pokrov, ki zmanjša površinski odtok (zajema tako rastline kot kamenje in ostali material pri tleh).

v. Antropogene dejavnosti v obliki **gospodarskih ukrepov**, ki lahko vplivajo na erodibilnost tal:

- vrsta rabe tal,
- vrsta obdelave tal,
- lega obdelovalnih površin,
- smer obdelave tal in
- možnost zaščite pred erozijo.

2.2.4 Oblike erozije tal

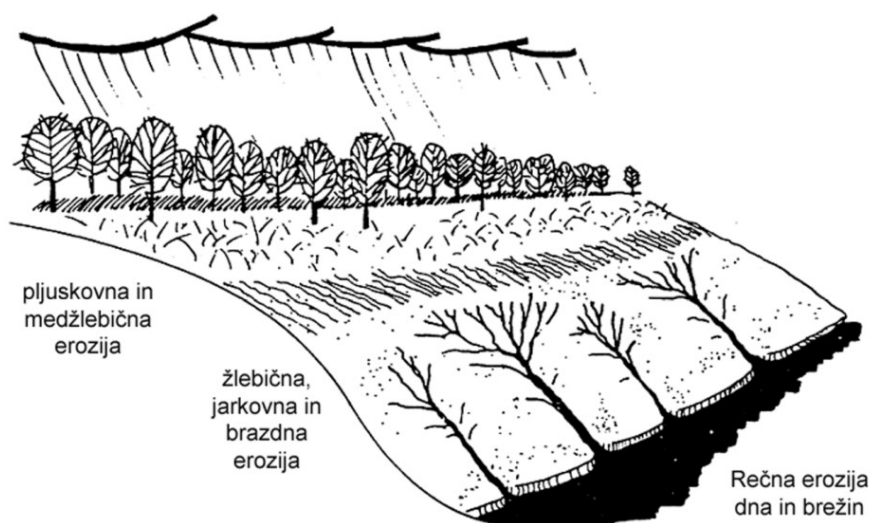
Erozija tal združuje naravne dejavnike (voda, sneg, led, veter, morje) ter živalske in antropogene dejavnike. Pojem opisuje odstranjevanje delcev tal z opisanimi dejavniki. Znotraj erozije tal na kmetijskih tleh poznamo več oblik, ki so med avtorji definirane različno. Komac & Zorn (2005) ločita:

- **površinsko spiranje** (ang. *surface wash*) kot posledica površinskega odtoka dežne in ploskovne (ang. *sheet*) erozije;
- **žlebična erozija** (ang. *rill erosion*) kot posledica vrezovanja vode nekaj deset centimetrov globokih žlebičev;
- **jarkovna erozija** (ang. *gully erosion*) kot posledica združevanja erozijskih žlebičev v bolj globoke jarke;
- **cevčenje** (ang. *piping*), ki opisuje nastanek kanalov pod površinsko plastjo prsti v preperini.

Medtem ko Mikoš & Zupanc (2000) dodatno definirata še:

- **pljuskovno** erozijo (ang. *splash erosion*) kot neposredno posledico udara kapljic ob zemljino;
- **medžlebično** erozijo (ang. *interill erosion*), med žlebiči, kot posledica udarne energije in površinskega odtoka, ki še ni formiran v močnejše tokove;
- **brazdno** erozijo (ang. *furrow erosion*) kot vmesno obliko med žlebično in jarkovno erozijo.

Pljuskovna, žlebična, medžlebična in ploskovna (ang. *sheet erosion*) erozija se uvrščajo v skupino **površinske erozije** (ang. *surface erosion*), saj voda še ne teče v koncentriranem toku. Ko se slednje zgodi, govorimo o **globinski eroziji**, kamor spadata brazdna in jarkovna erozija (glej tudi: slika 5 in slika 6).



Slika 6: Vrste erozije tal in lokacija njihovega pojavljanja na pobočju (Petan, 2010, str. 17)

Padavinska erozija se torej izraža v različnih oblikah; najprej se kot posledica udarjanja dežnih kapljic ob površino tal (**pljuskovna erozija**) sproščajo delci in na manjše razpadajo agregati zemljin. Na istem mestu se formira plitva plast površinskega odtoka, ki pa še ni koncentriran (**medžlebična erozija**), zato sam po sebi ne erodira delcev, pomaga pa pri premeščanju sproščenih delcev, nastalih kot posledica pljuskovne erozije. Nekonzentriran tok obenem ob določenih globinah deluje kot blažilec udarcev dežnih kapelj (globina toka $h > (1/6 \sim 1)d_{kaplje}$; Hahn in sod. (1994), povzeto po Petan (2010)), s čimer zmanjšuje vpliv pljuskovne erozije (ta je odvisna od intenzitete in kinetične energije padavin ter strukture zemljine), ki pa kljub temu po obsegu sproščenega materiala prevladuje. Mikoš & Zupanc (2000) navajata, da dežne kaplje nimajo več neposrednega vpliva na površino tal, ko je površinski odtok (PO) kot posledica padavin $h_{PO} > 3 \cdot d_{kaplje}$ – v primeru, da je pogoju zadoščeno, padajoče dežne kaplje vplivajo zgolj na turbulentnost toka.

Z nadaljnjim koncentriranjem površinskega odtoka nastane **žlebična erozija**, ki ustvarja žlebiče globine do 30 cm, po katerih voda hitreje odteka. Žlebiči se pojavljajo na daljših in strmejših pobočjih, pri doseženi t.i. **kritični dolžini pobočja**. Gostota žlebičev je odvisna od naklona pobočja, dolžine pobočja, količine površinskega odtoka, teksture tal, erodibilnosti ter podnebnih značilnosti – odsotnosti in prisotnosti deževij (Meyer & Monke, 1965). Pri višjih globinah (> 30 cm) se žlebiči preobrazijo v brazde in jarke; erozija pa preide v **brazdno** in **jarkovno erozijo**, ki že definirata t.i. **globinsko erozijo**.

2.2.5 Erozijska v Sloveniji

Pregled empiričnih izračunov erozije na območju Slovenije sta predstavila Komac & Zorn (2005). V preteklosti so se študije izvajale na manjših območjih, porečjih, kmetijskih zemljiščih, izvedene pa so bile tudi ocene za celotno območje Slovenije. Najvišje vrednosti sproščanja gradiva (v t/ha/leto) dosegajo kmetijske površine širom Slovenije (**80-160 t/ha/leto**, izračun Mikoš & Zupanc (2000)) ter erozijska območja v Polhograjskem hribovju (**175 t/ha/leto**, izračun Komac (2003)), medtem ko je najnižja izmerjena vrednost erozije prsti na območju vasi Smast pri Kobaridu, kjer se količina sproščanja giblje med 0.006 mm na leto za mešani gozd in 0.04 mm za travnik (meritve Horvat in Zemljič, 1998). Omenjena vas je bila v preteklosti pomembna za merjenje erozije, saj je do leta 1989 tam delovala prva in edina postaja za merjenje erozije tal na Slovenskem.

V splošnem se stopnja erozije tal za različne rabe tal razlikuje. Na območju Slovenije je stopnja erozijskega zniževanja najvišja na obdelovalnih njivah (med 0.05 in 0.12 mm na leto; odvisno od naklona) ter na neporaslih in visokogorskih območjih (med 0.07 in 0.08 mm na leto), medtem ko najnižje vrednosti dosega v hmeljiščih (med 0.02 in 0.2 mm na 1000 let). (Komac & Zorn, 2005b)

Medtem pa Mikoš & Zupanc (2000) navajata, da se na (ornih, njivskih) kmetijskih površinah letno izgubi med 5 in 10 mm rodovitne prsti, izjemoma pa lahko tudi več.

2.3 (R)USLE

Razvoj področja napovedovanja in matematičnega ocenjevanja izgub tal zaradi erozije se je začel v 30. letih, najvidneje s Cookom (1936). Ta je določil tri glavne dejavnike, ki vplivajo na erozijo tal kot posledica vpliva vode, in sicer dovzetnost tal za erozijo, potencialno erozivnost padavin in površinskega odtoka, ter zaščito tal kot posledico vegetacijskega pokrova. Prva enačba na področju je bila objavljena nekaj let kasneje, po 2. svetovni vojni pa je sledilo še več publikacij, ki so predvsem temeljile na izboljšanju obstoječih enačb ter za različne tipe in rabo ter naklon pobočij predvidevale vrednosti parametrov (Renard in sod., 1997). V 50-ih in 60-ih letih se je v ZDA razvijala enotna, empirično zasnovana enačba na osnovi terenskih meritev, poznana pod kratico USLE (ang. *Universal Soil Loss Equation*; Wischmeier & Smith (1958)). Ta je pomenila korak naprej v primerjavi s svojimi predhodnicami, saj je vsakemu dejavniku pripadala številna vrednost, ki je bila lahko določljiva iz meteoroloških, pedoloških, hidroloških in erozijskih podatkov; obenem pa je bila uporabna za različna geografska območja, t.j. univerzalna.

Enačba USLE je bila široko uporabljana širom sveta, manj pa v Sloveniji, kjer je bila bolj razširjena uporaba Gavrilovićeve enačbe, razvite za sredozemske razmere, in njene kasnejše verzije, prirejene za slovenske razmere. Kasneje so se razvile podobne enačbe za napovedovanje izgub tal zaradi erozije, med njimi tudi t.i. MUSLE (ang. *Modified Universal Soil Loss Equation*) oz. spremenjena USLE, ki namesto dejavnika erozivnosti padavin uporablja dejavnik energije odtoka.

Danes se, zahvaljujoč številnim študijam, meritvam in razvoju na področju erozije tal, predvsem uporablja nadgrajena različica osnovne enačbe USLE; RUSLE (ang. *Revised Universal Soil Loss Equation*). Pri slednji so nadgrajene enačbe dejavnikov *R*, *L* in *S* (Renard in sod., 1997).

Osnovna oblika (R)USLE enačbe predstavlja linearni produkt šestih dejavnikov:

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

Preglednica 1: Dejavniki splošne oblike enačbe USLE in njihove enote

A	Povprečna letna izguba tal na enoto površine	$kg \cdot ha^{-1}$
R	Dejavnik erozivnosti padavin in površinskega odtoka	$MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$
K	Dejavnik erodibilnosti tal	$kg \cdot h \cdot MJ^{-1} mm^{-1}$
L	Dejavnik dolžine pobočja	/
S	Dejavnik naklona pobočja	/
C	Dejavnik pokrovnosti tal	/
P	Dejavnik zaščitnih ukrepov	/

Opisani dejavniki pripadajo dvema skupinama: so reaktivni ali aktivni. *K*, *C* in *P* spadajo v prvo skupino, njihova vrednost je običajno določena s pomočjo grafov in preglednic. Medtem ko so aktivni dejavniki; *R*, *L* in *S* izračunani s pomočjo enačb različnih avtorjev.

2.3.1 K - dejavnik erodibilnosti tal

Erodibilnost tal smo že definirali (str. 8), v enačbi RUSLE pa je povezava z medsebojnim vplivom padavin, površinskega odtoka ter infiltracije. Dejavnik erodibilnosti (*K*) je definiran kot povprečna letna vrednost odziva tal na večje število erozijskih in hidroloških procesov (Renard in sod., 1997), kot tak pa zajame vpliv lastnosti tal na izgube tal tekom padavinskih dogodkov. Dejavnik je izražen v $kg \cdot h \cdot MJ^{-1} mm^{-1}$, za njegov izračun pa je predlaganih več enačb. Evropski biro za tla (European Soil Bureau) predlaga uporabo naslednje (van der Knijff in sod., 2007):

$$K = 0,0034 + 0,0405 \cdot \exp \left[-0,5 \left(\frac{\log D_g + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Pri čemer D_g predstavlja geometrično srednjo vrednost premera osnovnih delcev zemljine, v milimetrih:

$$D_g = \exp \left[\sum f_i \cdot \ln \left(\frac{d_i + d_{i-1}}{2} \right) \right]. \quad (5)$$

Za vsak razred velikosti delcev, d_i predstavlja največji premer (mm), d_{i-1} najmanjši premer, in f_i pripadajoči masni delež.

2.3.2 LS – dejavnik dolžine in naklona površja

Dejavnika L in S predstavljata vpliv dolžine in naklona pobočja na erozijo. Van der Knijff in sod. (2007) predlagajo izračun L in S :

$$L = 1,4 \cdot \left(\frac{A_s}{22,13} \right)^{0,4}, \quad (6)$$

in

$$S = \left(\frac{\sin \beta}{0,0896} \right)^{1,3}, \quad (7)$$

kjer sta:

- A_s specifično prispevno območje (m^2/m);
- β naklon pobočja ($^\circ$).

Dejavnik dolžine (L) in dejavnik naklona (S) površja lahko v primeru uporabe enačbe RUSLE združimo v skupen dejavnik dolžine in naklona pobočja LS , imenovan tudi dejavnik topografije v RUSLE enačbi. Medtem, ko dejavnik L predstavlja razmerje med horizontalno dolžino pobočja z dolžino eksperimentalnega pobočja (22,1 m; Renard in sod., 1997), dejavnik S pa razmerje med dejanskim naklonom in naklonom eksperimentalnega pobočja (9%); dejavnik topografije LS združuje obe razmerji. LS ima vrednost 1 v primeru pobočja z dolžino 22,1 m in naklonom 9%.

2.3.3 C – dejavnik pokrovnosti

Vpliv rabe tal in njenih sprememb na erozijo tal v enačbah RUSLE in USLE opiše dejavnik pokrovnosti, C . Izračun slednjega izvedemo z enačbo (van der Knijff in sod., 2007):

$$C = \exp \left[-\alpha \cdot \frac{NDVI}{\beta - NDVI} \right]. \quad (8)$$

Na podlagi prilaganja krivulji med C in $NDVI$ van der Knijff in sod. (2007) predlagajo uporabo vrednosti $\alpha = 2$ in $\beta = 1$. $NDVI$ predstavlja normiran diferencialni vegetacijski indeks, katerega vrednost lahko zavzema med -1 in 1. Nižje vrednosti indeksa so značilne za vodna telesa, pa tudi pozidana območja na zemeljski površini, višje vrednosti pa pripadajo območjem z

vegetacijo. Indeks je določen s količnikom med vsoto in razliko infrardečega in rdečega kanala (Oštir, 2006):

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R}. \quad (9)$$

Dejavnik pokrovnosti C se pogosto določa na osnovi baze pokrovnosti tal CLC Corine (Bezak in sod., 2015; van der Knijff in sod., 2007).

2.3.4 P – dejavnik zaščitnih ukrepov

Ukrepi, ki vplivajo na površinski odtok – bodisi z vplivom na drenažne poti, koncentracijo površinskega odtoka, njegovo hitrost in hidravlične sile – so v enačbi RUSLE zajeti z dejavnikom zaščitnih ukrepov, *P*. Med vsemi dejavniki enačbe RUSLE ima najvišjo negotovost (Panagos in sod., 2015c), zato se pogosto določi kot enovita vrednost. Panagos in sod. (2015c) so analizirali podatke podatkovne zbirke LUCAS za Evropsko Unijo ter predlagali vrednosti dejavnika *P*; za območje Slovenije je ta po nasvetih avtorjev med 0,97 in 1.

Dejavnik ima nižjo vrednost v primeru učinkovitih protierozijskih ukrepov. Med slednje spadajo travnati pasovi ob kmetijskih površinah (največji vpliv na vrednost dejavnika *P*), kamniti zidovi, pa tudi terasiranje, metode podpovršinskega dreniranja in drugi ukrepi.

2.4 Erozivnost padavin

2.4.1 R – dejavnik erozivnosti padavin

Sestavni del erozije tal med ostalimi dejavniki predstavljajo padavine, kar imenujemo erozivnost padavin, opišemo pa z erozijskim dejavnikom R . Erozivnost padavin predstavlja gonilno silo erozije tal, saj ima neposredni vpliv na odlepljanje delcev, razpad skupkov oz. agregatov na manjše enote ter prenos erodiranih delcev s pomočjo (površinskega) odtoka. *Pojem torej zajema erozivnost padavin in površinskega odtoka, slednji tudi kot posledica taljenja snega.*

Erozivnost padavin določajo:

- intenziteta dežja in njena časovna razporeditev (mm/h);
- vrsta padavin;
- kinetična energija dežnih kapljic, njihova razporeditev velikosti in hitrost padanja;
- trajanje naliva.

Dejavnik erozivnosti padavin in površinskega odtoka je bil zasnovan na podlagi meritev in podatkov iz mnogih študij; avtorji so ugotovili, da ob konstantnih pogojih in dejavnikih, erozija tal na kmetijskih zemljiščih neposredno korelira z dejavnikom padavin (Renard in sod., 1997):

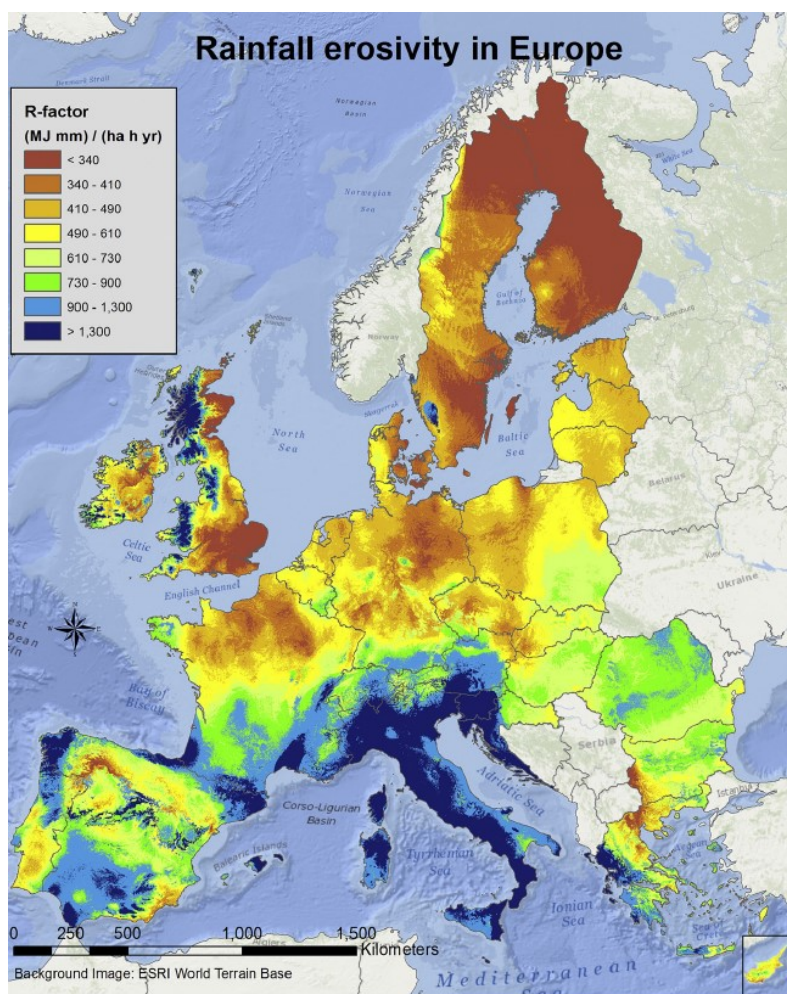
$$R = E \cdot I_{30}, \quad (10)$$

pri čemer R opiše erozivnost padavin ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$) v okviru erozivnih dogodkov; E označuje (kinetično) energijo naliva oz. padavin ($MJ\ ha^{-1}$), I_{30} pa maksimalno 30-minutno intenziteto naliva ($mm\ h^{-1}$). Oba dejavnika nekateri avtorji (Renard in sod., 1997; Wischmeier & Smith, 1978; Wischmeier & Smith, 1958) včasih definirajo skupaj (a še vedno kot produkt posameznih dejavnikov); EI . Produkt namreč opiše skupen potencial vpliva udarca dežnih kapelj in turbulence površinskega odtoka ter odplavljanja odlepljenih delcev tal.

Tako RUSLE kot USLE pri kriteriju za določitev erozivnih dogodkov uporabljata količino padlega dežja. ***Eroziven dogodek je dogodek, pri katerem v pade vsaj 12,7 mm dežja, ali pa 6,35 mm dežja v petnajstih minutah. Če v šestih urah pade manj kot 1,27 mm dežja, se dogodek loči na dva*** (Renard in sod., 1997). Ostali padavinski dogodki so iz računa erozivnosti izločeni. Prvotno je bil postopek namenjen zmanjšanju količine analiziranih podatkov, s čimer so bile pridobljene mnoge prednosti cenejše in hitrejše analize, obenem pa

so avtorji ocenili, da so vrednosti EI v tem primeru majhne in nimajo večjega vpliva na letne vrednosti (Wischmeier & Smith, 1978). Kljub temu se tudi v današnji praksi omenjene kriterije uporablja pri računu erozivnosti, tudi zaradi možnosti primerjave rezultatov različnih študij in navezavo na pretekle rezultate (Panagos in sod., 2015a; Ballabio in sod., 2017).

Dolgoletne študije so obenem pokazale, da niso zgolj ekstremni padavinski dogodki tisti, ki povzročajo izgubo tal, temveč je v oceno izgube tal potrebno vključiti kumulativne učinke padavinskih dogodkov srednjih intenzitet. Panagos in sod. (2015a) so s študijo erozivnosti padavin na območju EU in Švice ugotovili, da imajo največji vpliv na vrednost dejavnika R **sezonskost padavin**, **geografska širina** ter **nadmorska višina**. Najvišje vrednosti erozivnosti so bile poleg tega tudi tesno povezane z območji visoke pogostosti neviht; konvekcijskih padavin – večji del Slovenije spada med navedene regije (slika 7). Vrednosti izračunanega R faktorja v ostalih relevantnih študijah za različna območja predstavlja preglednica 2.



Slika 7: Karta erozivnosti padavin v Evropski uniji s Švico (Panagos in sod., 2015a; str. 808)

Preglednica 2: Vrednosti dejavnika R v relevantnih študijah

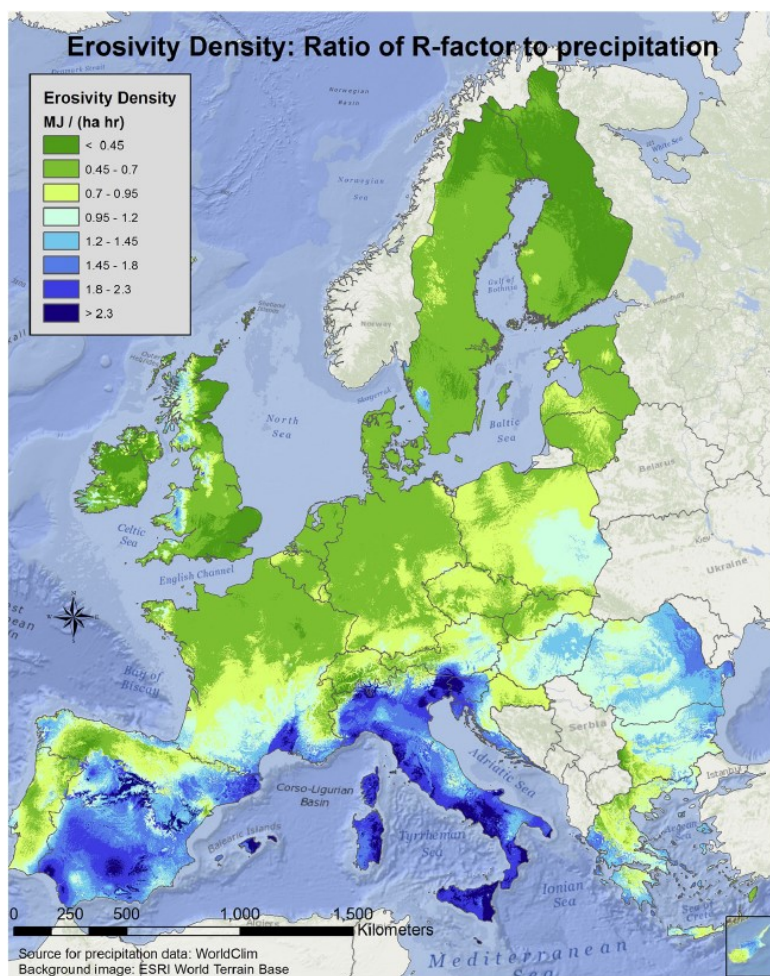
Vir/študija	Območje študije	Obdobje podatkov	Srednja vrednost R ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$)
Panagos in sod., 2015a	EU in Švica	5-40 let (odvisno od postaje)	722
	Severna Evropa		<500
	Mediterranska in alpska območja		>1000
	Slovenija	1999 – 2008	2302
Verstraeten in sod., 2006	Belgija (Ukkel, Bruselj)	1898 - 2002	871 – razvita enačba 691 – Brown & Foster
Mikoš in sod., 2006	Solčava	1990 – 2002	2186,4 – Brown & Foster; 2570,7 – van Dijk;
Petkovšek & Mikoš, 2004	Portorož	1975 – 2000	3057
Panagos in sod., 2017b	Svet	Odvisno od postaje	2190
	J Amerika		5874
	S Amerika		1409
	Evropa		488
	Afrika		303
	Azija		1487
Borrelli in sod., 2016	Italija	2002 – 2011	1715,2
	Furlanija - Julijska krajina		4581

2.4.2 Gostota erozivnosti

V nekaterih analizah in študijah erozivnosti se za oceno vzorcev erozivnosti in tipa padavin, ki vplivajo na erozivnost, uporablja tudi metoda računa gostote erozivnosti. Ta je enostavno določena kot količnik med dejavnikom erozivnosti padavin (v $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$) in količino padavin (v mm) (npr. Panagos in sod., 2015a):

$$ED = \frac{R}{p}, \quad (24)$$

in sicer v enotah $MJ\ ha^{-1}\ h^{-1}$. Območja z visoko vrednostjo gostote erozivnosti nakazujejo, da padavinske dogodke zaznamujejo visoke intenzitete krajših časovnih trajanj. Prav ti dogodki so pomemben del dejavnika erozivnosti padavin. Za območje Slovenije so značilne visoke vrednosti gostote erozivnosti, z dejavnikom R kot 2-3 -kratnikom padavin (Panagos in sod., 2015a).



Slika 8: Gostota erozivnosti v Evropi (Panagos in sod., 2015a, str. 810)

2.4.3 Kinetična energija dežja

V splošnem kinetično energijo dežnih kapljic izrazimo z znanim izrazom (npr. van Dijk in sod., 2002):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{\pi\rho D^3 v}{12}, \quad (11)$$

kjer ρ označuje gostoto vode (1000 kg/m^3), D premer dežne kapljice, v pa njeno končno hitrost (m/s). S tovrstnim pristopom je določitev kinetične energije relativno enostavna, vendar neposredne meritve navedenih parametrov niso prav pogoste. Kinetična energija je torej neposredno odvisna od velikosti kapljic in njihove končne hitrosti. Maksimalna vrednost za prvo je $\sim 5 \text{ mm}$, končna hitrost tako velikih kapljic pa doseže 9 m/s (Mikoš & Zupanc, 2000).

Energija naliva E je izračunana s pomočjo specifične kinetične energije padavin e_B (*»na površinsko enoto in enoto količine padavin«*; Petan (2010): str. 76) in količine padavin p_i za število dogodkov i :

$$E = \sum_i e_B \cdot p_i, \quad (12)$$

ali pa s pomočjo ploskovne gostote moči e_A (*»na enoto časa in površinsko enoto«*; Petan (2010): str. 76) in časovnega intervala Δt :

$$E = \sum_i e_A \cdot \Delta t. \quad (13)$$

Omenjeni specifični kinetični energiji sta med seboj povezani s pomočjo intenzitete padavin (Petan, 2010):

$$e_B = \frac{e_A}{I}. \quad (14)$$

Ker so neposredne meritve kinetične energije redke, se za oceno slednje uporabljajo empirične enačbe, ki za izračun uporabljajo podatke o količini in intenziteti padavin. Enačbe računa kinetične energije padavin so podali različni avtorji:

1. Wischmeier & Smith (1958); povzeto po Petan (2010):

$$e_A = I \cdot (11,87 + 8,73 \cdot \log_{10} I). \quad (15)$$

Pri čemer je e_A specifična kinetična energija podana z enotami $J m^{-2} mm^{-1}$, I pa intenziteta padavin v enotah $mm \cdot h^{-1}$. Enačba je bila uporabljana v USLE metodologiji. S preoblikovanjem enačbe jo lahko izrazimo v $MJ ha^{-2} mm^{-2}$:

$$e_B = 0,1187 + 0,0873 \cdot \log_{10} I. \quad (16)$$

Polje uporabnosti enačbe pa je omejeno za vrednosti $I \leq 76 mm h^{-1}$. V nasprotnem primeru ($I > 76 mm h^{-1}$) je vrednost e_B omejena na $0,238 MJ ha^{-1} mm^{-1}$. Specifična kinetična energija e se pri intenzitetah višjih od $76 mm h^{-1}$ ustali pri opisani vrednosti, saj je bilo ugotovljeno, da se pri višjih intenzitetah od predpisane srednja velikost kapljic ne povečuje več, prav tako ne njihova hitrost ob trku ob tla.

2. Brown & Foster (1987):

$$e_A = 29 \cdot I \cdot [1 - 0,72 \cdot \exp(-0,05 \cdot I)]. \quad (17)$$

Kjer je e_A podana kot specifična kinetična energija padavin v enotah $J m^{-2} h^{-2}$. Enačbo priporočajo avtorji RUSLE metode (Renard in sod., 1997). Podobo kot v 1. primeru je lahko podana:

$$e_B = 0,29 \cdot [1 - 0,72 \cdot \exp(-0,05 \cdot I)]. \quad (18)$$

3. van Dijk in sod. (2002):

$$e_A = 28,3 \cdot I \cdot [1 - 0,52 \cdot \exp(-0,042 \cdot I)], \quad (19)$$

e_A je ponovno podana kot specifična kinetična energija v enotah $J m^{-2} h^{-2}$. Mikoš in sod. (2006) navajajo, da je enačba dosledno dajala višje vrednosti kot osnovna RUSLE enačba po Foster in sod. (1981). Območje študije je zajemalo gorsko podnebje Slovenije, kjer so prevladovali nalivi nižjih intenzitet (manj od 26,7 mm na uro). V splošnem je enačba van Dijk predvidela višje vrednosti specifične kinetične energije za nalive z manjšo intenziteto, medtem ko je bila za večje intenzitete vrednost e višja, če izračunana po predlagani RUSLE metodologiji.

4. Petan (2010)

Avtor je na podlagi izbora najvišjega možnega Nash-Sutcliffeovega koeficienta modelske učinkovitosti izbral najustreznejšo odvisnost med kinetično energijo in intenziteto ($KE-I$) za štiri merilna mesta (in tri podnebne tipe) v Sloveniji:

- Bovec (subalpsko podnebje):

$$e_B = 0,336 \cdot [1 - 0,60 \cdot \exp(-0,047 \cdot I)], \quad (20)$$

specifična kinetična energija padavin e_B je podana v $MJ \cdot ha \cdot mm^{-1}$, intenziteta I pa v $mm \cdot h^{-1}$. Odvisnost ima veljavnost v območju intenzitet padavin med 0,1 in 254 mm/h .

- Ilirska Bistrica in Koseze (submediteransko podnebje):

$$e_B = 0,294 \cdot [1 - 0,60 \cdot \exp(-0,085 \cdot I)]. \quad (21)$$

Enačba ima veljavnost v območju intenzitet padavin med 0,1 in 172 mm/h .

- Kozjane (submediteransko podnebje):

$$e_B = 0,318 \cdot [1 - 0,56 \cdot \exp(-0,056 \cdot I)]. \quad (22)$$

Enačba ima veljavnost v območju intenzitet padavin med 0,1 in 150 mm/h .

- Ljubljana (zmerno celinsko podnebje):

$$e_B = 0,310 \cdot [1 - 0,60 \cdot \exp(-0,074 \cdot I)]. \quad (23)$$

Enačba ima veljavnost v območju intenzitet padavin med 0,1 in 147 mm/h .

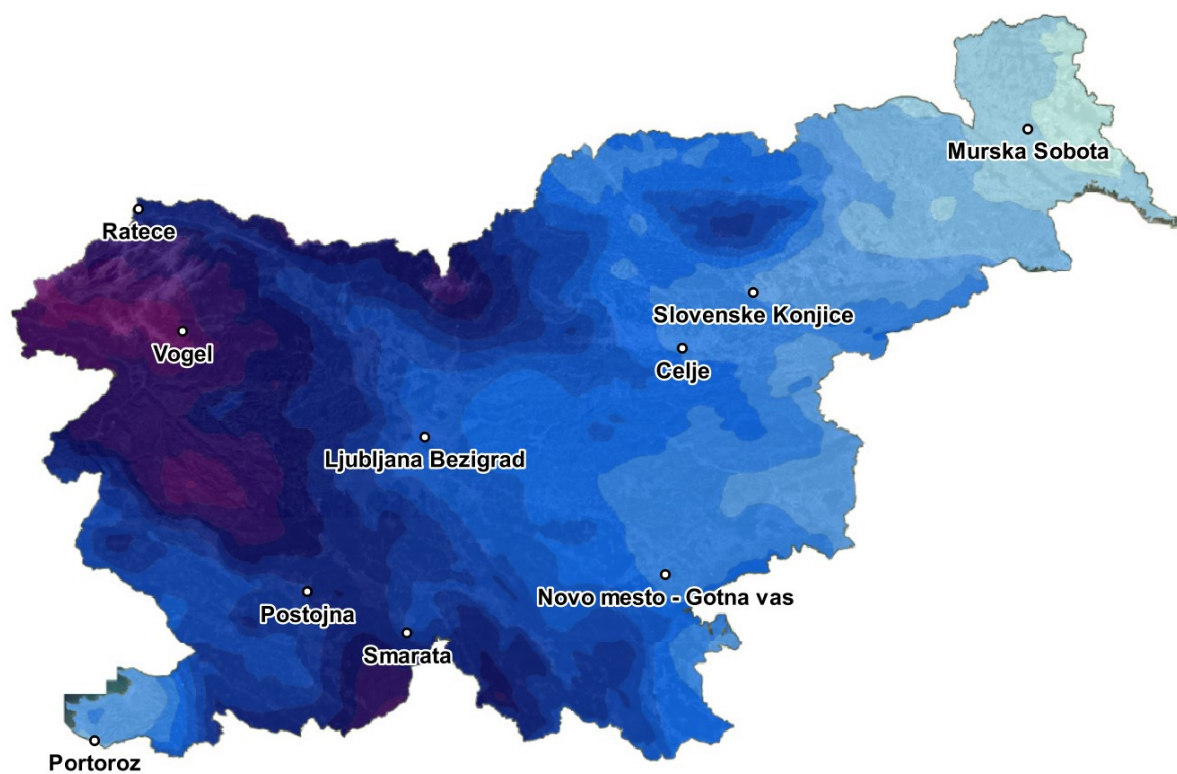
3 PODATKI IN METODE

3.1 Postaje s podatki

V analizi so bili uporabljeni podatki desetih pluviografskih postaj po Sloveniji (preglednica 3). Kriterij za izbiro je bila dolžina niza meritev ter prostorska umeščenost – z izbiro smo želeli zajeti čim bolj obsežne nize podatkov, ki obenem prostorsko celovito zavzemajo teritorij Slovenije (slika 9). Postaja z najnižjo nadmorsko višino je Portorož, 2 metra nad morjem, medtem ko je najvišje postavljena merilna postaja na Voglu; na 1535 metrih nadmorske višine. Dolžina nizov podatkov znaša od 25 let za postajo v Portorožu in 35 let za postajo na Voglu, do 69 let za pluviograf na postaji Ljubljana Bežigrad. Ostali nizi podatkov so dolžine 42 (Rateče, Šmarata in Slovenske Konjice) ali 47 let (Postojna, Novo mesto, Celje in Murska Sobota). Na razpolago smo imeli meritve vse do konca marca 2017, vendar smo zaradi reprezentativnosti analiz v posameznih primerih uporabili podatke zgolj do konca leta 2016 (natančneje opisano v poglavju 3). Ravno tako smo ravnali pri začetkih časovnega niza; za postaje smo analize senzitivnosti začeli z 2. letom podatkov posameznega niza, z namenom izogiba delnih podatkov v začetnem letu. Časovna ločljivost podatkov je bila 5-minutna. Prostorsko razporeditev postaj prikazuje slika 9.

Preglednica 3: Izbrane pluviografske postaje po Sloveniji s identifikacijskimi št. in leti začetka ter konca meritev

Št. postaje	Ime postaje	Nadmorska višina (m)	Začetek meritev	Konec meritev
51	Rateče	864	Maj 1975	Marec 2017
136	Postojna	533	April 1970	Marec 2017
162	Šmarata	580	April 1975	Marec 2017
192	Ljubljana Bežigrad	299	April 1948	Marec 2017
249	Novo mesto	220	Januar 1970	Marec 2017
268	Celje	242	April 1970	Marec 2017
30	Slovenske Konjice	330	Januar 1975	Marec 2017
355	Murska Sobota	187	April 1970	Marec 2017
437	Vogel	1535	Maj 1982	Marec 2017
464	Portorož	2	Junij 1992	Marec 2017



Slika 9: Razporeditev izbranih pluviografskih postaj po Sloveniji na sloju povprečne letne višine padavin

3.2 Razdelitev postaj glede na podnebne tipe

Del analiz je bil izveden s pomočjo enačb, ki jih je z različne podnebne tipe predlagal Petan (2010). Podnebne tipe Slovenije je definiral Ogrin (1996) glede na Koppenov podnebni sistem, z uporabo podatkov meteoroloških postaj po Sloveniji za obdobje med 1961 in 1990. Te so bile na podlagi povprečnih vrednosti temperatur, letne razporeditve in količine padavin, razdeljene v tri glavne razrede in devet podrazredov (slika 10):

1. Submediteransko podnebje

1.1. Obalno

1.2. Zaledno

2. Zmerno celinsko podnebje

2.1. Zahodne in južne Slovenije

2.2. Osrednje Slovenije

2.3. Vzhodne Slovenije

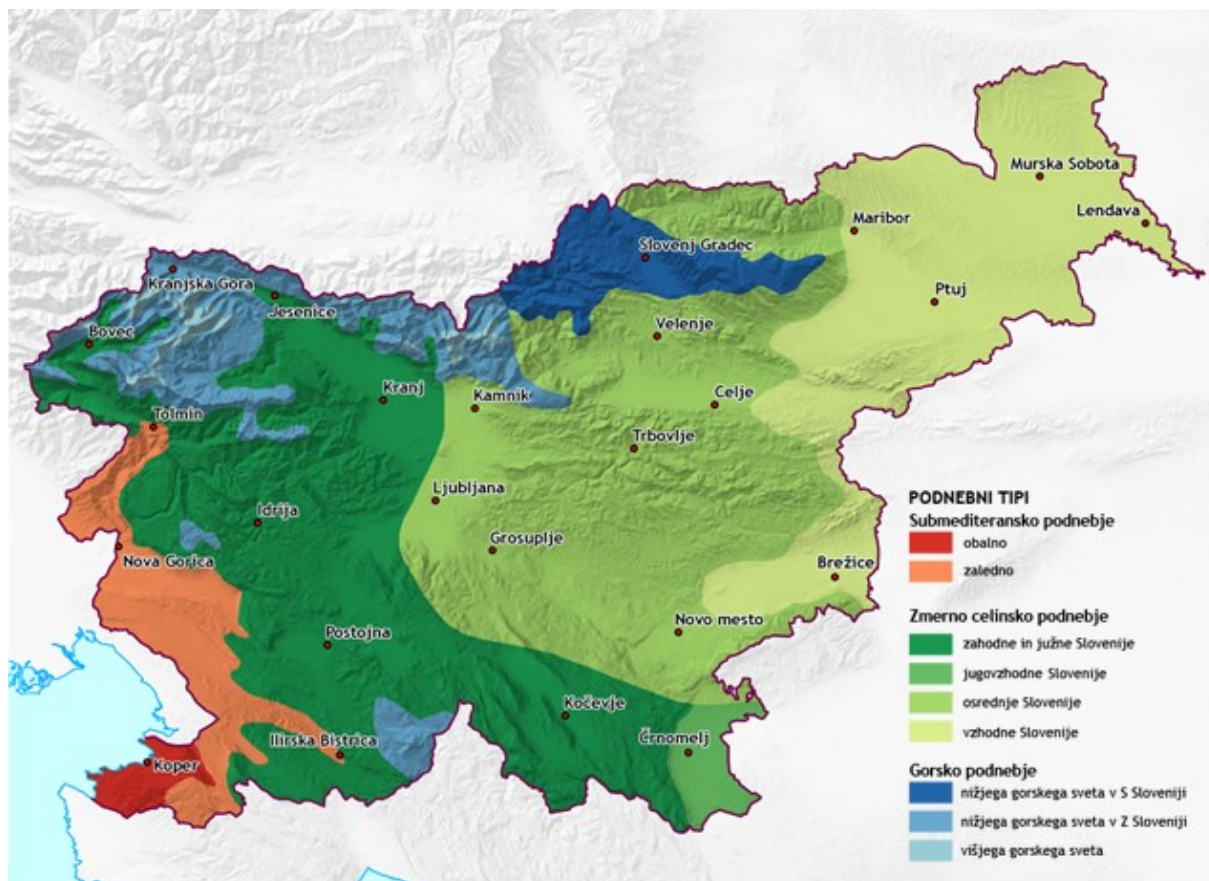
2.4. Jugovzhodne Slovenije

3. Gorsko podnebje

3.1. Nižjega gorskega sveta zahodne Slovenije

3.2. Višjega gorskega sveta

3.3. Nižjega gorskega sveta severne Slovenije



Slika 10: Podnebni tipi Slovenije (GIS, 2017)

Preglednica 4: Določitev podnebnih tipov izbranim merilnim postajam

Št. postaje	Ime postaje	Podnebni tip
51	Rateče	Gorsko (nižjega gorskega sveta zahodne Slovenije)
136	Postojna	Zmerno celinsko (zahodne in južne Slovenije)
162	Šmarata	Zmerno celinsko (zahodne in južne Slovenije)
192	Ljubljana Bežigrad	Zmerno celinsko (osrednje Slovenije)
249	Novo mesto	Zmerno celinsko (osrednje Slovenije)
268	Celje	Zmerno celinsko (osrednje Slovenije)
30	Slovenske Konjice	Zmerno celinsko (vzhodne Slovenije)
355	Murska Sobota	Zmerno celinsko (vzhodne Slovenije)
437	Vogel	Gorsko (nižjega gorskega sveta zahodne Slovenije)
464	Portorož	Submediteransko (obalno)

Po razvrstitvi izbranih postaj v podnebne tipe ugotovimo, da jih 7 pripada (najbolj razširjenemu) zmernemu celinskemu podnebju (Postojna, Šmarata, Ljubljana Bežigrad, Novo mesto, Celje, Slovenske Konjice in Murska Sobota) z relativno enakomerno zastopanostjo vseh treh podtipov. Dve postaji spadata v gorsko podnebje (Rateče in Vogel), Portorož pa zastopa submediteranski tip podnebja (preglednica 4).

Glede na razdelitev postaj med različne podnebne tipe, so bile zanje uporabljene ustrezne enačbe (preglednica 5), ki jih je predlagal Petan (2010).

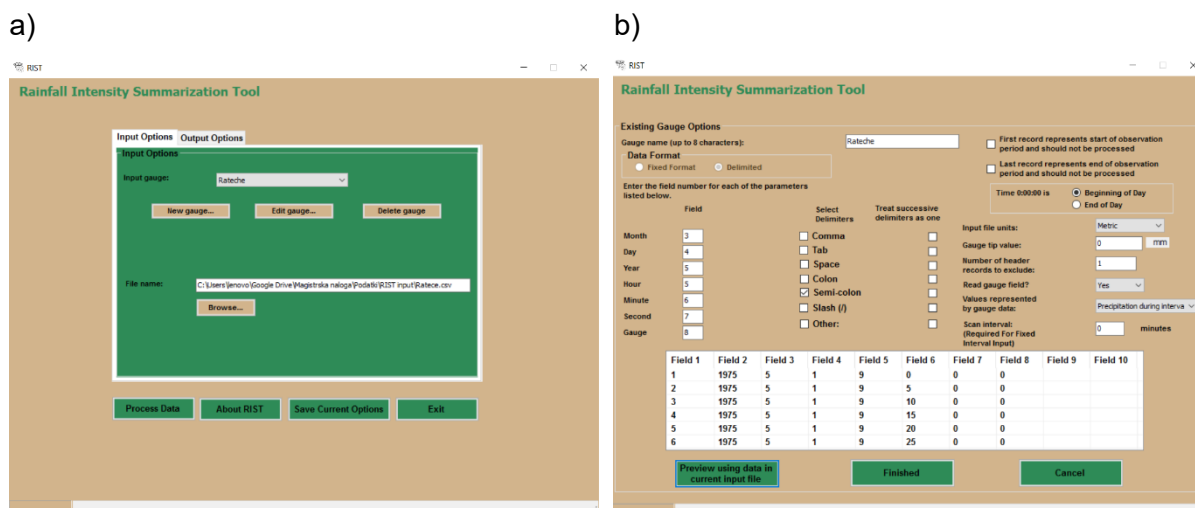
Preglednica 5: Pregled uporabljenih enačb za analizirane postaje po Petan (2010)

Št. postaje	Ime postaje	Uporabljene enačbe
51	Rateče	Bovec (Petan, 2010)
136	Postojna	Ljubljana (Petan, 2010)
162	Šmarata	Ljubljana (Petan, 2010)
192	Ljubljana Bežigrad	Ljubljana (Petan, 2010)
249	Novo mesto	Ljubljana (Petan, 2010)
268	Celje	Ljubljana (Petan, 2010)
30	Slovenske Konjice	Ljubljana (Petan, 2010)
355	Murska Sobota	Ljubljana (Petan, 2010)
437	Vogel	Bovec (Petan, 2010)
464	Portorož	Kozjane (Petan, 2010)

3.3 RIST - Rainfall Intensity Summarization Tool

Program RIST, ki omogoča analize padavinskih podatkov, so razvili na Ministrstvu za kmetijstvo Združenih držav Amerike (USDA – United States Department of Agriculture). V nalogi smo ga poleg kode v programu R uporabili za izračun dejavnika erozivnosti padavin R , saj ob ustrezni obliki vhodnih podatkov predstavlja učinkovito in enostavno orodje za izračun erozivnosti padavin, in je bilo kot tako uporabljeno že v številnih študijah (Panagos, Ballabio, in sod., 2015c; Borrelli in sod., 2016). Najnovejša verzija orodja RIST je prosto dostopna na spletnih straneh USDA (Dabney & Justice, 2016), od koder si jo uporabniki lahko prenesejo na osebni računalnik.

Urejanje merjenih podatkov lahko uporabnik opravi v zavihku »Edit Gauge«, potem, ko izbere vhodno datoteko s padavinskimi podatki. Ta je lahko v formatu ».txt« ali ».csv«, pri slednji pa programu pomagamo z izbiro »delimited« v zavihku formata podatkov. Glede na strukturo podatkov, določimo še stolpce za mesec, dan, leto, ure, minute in sekunde, ter izmerjeno količino padavin (ang. *gauge*). Ob določitvi merskega sistema (*Metric*, poleg ponujenega *English*) lahko s klikom na gumb »Preview using data in current input file« program prikaže prvih nekaj vrstic podatkov, kar nam služi kot dodatna preverba.

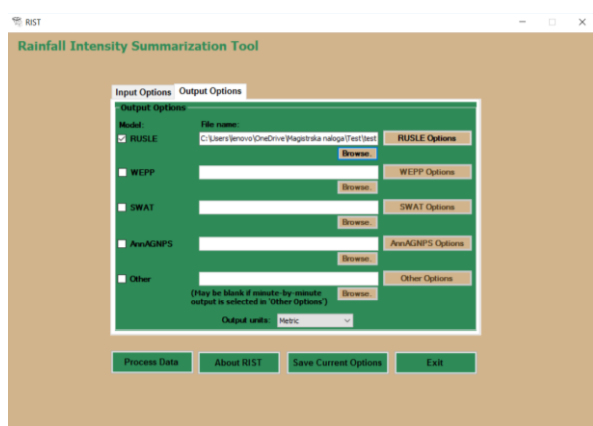


Slika 11: Vstopno okno programa RIST (a) in vnos datotek s podatki ter določitve zahtev vhodne datoteke v programu RIST (b)

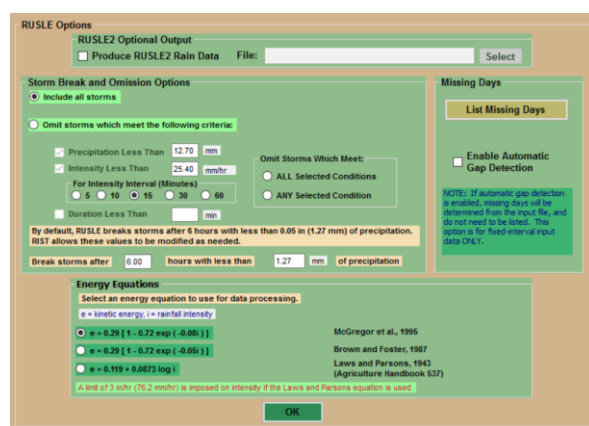
Vhodni podatki, ki jih uporabljamo v orodju RIST, morajo slediti predpisani strukturi; v posameznih stolpcih datoteke naj se ločeno nahajajo leto, mesec, dan, ure, minute in sekunde merjenih količin padavin (slika 11b). V primeru uporabe podatkov slovenskih pluviografov, moramo slednje pred uvozom v RIST ustrezno prilagoditi, za kar smo uporabili programsko kodo v R.

Po vnosu vhodnih podatkov sledi določitev izhodne datoteke. Za slednjo je najbolje, da jo v želeni mapi že vnaprej ustvarimo (prazna besedilna datoteka) ter programu RIST omogočimo povezavo do nje. V istem zavijku (»*Output Options*«) uporabnik določi metodo izračuna (slika 12a). Na voljo so modeli RUSLE, WEPP, SWAT, AnnGNPS ter »Other«. Za potrebe naših izračunov smo uporabili RUSLE metodo, znotraj nje pa enačbo Brown & Foster, 1987. Ob izbiri modela za izračun je ponovno potrebna pozornost pri izbiri enot izračuna (»*Output units*«), ter izbrati merski sistem.

a)



b)



Slika 12: Možnosti izpisa produktov računa ("Output") v programu RIST (a) in dodatne možnosti za izračun z metodo RUSLE v programu RIST (b)

Z vnosom vseh obveznih sestavin s klikom na gumb »*Process Data*« zaženemo izračun. Po koncu izračunov (ki lahko trajajo nekaj minut, odvisno od dolžine časovnega niza vhodne datoteke) nas program o tem obvesti, v mapi in izbrani izhodni datoteki pa lahko najdemo rezultate izračuna (slika 13).

RIST 3.98.01

RUSLE Storm Output Table for Period of Data Processed.

Date MO/DA/YR	PRECIP mm	DURATION hrs	MAX_5 mm/hr	MAX_10 mm/hr	MAX_15 mm/hr	MAX_30 mm/hr	MAX_60 mm/hr	ENERGY MJ/ha	EI30 MJ*mm/ha*hr
05/01/1975	1.20	4.67	1.200	1.200	0.800	0.800	0.600	0.112	0.090
05/03/1975	3.30	8.08	6.000	4.800	4.800	3.400	2.100	0.353	1.201
05/04/1975	31.20	46.08	8.400	6.600	5.600	5.200	3.700	3.337	17.350
05/06/1975	11.00	12.92	7.200	6.600	6.000	4.000	3.000	1.206	4.825
05/07/1975	24.40	34.08	12.000	11.400	10.400	8.600	7.200	3.121	26.837
05/11/1975	2.80	5.58	2.400	2.400	2.000	1.600	1.000	0.266	0.426
05/12/1975	0.60	1.67	2.400	1.800	1.200	0.600	0.500	0.037	0.022
05/13/1975	3.90	15.67	1.200	1.200	1.200	1.000	0.900	0.364	0.364

Slika 13: Datoteka z rezultati izračuna programa RIST

3.4 Analiza občutljivosti

Kot orodje za določitev pomembnosti posameznih vhodnih parametrov modela, pa tudi za določitev morebitnih napak, prepoznavanje pomembnosti področij modela in podatkov ter za poenostavljanje modela, se v zadnjem času vse pogosteje uporablja t.i. analiza občutljivosti. Uporaben pregled metod in njihove uporabe so pripravili Saltelli in sod. (2008), specifične aplikacije pa med drugim ponudijo še Gan in sod. (2014), Saltelli (1999), looss & Lemaitre (2015) ter Lobo & Bonilla (2015).

Analiza občutljivosti (ang. *sensitivity analysis*) skuša raziskati, kako je negotovost rezultatov modela (izhodnih parametrov) lahko porazdeljena v različnih virih negotovosti vhodnih parametrov modela (Saltelli in sod., 2008). Analize občutljivosti (v nadaljevanju AO) oz. senzitivnostne analize torej predstavljajo različne metode za določitev pomembnih parametrov, ki vplivajo na obnašanje celotnega modela (Gan in sod., 2014). Pomembno je ločiti izraz od sorodnega, t.j. analize negotovosti (ang. *uncertainty analysis*), ki predvsem temelji na kvantificiranju negotovosti v rezultatih modela.

Metode lahko v grobem ločimo na dve skupini oz. pristopa; lokalne analize občutljivosti (lokalni pristop) in globalne analize občutljivosti (globalni pristop). Prvi pristop je zgodovinsko pomenil začetke analize občutljivosti, saj temelji na analizi vpliva spreminjanja številčnih vrednosti vhodnega parametra modela, na čemer analizira kasnejše rezultate (mednje spadajo tudi t.i. OAT (ang. *One-At-a-Time* tehnike). Tovrsten enostaven in determinističen pristop pa je v luči vedno bolj kompleksnih modelov zahteval nadgradnjo metod, zaradi česar so se razvile globalne analize občutljivosti, ki lahko upoštevajo celoten spekter vhodnih dejavnikov in njihovo medsebojno odvisnost. Avtorji (Saltelli in sod., 2004; looss & Lemaître, 2015) za uspešnost AO svetujejo določitev ciljev pred izvedbo analize, ki so lahko:

- poenostavitev modela,
- verifikacija modela,
- razumevanje modela,
- klasifikacija pomembnosti dejavnikov modela.

Na voljo je precej metod AO, ki se med seboj razlikujejo tudi po kompleksnosti, ločimo pa jih na kvalitativne in kvantitativne metode. Med kvalitativne metode med drugim spadajo:

- regresijska analiza;
- korelacijska analiza;
- Gaussov proces;
- Morris One-At-a-Time (MOAT);

- Delta test;
- Monte Carlo.

Kvantitativne metode pa obsegajo metode, kot so:

- Fourierjev amplitudni test občutljivosti (ang. *Fourier Amplitude Sensitivity Test*);
- Metoda McKay;
- Metoda Sobol'.

Kvantitativne metode so pogosto omejene na modele z manjšim številom vhodnih spremenljivk, medtem ko nekatere deterministične (kvalitativne) metode omogočajo večje število vhodnih spremenljivk (Iooss & Lemaître, 2015).

Primerjavo med metodami so za primer hidrološkega modela izvedli Gan in sod. (2014) in ugotovili, da so sicer kvalitativne metode bolj učinkovite, vendar manj zanesljive in robustne v primerjavi s kvantitativnimi metodami.

3.4.1 Standardni regresijski koeficient (SRK)

Računski model linearne regresije zapišemo kot (povzeto po Gan in sod. (2014)):

$$Y_k = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i^k + \varepsilon_k, \quad (25)$$

b_i regresijski koeficient i -tega vnosa X_i ;

ε_k odstopanje med računskim modelom in rezultatom regresije k -tega vzorca.

Standardni regresijski koeficient (SRK) je ena od metod, osnovanih na linearnem razmerju med rezultati modela in vhodnimi spremenljivkami. Mednje spadata npr. še Pearsonov koeficient korelacije in parcialni korelacijski koeficient (PKK; ang. *Partial Correlation Coefficient*). SRK je definiran kot:

$$SRK_j = \beta_j \sqrt{\frac{Var(X_j)}{Var(Y)}}, \quad (26)$$

kjer β_j predstavlja linearni koeficient regresije, ki pripada spremenljivki X_j .

3.4.2 Normaliziran kazalnik občutljivosti (NKO)

Kazalnik, uporabljan v nekaterih hidroloških študijah (Gu & Li, 2002; Bezak in sod., 2015), prav tako omogoča oceno občutljivosti parametrov. Normaliziran kazalnik občutljivosti (ang. *Normalized Sensitivity Index*) izračunamo s pomočjo osnovnega vhodnega parametra P_m in njegovega pripadajočega odziva O_m , ter spremenjenega (modificiranega) vhodnega parametra P in njegovega odziva O :

$$NKO = \frac{|O - O_m|}{|P - P_m|} \cdot \frac{|P_m|}{|O_m|}. \quad (27)$$

Absolutna vrednost v enačbi tudi pomeni, da je kazalnik vedno ne-negativno število. V sklopu analize občutljivosti z NKO smo uporabili 5 vhodnih parametrov za izbiro padavinskih dogodkov; t , p , k , l in c (preglednica 6) ter ugotavljali, kako se rezultat (vrednost dejavnika erozivnosti R) spreminja v odvisnosti spreminjanja vrednosti teh parametrov..

Preglednica 6: Vhodni parametri analize občutljivosti z NKO

Parameter	Opis	Osnovna vrednost P_m	Spremenjene vrednosti P_i	
t	Vpliv časovnega intervala na ločitve dogodkov; 2 padavinska dogodka sta ločena, če je med njima interval P_t .	6 ur	2	uri
			4	ure
			8	ur
			10	ur
			12	ur
p	Vpliv količine padavin na ločitve dogodkov; 2 padavinska dogodka sta ločena, če je med njima manj kot P_p mm padavin in 6 ur.	1,27 mm	0	mm
			0,32	mm
			0,64	mm
			1,59	mm
			2,54	mm
k	Vpliv količine padavin na obravnavo dogodkov; v računu R upoštevamo dogodke, kjer je padlo več kot P_k mm padavin.	12,7 mm	0	mm
			3,18	mm
			6,35	mm
			15,88	mm
			25,4	mm
l	Vpliv časovnega kriterija na izbiro erozivnih dogodkov, kjer v P_l minutah pade vsaj 6,2 mm padavin.	15 min	5	min
			10	min
			20	min
			25	min
			30	min
c	Vpliv količinskega kriterija na izbiro erozivnih dogodkov, kjer v 15 minutah pade vsaj P_c mm padavin.	6,2 mm	0	mm
			3,1	mm
			9,3	mm
			12,4	mm
			15,5	mm

Vsi parametri in analiza občutljivosti so bili uporabljeni na enačbah Petan (2010) za posamezne klimatske tipe, kot jih razvršča preglednica 5.

3.5 Statistični testi

Priljubljeno orodje za odkrivanje trenda v časovnih vrstah predstavljajo različne metode. Predvsem je uporaba porasla v zadnjih letih in desetletjih, s ciljem ugotoviti spremenljivost podnebja in jo ovrednotiti (Longobardi & Villani, 2010). Analizo trendov omogoča več orodij, razvitih za različne aplikacije (Kraner Šumenjak & Šuštar, 2011). V primeru pričakovanega linearnega trenda, je uporabna že regresijska analiza, medtem ko so se za nelinearne trende razvile številne metode njihovega odkrivanja. V grobem jih ločimo na parametrične in neparametrične, ki so med najpogostejše uporabljanimi. Slednje namreč ne predvidevajo, da so podatki porazdeljeni normalno, zato so uporabne v več primerih.

»Preizkus domneve ali test je vsak postopek, po katerem lahko na temelju vzorca slučajne spremenljivke X ničelno domnevo zavrremo ali ne.« (Turk, 2012, str.169)

S testom želimo preizkusiti ničelno domnevo; ta je lahko parametrična ali neparametrična. V prvem primeru postavimo ničelno domnevo o vrednosti parametra porazdelitve, v primeru neparametrične domneve pa domnevamo o neparametrični lastnosti porazdelitve slučajne spremenljivke ali vektorja. Preizkus domneve oz. test izvedemo v več korakih (Moore in sod., 2014; Turk, 2012):

1. Postavimo ničelno domnevo H_0 in alternativno domnevo H_1 .
2. Izračunamo vrednost testne statistike, na kateri je osnovan preizkus domneve, ter določimo, kako se porazdeljuje.
3. Izberemo stopnjo značilnosti α (tveganje), ki določa tudi t.i. *p-vrednost*. Na podlagi tega določimo meje kritičnega območja.
4. Sklep. Ničelno domnevo H_0 zavrremo ter ob stopnji značilnosti α sprejmemo alternativno domnevo H_1 ; v kolikor vrednost statistike ni v kritičnem območju, pa ničelne domneve H_0 ob stopnji značilnosti α ne moremo zavrniti.

3.5.1 Mann-Kendallov test

Za analizo trendov v vrednosti dejavnika erozivnosti smo v magistrski nalogi uporabili Mann-Kendallov neparametrični statistični test, s katerim ugotavljamo prisotnost trenda v časovnih serijah. Ničelna in alternativna domneva se v primeru Mann-Kendallovega testa glasita:

- H_0 : V nizu ni prisotnega enoličnega trenda
 H_1 : V nizu je prisoten enoličen trend

Statistiko S Mann-Kendallovega testa izračunamo po enačbi:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k). \quad (28)$$

Pri čemer je funkcija *signum* (*sgn*):

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1; & x_j - x_k > 0 \\ 0; & x_j - x_k = 0 \\ -1; & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (29)$$

Pozitivna vrednost statistike nakazuje pozitivno trend; negativna vrednost pa negativen trend. Statistika S ima varianco:

$$\sigma^2 = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right], \quad (30)$$

kjer je p število vezanih skupin v naboru podatkov, t_j pa število enot v j -ti vezani skupini. Porazdeljenost S je približno normalna, ko se število meritev veča.

Mann-Kendallov koeficient korelacije, tau (τ), se izračuna po enačbi:

$$\tau = \frac{S}{D}. \quad (31)$$

Pri čemer je D :

$$D = \left[\frac{1}{2} n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{2} n(n-1) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (32)$$

3.5.2 Mann-Whitneyev U test

To je neparametričen test, ki je namenjen primerjavi enakosti srednjih vrednosti dveh neodvisnih vzorcev. Podatke v tem primeru razdelimo na dva dela, velikosti n_1 in n_2 , in jih rangiramo. Ničelna in alternativna domneva se v primeru Mann-Whitneyevega testa glasita (Plečko, 2015; Machiwal in Jha, 2012);

H_0 : Vzorca sledita enaki porazdelitvi (srednja vrednost vzorcev je enaka).

H_1 : Vzorca ne sledita enaki porazdelitvi (srednja vrednost vzorcev je različna).

Statistiko U Mann-Whitneyevega testa določimo kot manjšo od dveh statistik:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1, \quad (33)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2, \quad (34)$$

pri čemer R_1 predstavlja vsoto rangov vzorca 1, R_2 vsoto rangov vzorca 2, n_1 in n_2 pa velikosti pripadajočih vzorcev. Ničelno domnevo o enakosti srednjih vrednosti lahko zavrnemo, v kolikor je izračunana vrednost statistike U večja od njene kritične vrednosti U_{krit} ob 5% stopnji značilnosti (vrednost določimo iz tabel standardizirane normalne porazdelitve). Test spada med metode, s katerimi preverjamo podobnost dveh vzorcev.

3.6 Analiza sezonskosti

Sezonskost (ang. *seasonality*) je pomemben pojav v hidrologiji, saj so padavine in pretoki vodotokov tesno povezani z letnimi časi. Posledično pričakujemo, da se bo dejavnik R precej razlikoval po posameznih letnih časih in mesecih, saj je odvisen od lastnosti naliva.

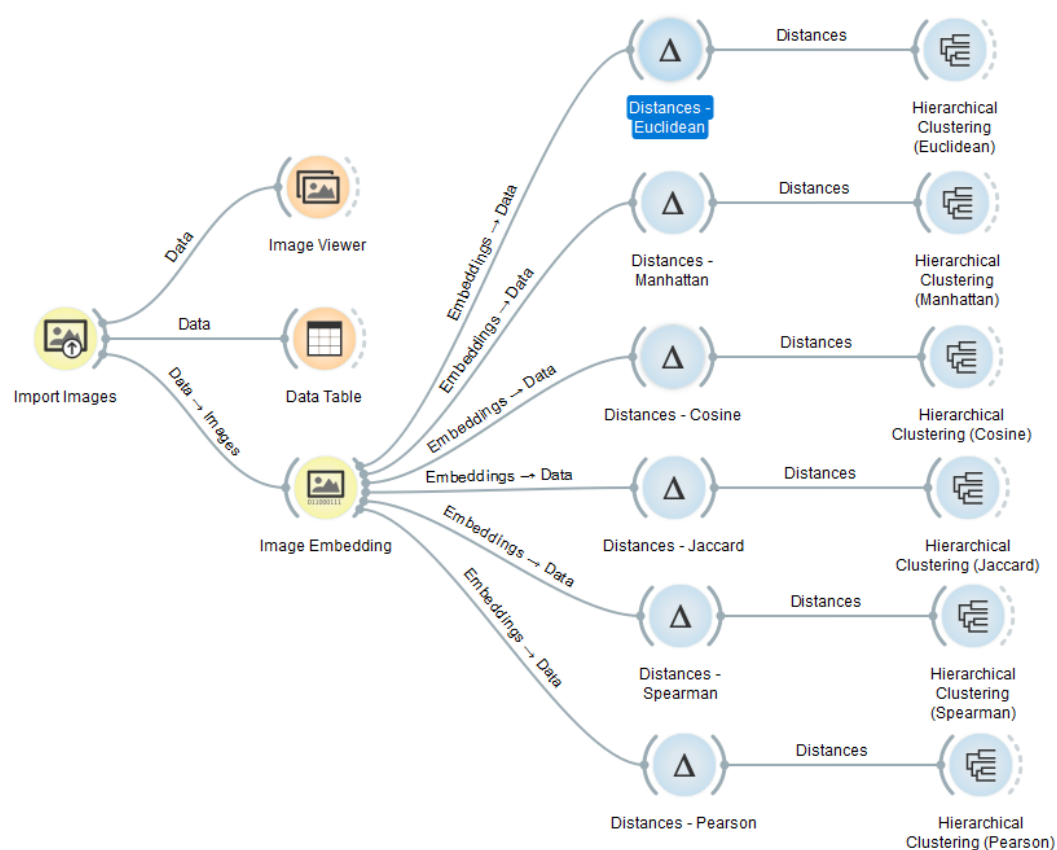
Za analizo sezonskih trendov smo uporabili mesečne vrednosti dejavnika R, ki smo ga za vsako analizirano postajo predstavili na grafu sezonskosti. Za analizo ujemanj sezonskih trendov je bil uporabljen Orange (Demšar in sod., 2013); program, razvit na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani, ki omogoča uporabo strojnega učenja in rudarjenja po podatkih (ang. *data mining*). V program smo kot slike uvozili sezonske grafe za vse postaje, brez enot in naslovov ter v enakem meriu, ter izvedli razvrstitev.

Clustering oz. grozdenje je metoda, ki omogoča združevanje podobnih – v našem primeru – grafov, ter temelji na slikovni podobnosti (oz. razlikami) med njimi. Slednje dosežemo z različnimi metodami računanja razdalje med enotami.

Uporabljene metode računanja razdalj:

- Evklidska razdalja (najbližja med dvema točkama);
- Razdalja Manhattan (med dvema točkama v mreži, merjena po vertikalnih in horizontalnih linijah);
- Kosinus (kosinus kota med vektorjema);
- Jaccardova razdalja (izračunana s pomočjo od 1 odštetega Jacardovega koeficienta, ki predstavlja količnik med presekom in unijo niza podatkov);
- Spearman (predstavlja linearno korelacijo med mesti vrednostmi na enotnem intervalu med 0 in 1);
- Pearson (predstavlja linearno korelacijo med vrednostmi na enotnem intervalu med 0 in 1).

S pomočjo ukaza »*Image Embedding*«, lahko program zelo natančno analizira različne attribute naložene skupine slik, nato pa med njimi izračuna razdalje ter s tem analizira podobnosti. Matrico razlik (ang. *Distances*) lahko v naslednjem koraku vizualiziramo s pomočjo dendograma, ki ga izriše ukaz »*Hierarchical Clustering*«. Zgradbo uporabljenega modela prikazuje slika 14.



Slika 14: Zgradba modela za analizo podobnosti grafov sezonskosti v orodju Orange

3.7 RUSLE

Praktični prikaz uporabe enačbe RUSLE je bil izveden na porečju Save Dolinke do vodomerne postaje Kranjska Gora (slika 15).



Slika 15: Položaj testnega porečja Sava - Kranjska Gora (1111)

Za grafični prikaz in aplikacijo dejavnikov RUSLE metode je bilo uporabljeno orodje SAGA GIS (Conrad in sod., 2017). SAGA (ang. **S**ystem for **A**utomated **G**eoscientific **A**nalyses) je GIS orodje, ki omogoča uporabo in manipulacijo s prostorskimi podatki. Njene prednosti vključujejo enostavno uporabo, razumljiv uporabniški vmesnik ter prosto-dostopnost – program si lahko kadarkoli pretočimo s – temu namenjene – spletne strani.

Za izračun enačbe RUSLE smo med seboj pomnožili sloje, ki so vsebovali vrednosti posameznih faktorjev v enačbi. Ti so bili prostorsko ali pa numerično enovito določeni. Omejili smo se na prej definirano območje (Sava – Kranjska Gora).

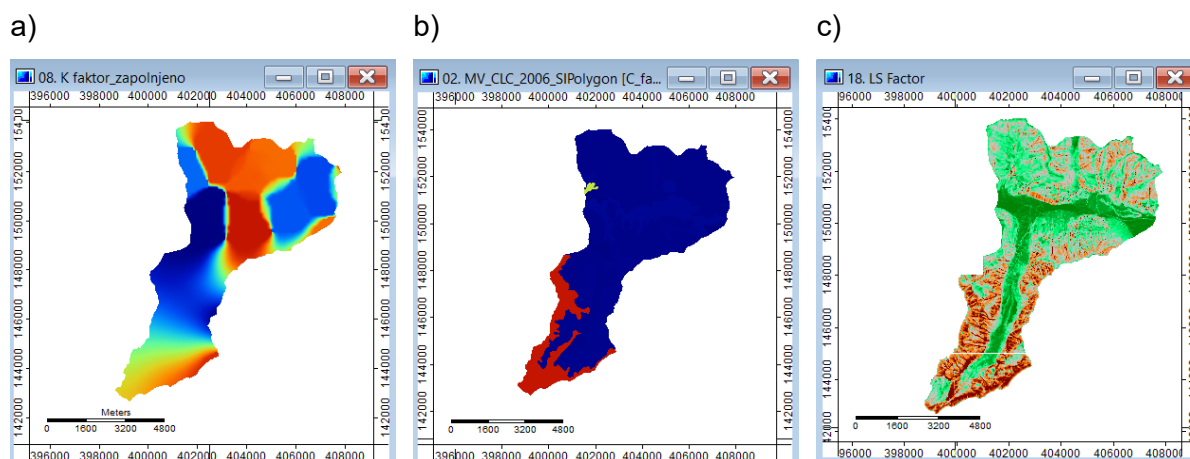
Sloji so sledili definiciji enačbe RUSLE (Renard in sod., 1997):

$$A = R \cdot K \cdot C \cdot LS \cdot P, \quad (35)$$

pri čemer so posamezni parametri enačbe RUSLE, njihov razpon vrednosti in vir podatkov, predstavljeni v nadaljevanju (preglednica 7).

Preglednica 7: Parametri RUSLE enačbe, njihov razpon vrednosti v praktičnem prikazu na testnem porečju in vir podatkov

Dejavnik		Vir podatkov
R	Dejavnik erozivnosti padavin	Izračun na podlagi pluviografskih podatkov (ARSO)
K	Dejavnik erodibilnosti tal	Pedološki profili
C	Dejavnik pokrovnosti dal	CLC Corine (1995, 2000, 2006)
LS	Dejavnik topografije (dolžine in naklona pobočja)	Digitalni model višin
P	Dejavnik zaščitnih ukrepov	Predpostavljena odsotnost zaščitnih ukrepov

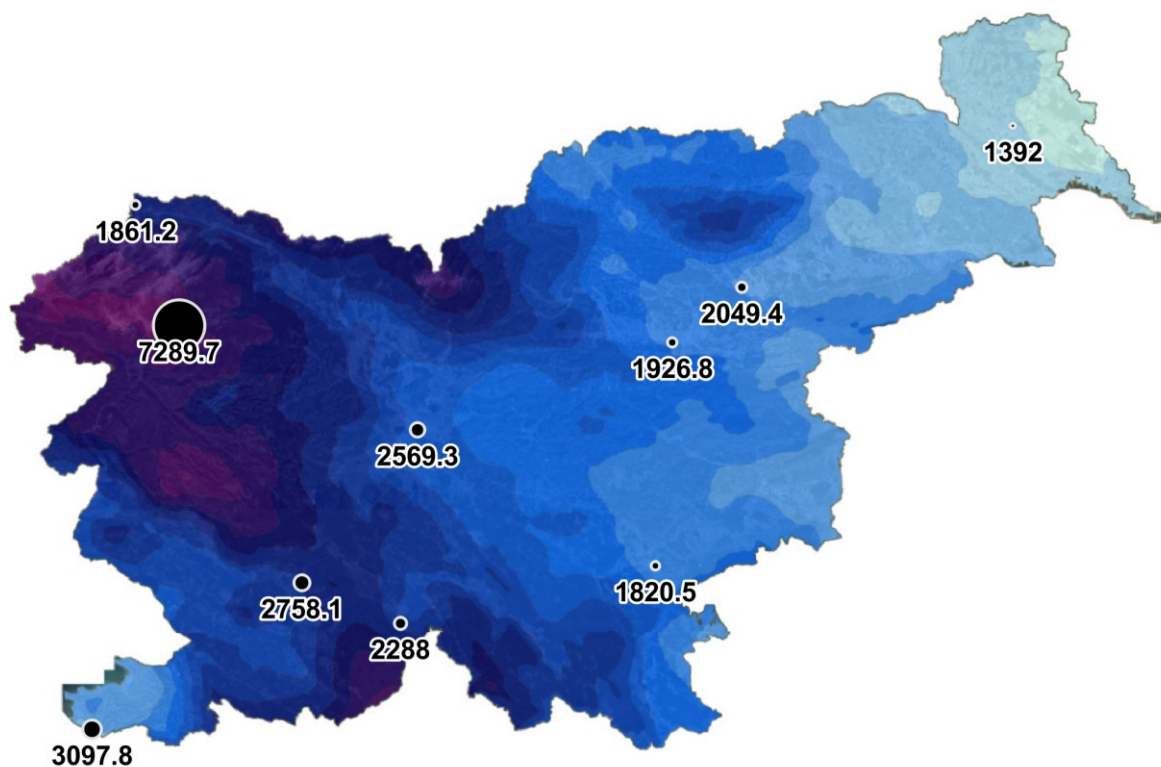


Slika 16: SAGA, porazdelitev dejavnika K (a), C (na podlagi CLC Corine 2006; b) in LS (na podlagi DMV5) na obravnavanem območju

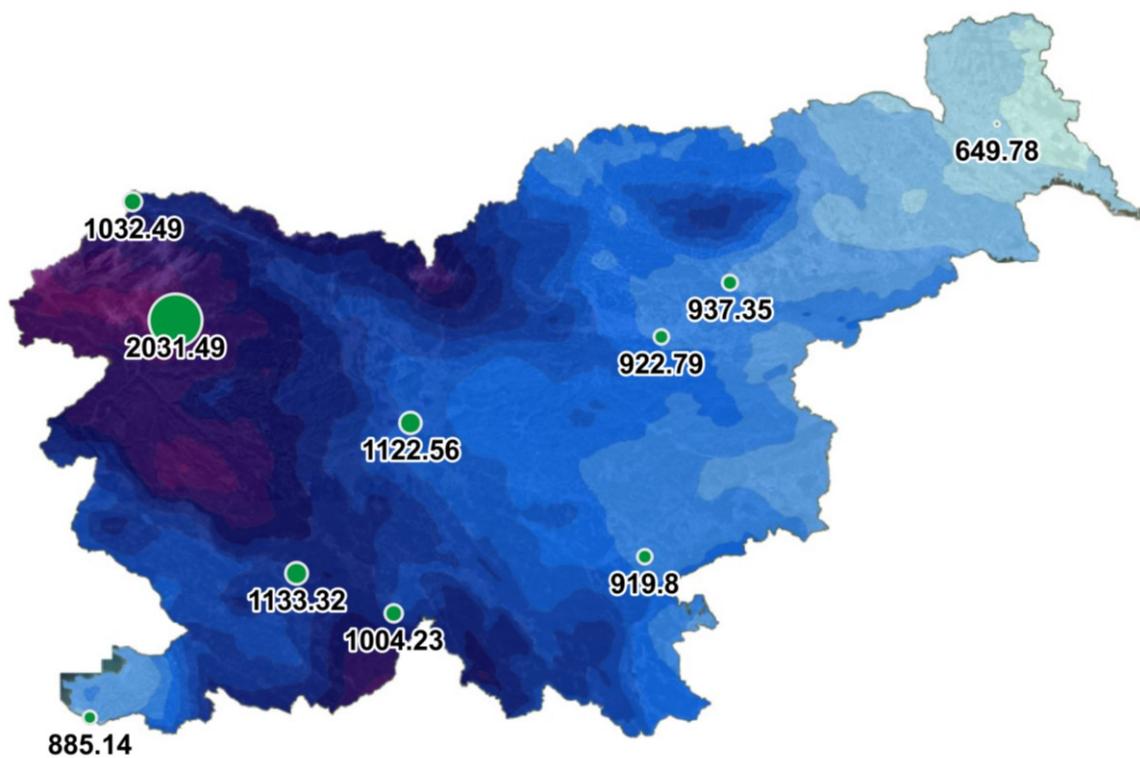
4 REZULTATI

Rezultati so bili pridobljeni s pomočjo različnih metod in orodij, opisanimi v poglavju 3. V nadaljevanju tega poglavja so predstavljeni rezultati dejavnika erozivnosti po letih za posamezne postaje. Rezultati izračuna povprečne vrednosti R faktorja za izbrane postaje (celotna obdobja, RIST, metoda Brown & Foster) so grafično predstavljeni na sliki 21. Za primerjavo odvisnosti količine padavin od erozivnosti, je dodana tudi karta povprečne količine padavin (slika 18). Pri tem je pomembno poudariti, da so količine padavin izračunane na osnovi pluviografskih podatkov, ki pa zaradi pogostih izpadov meritev v zimskem času, lahko podcenijo letne vrednosti erozivnosti padavin. Kljub temu se večina erozivnih dogodkov zgodi v toplejšem delu leta, v poletnih mesecih je prav tako prisotna večina konic dnevnih padavin - Petan (2010) navaja kar 80% delež.

Daleč najvišjo vrednost faktorja R dosega postaja na Voglu, kar so opazili že Panagos, Ballabio, in sod. (2015). Vrednosti se zmanjšujejo proti vzhodu države, kjer dosežejo minimum na postaji v Murski Soboti. Drugo najvišjo vrednost R izkazuje postaja Portorož, ki kljub majhni vrednosti letne količine padavin dosega visoko vrednost erozivnosti. Podobno vrednost sta za omenjeno postajo izračunala tudi Petkovšek & Mikoš (2004), in sicer $3057 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (*Preglednica 2: Vrednosti dejavnika R v relevantnih študijah*).



Slika 17: Izračunane vrednosti R za izbrane postaje v celotnem obdobju njihovih razpoložljivih podatkov (izračun z orodjem RIST, metoda Brown & Foster)

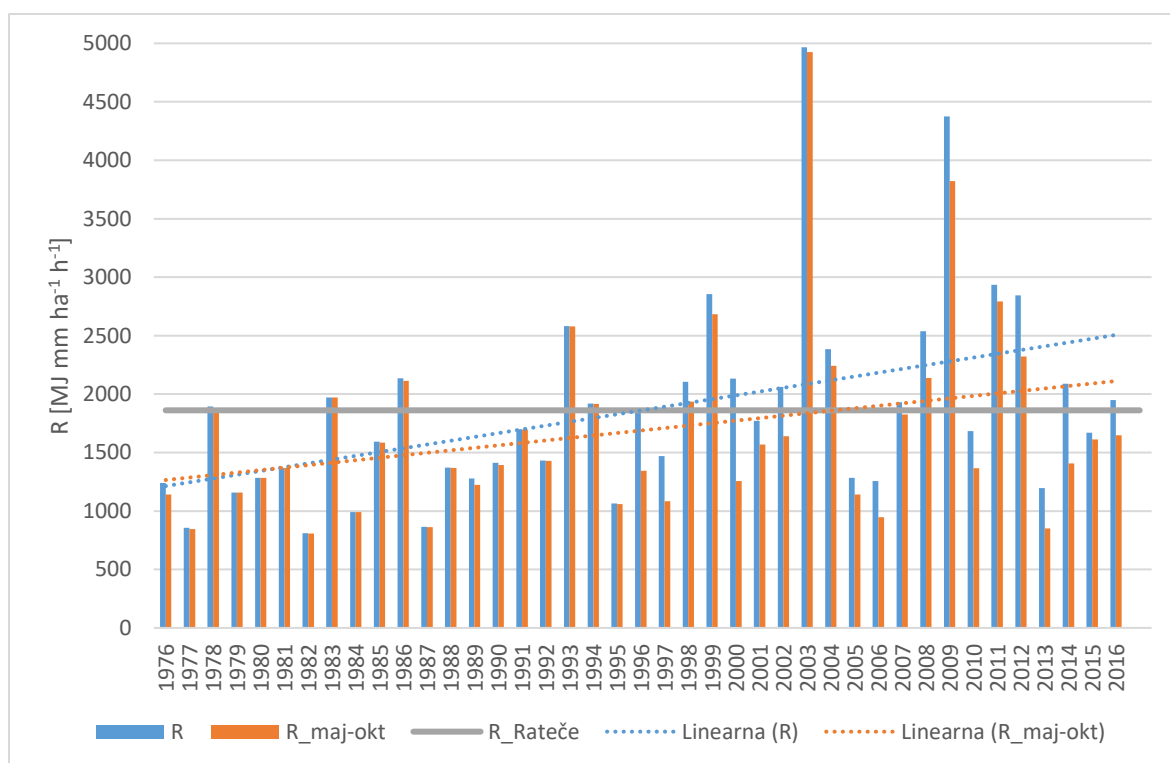


Slika 18: Povprečne letne vrednosti padavin na posameznih postajah, izračunano na osnovi pluviografskih podatkov

4.1 Rateče (864 m nmv)

4.1.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Letne vrednosti dejavnika erozivnosti R , izračunanega s pomočjo orodja RIST po metodi Brown in Foster ter s privzetimi vrednostmi vhodnih parametrov, prikazuje grafikon 1. Opazna so nihanja med leti – najvišja letna vrednost je bila izračunana v letu 2003 ($R_{2003} = 4966,9 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), najnižja pa v letu 1982 ($R_{1982} = 808,8 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Pri slednji vrednosti velja omeniti, da so zimske vrednosti dejavnika R (kot posledica načina meritev, izpada meritev zaradi okvar, snežnih padavin, ipd.) pomanjkljive do leta 1997, čemur sledi tudi enakost v vrednosti letne vrednosti dejavnika R , ter vrednosti, omejeni na mesece med majem in oktobrom ($R_{maj-okt}$). Kljub temu je tudi po omenjenem letu očitno, da se večina erozivnih dogodkov zgodi v toplem delu leta – količnik med dejavnikoma $R_{maj-okt}$ in R ima povprečno vrednost 0,91.



Grafikon 1: Vrednosti R za podatke med 1976 in 2016, Rateče (izračunano z orodjem RIST)

Standardna deviacija S_x za rezultate s postaje Rateče znaša $841,8 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ za celoletne vrednosti R ter $799 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ za vrednosti $R_{maj-okt}$.

4.1.2 Analiza trendov

Linearna trendna črta za dejavnik erozivnosti nakazuje naraščanje (grafikon 1), ki je bolj izrazito v primeru celoletnih vrednosti, prisotno pa tudi pri polletnih vrednostih R .

Z analizo trendov po Mann-Kendallu za postajo Rateče (preglednica 8), je vrednost statistike in koeficienta τ pozitivna v obeh primerih; pol- in celo-letne vrednosti erozivnosti, višja pa v zadnjem primeru (kar je tudi posledica manjkajočih meritev, kot omenjeno v 4.1.1). Trend je v obeh primerih **statistično značilen** glede na stopnjo značilnosti $\alpha = 0,05$.

Preglednica 8: Rezultati analize po Mann-Kendallu za Rateče, obdobje 1976-2016

	S	$var S$	Z	τ	$p - vrednost$
R	300	7926,7	3,4	0,366	0,001
$R_{maj-okt}$	200	7926,7	2,2	0,244	0,025

Analiza po Mann-Whitneyu (preglednica 9), ki primerja srednje vrednosti populacij, je v vseh obdobjih vrnila enak rezultat in zavrnitev ničelne domneve; rezultati niso statistično značilni.

Preglednica 9: Rezultati analize po Mann-Whitneyu za Rateče, obdobje 1977-2016

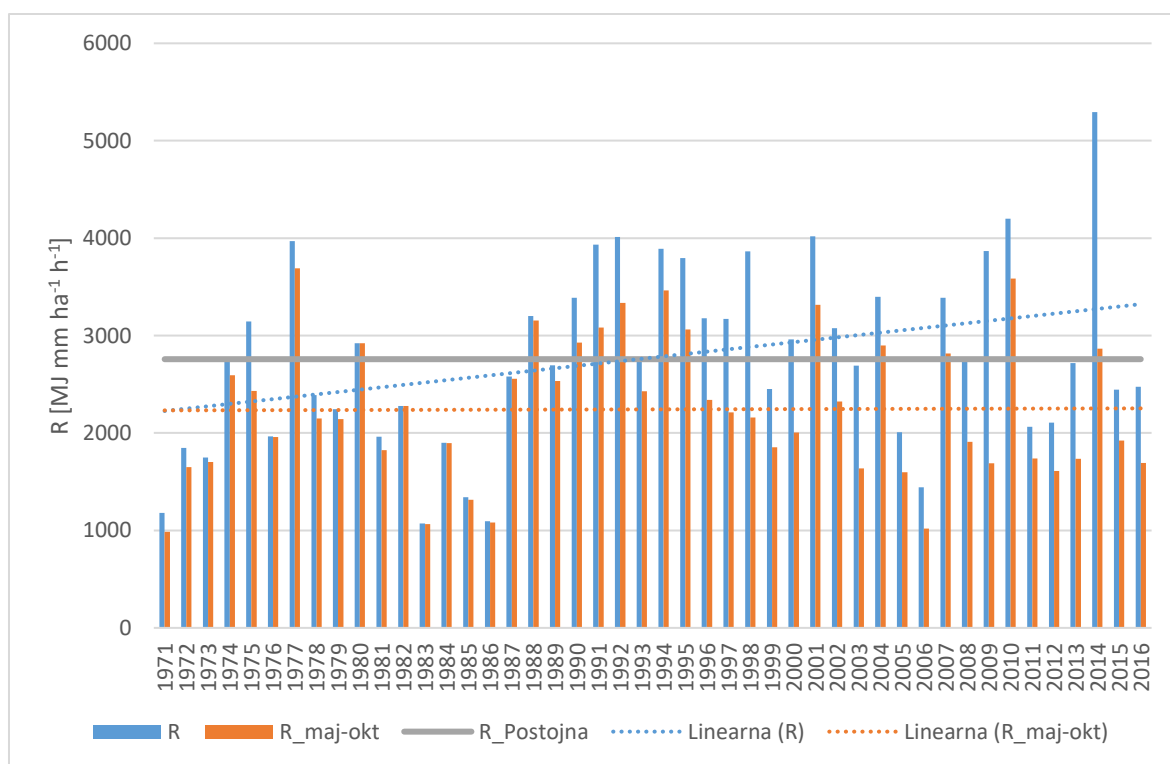
Od	Do	U	U_{krit}	Sklep
1977-1986	1987-1996	16	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni
1987-1996	1997-2006	12	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni
1997-2006	2007-2016	17	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni

4.2 Postojna (533 m nmv)

4.2.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Tudi v Postojni so bile meritve v zimskem času pomanjkljive do začetka devetdesetih let prejšnjega stoletja, kar nakazuje enakost polletnih in celoletnih vrednosti erozivnosti padavin (grafikon 2). Leto z najvišjo vrednostjo erozivnosti je 2014, ko je hladnejši del leta izrazito prispeval k tej vrednosti ($R_{maj-okt}$ za to leto je le malo nad povprečjem za celotno obdobje) – vrednost R_{2014} je $5295 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Najnižja vrednost je bila izračunana v letu 1983; $1072 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Standardna deviacija S_X za predstavljeno obdobje znaša $926,5 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ za celoletne vrednosti R ter $705 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ za vrednosti $R_{maj-okt}$. Količnik med polletnimi in celoletnimi vrednostmi znaša 0,83.



Grafikon 2: Vrednosti R za podatke med 1971 in 2016, Postojna (izračunano z orodjem RIST)

4.2.2 Analiza trendov

Medtem ko trendna črta za R narašča (grafikon 2), pa vrednosti v topli polovici leta $R_{maj-okt}$ ne kažejo podobnega trenda. To potrjuje tudi analiza po Mann-Kendallu za enako obdobje (preglednica 10); vrednost koeficienta τ je za vrednosti R izrazito pozitivna in kaže na naraščajoč trend, medtem ko je za vrednosti $R_{maj-okt}$ negativna, in nakazuje rahel upad trenda erozivnosti v poletnih mesecih. Trend je **statistično značilen** (stopnja značilnosti $\alpha = 0,05$) samo primeru celoletnih vrednosti R .

Preglednica 10: Rezultati analize po Mann-Kendallu za Postojno, obdobje 1976-2016

	S	$var S$	Z	τ	$p - vrednost$
R	231	11155,0	2,2	0,223	0,029
$R_{maj-okt}$	-33	11155,0	-0,3	-0,032	0,762

Analiza po Mann-Whitneyu (preglednica 11) je za vsa obravnavana obdobja izkazala zavrnitev ničelne domneve (s stopnjo zaupanja $\alpha = 0,05$ trdimo, da rezultati niso statistično značilni).

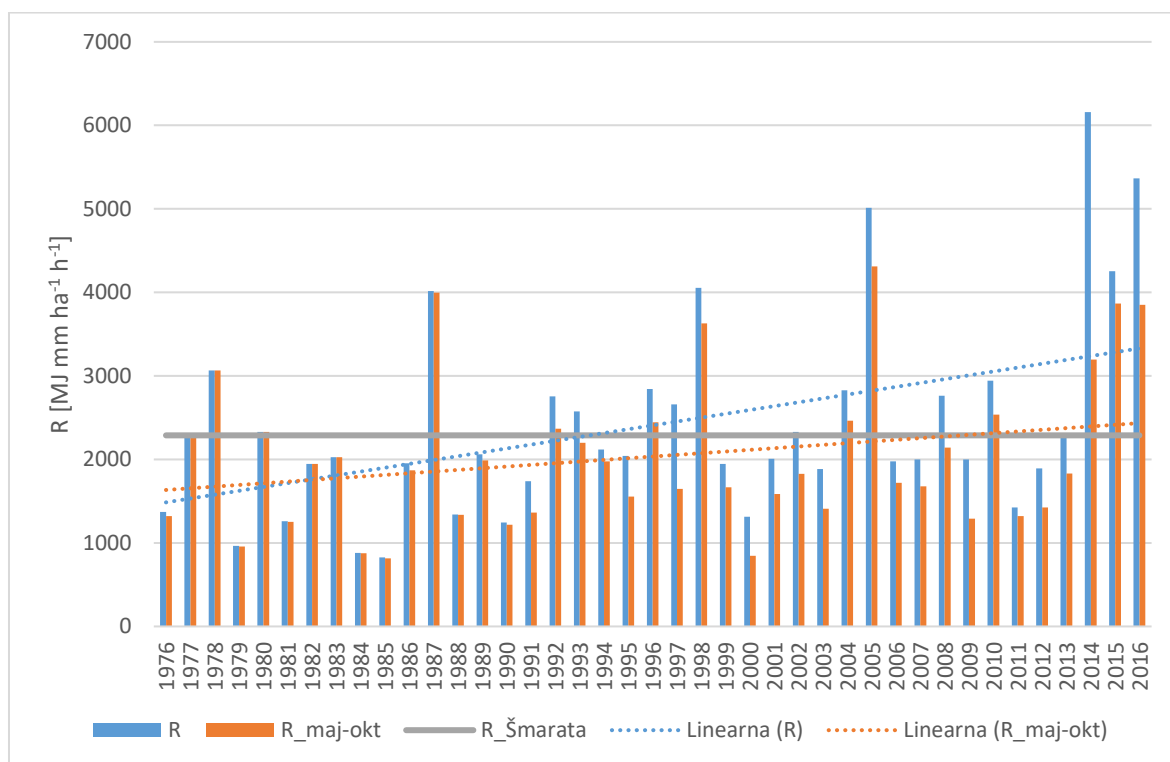
Preglednica 11: Rezultati analize po Mann-Whitneyu za Postojno, obdobje 1977-2016

Od	Do	U	U_{krit}	Sklep
1977-1986	1987-1996	7	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni
1987-1996	1997-2006	6	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni
1997-2006	2007-2016	16	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni

4.3 Šmarata (580 m nmv)

4.3.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Podoben trend v odsotnosti zimskih meritev, prisoten pri prejšnjih dveh analiziranih postajah, velja tudi za postajo Šmarata (grafikon 3). Enako kot v primeru postaje Postojna, je tudi tu leto z največjo vrednostjo R 2014; $6159 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, najnižja vrednost obeh računanih dejavnikov pa je dosežena v letu 1985; 829 (R) in 817 ($R_{maj-okt}$) $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Standardna deviacija znaša $1174.3 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ za celoletne vrednosti R , ter $891.2 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ za $R_{maj-okt}$. Količnik med $R_{maj-okt}$ in R za analizirano obdobje znaša 0,87.



Grafikon 3: Vrednosti R za podatke med 1976 in 2016, Šmarata (izračunano z orodjem RIST)

4.3.2 Analiza trendov

Linearna trendna črta narašča tako za $R_{maj-okt}$ kot R , vendar je naraščanje pri slednjem bistveno bolj izrazito. To lahko v določeni meri pripišemo manjkajočim zimskim nizom padavinskih podatkov do začetka devetdesetih let. Podobne rezultate izkazuje tudi analiza po Mann-Kendallu za obdobje med 1976 in 2016 (preglednica 12) – vrednost koeficienta τ celoletnega dejavnika R (0,271) kaže skoraj dvakratne vrednosti v primerjavi z τ , ki pripada

$R_{maj-okt}$ (0,163) V nizu je torej prisoten očiten trend naraščanja vrednosti erozivnosti. Ponovno je trend je **statistično značilen** (stopnja značilnosti $\alpha = 0,05$) samo primeru celoletnih vrednosti R .

Preglednica 12: Rezultati analize po Mann-Kendallu za Šmarato, obdobje 1976-2016

	S	$var S$	Z	τ	$p - vrednost$
R	222	7926,7	2,5	0,271	0,013
$R_{maj-okt}$	134	7926,7	1,5	0,163	0,135

Analiza po Mann-Whitneyu (preglednica 13) tudi za postajo Šmarata ne doseže vrednosti statistike $U < U_{krit}$; za primerjana obdobja lahko ničelno domnevo zavrnemo in s stopnjo zaupanja $\alpha = 0,05$ trdimo, da rezultati niso statistično značilni.

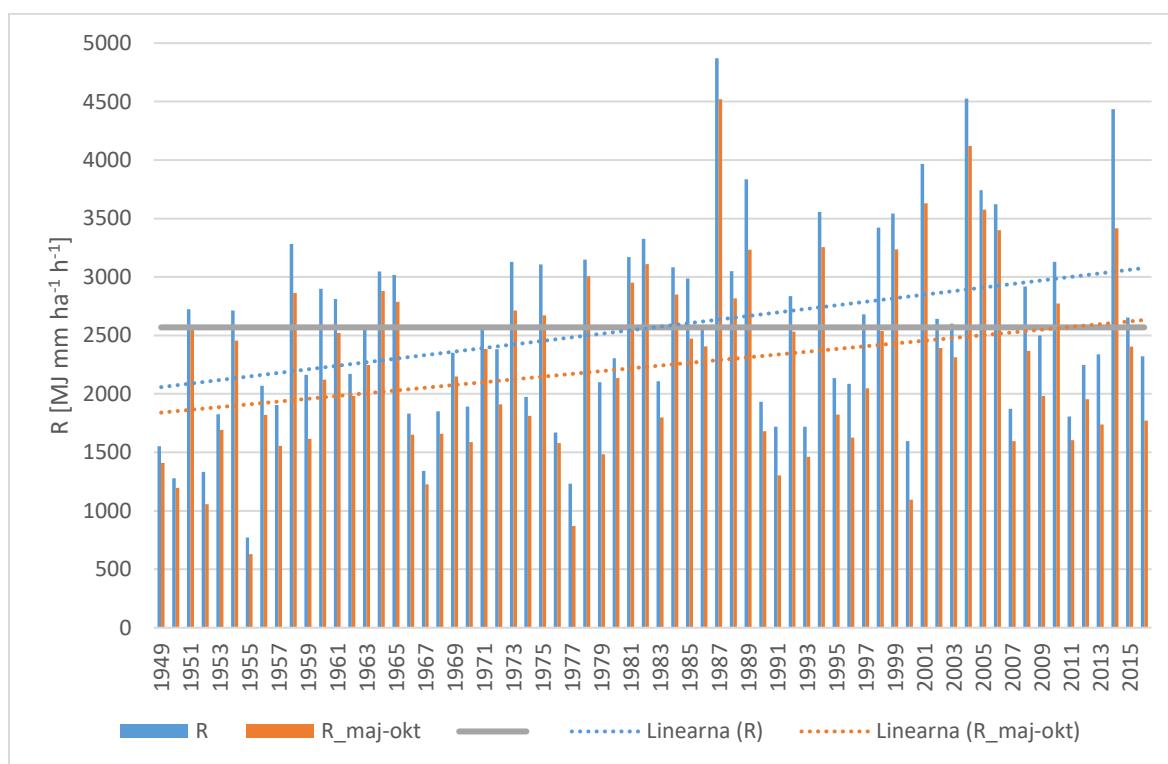
Preglednica 13: : Rezultati analize po Mann-Whitneyu za Šmarato, obdobje 1977-2016

Od	Do	U	U_{krit}	Sklep
1977-1986	1987-1996	16	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni
1987-1996	1997-2006	14	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni
1997-2006	2007-2016	14	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni

4.4 Ljubljana Bežigrad (299 m nmv)

4.4.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Postaja Ljubljana Bežigrad ima med vsemi analiziranimi postajami najdaljši neprekinjen niz meritev. Izračun letnih in polletnih vrednosti erozivnosti padavin smo tako izvedli za leta med 1949 in 2016, kljub temu pa je trend pomanjkljivosti meritev v zimskih mesecih tu manj očiten. Največjo vrednost oba dejavnika dosežeta v letu 1987; $R_{1987} = 4872 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $R_{(maj-okt)1987} = 4521 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, najmanjšo pa v letu 1955; $R_{1955} = 773 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $R_{(maj-okt)1955} = 630 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Izrazito visoke vrednosti kaže tudi leto 2014, kot opazno že v primerih prej obravnavanih postaj. Standardna deviacija ima vrednosti $819,2 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (R) in $776,3 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ($R_{maj-okt}$), medtem ko je količnik med dejavnikoma 0,87.



Grafikon 4: Vrednosti R za podatke med 1949 in 2016, Ljubljana Bežigrad (izračunano z orodjem RIST)

4.4.2 Analiza trendov

Podobno kot linearna trendna črta, tudi analiza po Mann-Kendallu kaže na trend naraščanja vrednosti erozivnosti; in sicer bolj opazen v primeru celoletnih vrednosti R ($\tau = 0,237$), kot v primeru polletnih $R_{maj-okt}$ ($\tau = 0,109$). Trendna v obeh primerih **nista statistično značilna**.

Preglednica 14: Rezultati analize po Mann-Kendallu za Ljubljano - Bežigrad, obdobje 1949-2016

	<i>S</i>	<i>var S</i>	<i>Z</i>	<i>τ</i>	<i>p – vrednost</i>
<i>R</i>	133	4550,3	2	0,237	0,050
<i>R_{maj-okt}</i>	61	4550,3	0,9	0,109	0,374

Analiza po Mann-Whitneyu za postajo Ljubljana je primerjala največ obdobj med vsemi postajami (preglednica 15). V vseh primerih lahko glede na dobljeno vrednost statistike U ničelno domnevo zavrnamo in s stopnjo zaupanja $\alpha = 0,05$ trdimo, da rezultati niso statistično značilni.

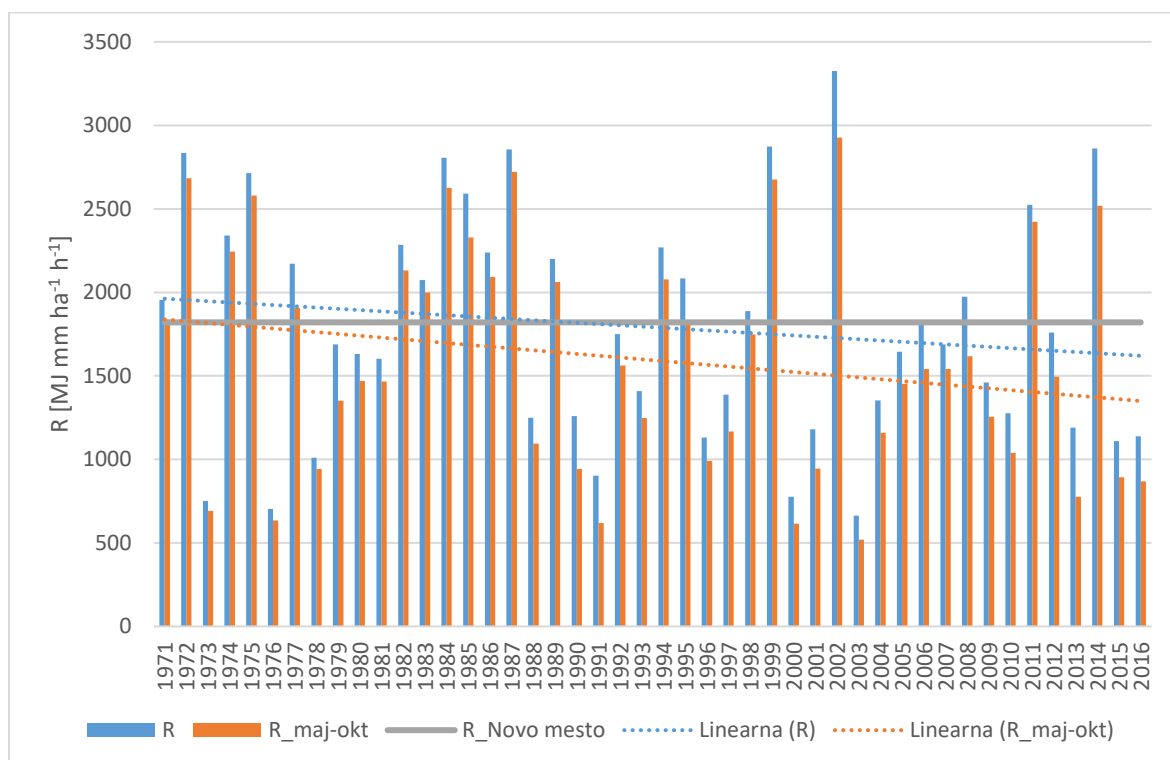
Preglednica 15: Rezultati analize po Mann-Whitneyu za Ljubljano - Bežigrad, obdobje 1957-2016

Od	Do	<i>U</i>	<i>U_{krit}</i>	Sklep
1957-1966	1967-1976	15	5	H ₀ zavrnamo; rezultati statistično značilni
1967-1976	1977-1986	13	5	H ₀ zavrnamo; rezultati statistično značilni
1977-1986	1987-1996	18	5	H ₀ zavrnamo; rezultati statistično značilni
1987-1996	1997-2006	14	5	H ₀ zavrnamo; rezultati statistično značilni
1997-2006	2007-2016	12	5	H ₀ zavrnamo; rezultati statistično značilni

4.5 Novo mesto (220 m nmv)

4.5.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Postaja Novo mesto ima precej razgibane letne vrednosti dejavnika erozivnosti. Najvišjo vrednost doseže v letu 2001; $R_{2001} = 3326 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $R_{(maj-okt)2001} = 2927 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, najmanjšo pa že takoj v naslednjem letu; $R_{2002} = 663 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $R_{(maj-okt)2002} = 519 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.



Grafikon 5: Vrednosti R za podatke med 1971 in 2016, Novo mesto (izračunano z orodjem RIST)

Standardna deviacija ima vrednosti $676,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (R) in $671,6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ($R_{maj-okt}$), medtem ko je količnik med dejavnikoma 0,87.

4.5.2 Analiza trendov

Novo mesto v nasprotju z ostalimi analiziranimi postajami v obeh primerih (R in $R_{maj-okt}$) kaže na trend upadanja letnih vrednosti. Trend je možno zaznati tako s pomočjo linearne trendne črte (grafikon 5), kot z Mann-Kendall analizo enakega obdobja. Koeficient τ je v obeh primerih izrazito negativen, trend upadanja pa močnejši pri polletnih vrednostih $R_{maj-okt}$ ($\tau = -0,156$),

kot celoletnih R ($\tau = -0,113$). Trenda **nista** statistično značilna (ob stopnji značilnosti $\alpha = 0,05$).

Preglednica 16: Rezultati analize Mann-Kendall za Novo mesto, obdobje 1971-2016

	S	$var S$	Z	τ	$p - vrednost$
R	-117	11155,0	-1,1	-0,113	0,272
$R_{maj-okt}$	-161	11155,0	-1,5	-0,156	0,130

Analizo Mann-Whitney za postajo Novo mesto prikazuje preglednica 17. Vrednost statistike U je v vseh primerih večja od U_{krit} , torej lahko ničelno domnevo H_0 v vseh primeri zavrnemo (s stopnjo zaupanja $\alpha = 0,05$ trdimo, da rezultati niso statistično značilni).

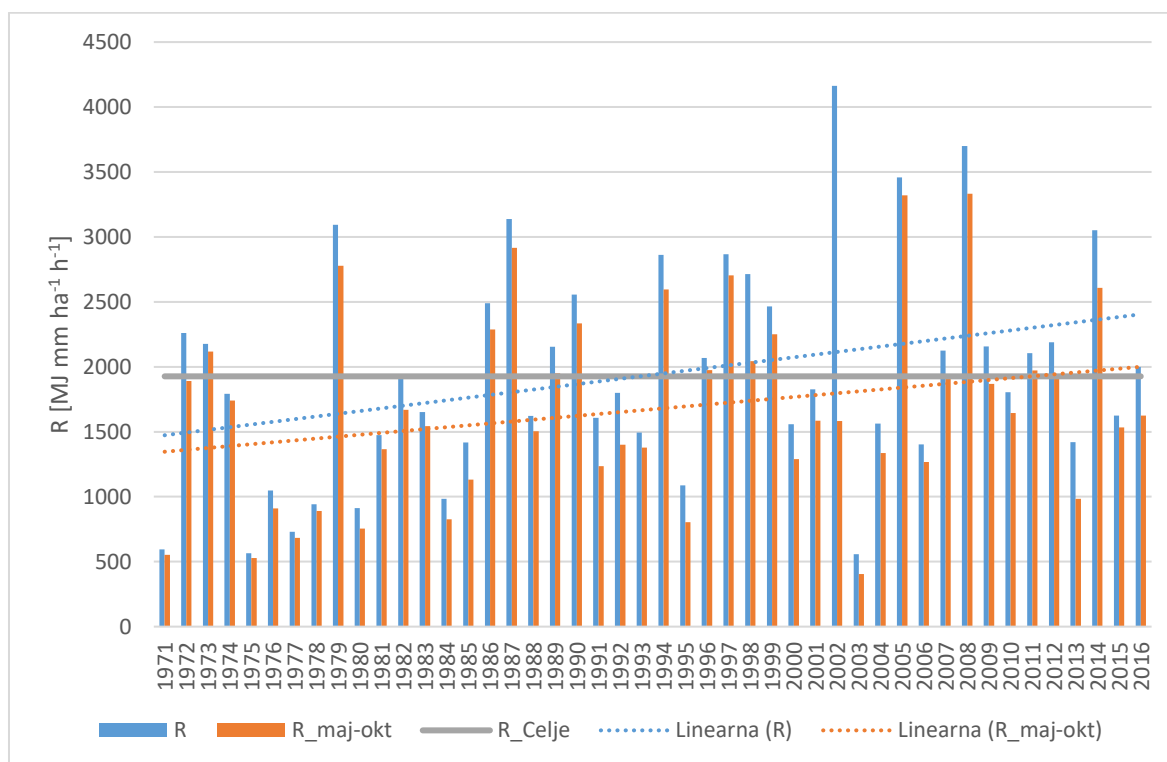
Preglednica 17: Rezultati analize Mann-Whitney za Novo mesto, obdobje 1977-2016

Od	Do	U	U_{krit}	Sklep
1977-1986	1987-1996	14	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni
1987-1996	1997-2006	17	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni
1997-2006	2007-2016	18	5	H_0 zavrnemo; rezultati statistično značilni

4.6 Celje (242 m nmv)

4.6.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Letne vrednosti dejavnika erozivnosti prikazuje grafikon 12. Največja vrednost dejavnika erozivnosti, zanimivo, precej odstopa od polletje vrednosti v istem letu; $R_{2002} = 4163 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, medtem ko je erozivnost za toplejši del leta $R_{(maj-okt)2002} = 1583 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Leto 2002 je izkazalo maksimalno vrednost tudi na postaji Novo mesto, obravnavani v prejšnjem poglavju. Najmanjša vrednost se tudi tu pojavi v naslednjem letu, 2003: $R_{2003} = 558 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $R_{(maj-okt)2003} = 406 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.



Grafikon 6: Vrednosti R za podatke med 1971 in 2016, Celje (izračunano z orodjem RIST)

Standardna deviacija ima vrednosti $825,4 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (R) in $712,6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ($R_{maj-okt}$), medtem ko je količnik med dejavnikoma $0,87$.

4.6.2 Analiza trendov

Linearni trendni črti za dejavnika R in $R_{maj-okt}$ sta izrazito naraščajoči (grafikon 12), istoznačen trend pa nakazuje tudi analiza Mann-Kendall (preglednica 18). Vrednost koeficienta τ je višja v primeru celoletnih vrednosti R ($\tau = 0,217$), kot polletnih $R_{maj-okt}$ ($\tau = 0,175$), vendar

znatna v obeh omenjenih primerih, kar nakazuje na prisotnost trenda naraščanja. Trend **je statistično značilen** v primeru celoletnih vrednosti dejavnika erozivnosti R (stopnja značilnosti $\alpha = 0,05$).

Preglednica 18: Rezultati analize Mann-Kendall za Celje, obdobje 1971-2016

	S	$var S$	Z	τ	$p - vrednost$
R	225	11155,0	2,1	0,217	0,034
$R_{maj-okt}$	181	11155,0	1,7	0,175	0,088

Analiza Mann-Whitney za postajo Celje daje podobne vrednosti statistike U ob primerjavi vseh 10-letnih obdobj (preglednica 19). Kot v primerih prejšnjih postaj lahko tudi tu ničelno domnevo zavrnamo.

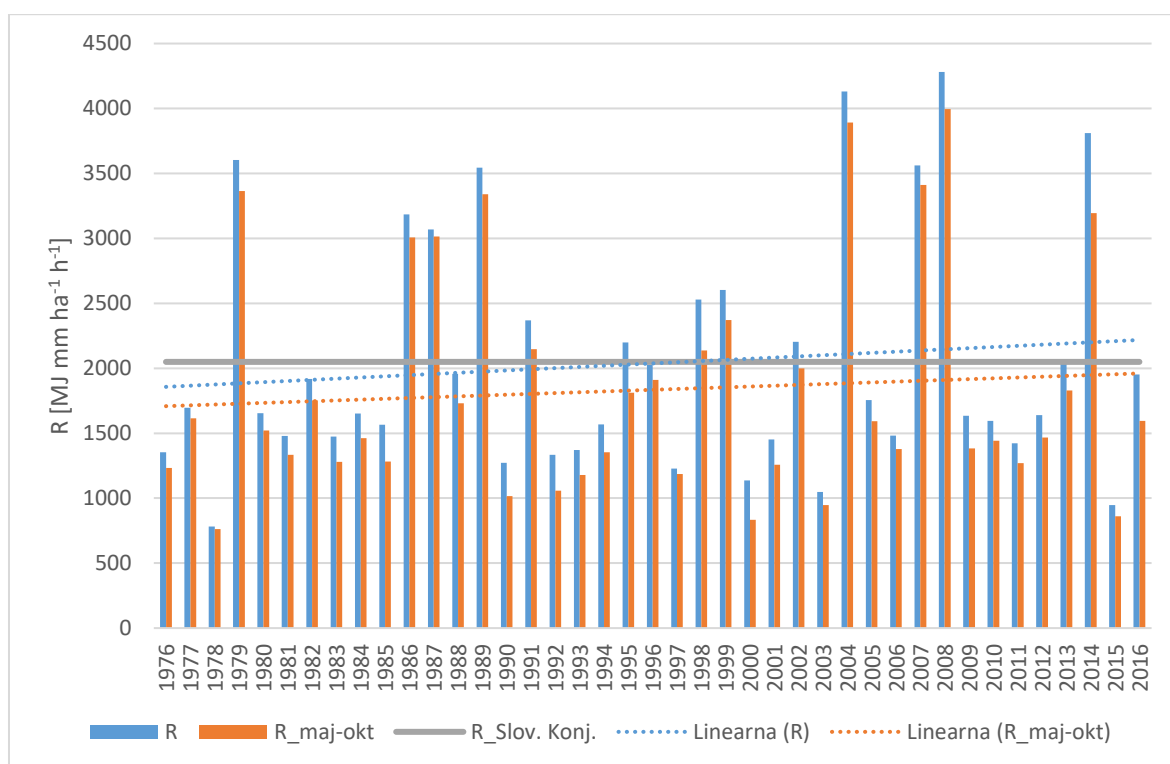
Preglednica 19: Rezultati analize Mann-Whitney za Celje, obdobje 1977-2016

Od	Do	U	U_{krit}	Sklep
1977-1986	1987-1996	15	5	H_0 zavrnamo; rezultati statistično značilni
1987-1996	1997-2006	18	5	H_0 zavrnamo; rezultati statistično značilni
1997-2006	2007-2016	15	5	H_0 zavrnamo; rezultati statistično značilni

4.7 Slovenske Konjice (330 m nmv)

4.7.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Letni dejavnik erozivnosti na postaji Slovenske Konjice izkazuje dokaj konstantno nihanje v letih. Opazno je tudi sledenje polletnega in letnega dejavnika. Največjo vrednost oba dejavnika izkazuje v letu 2008; $R_{2008} = 4280 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $R_{(maj-okt)2008} = 3995 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, najmanjša pa sta v letu 1978: $R_{1978} = 783 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $R_{(maj-okt)1978} = 762 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.



Grafikon 7: Vrednosti R za podatke med 1976 in 2016, Slovenske Konjice (izračunano z orodjem RIST)

Standardna deviacija ima vrednosti $897,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (R) in $860,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ($R_{maj-okt}$), medtem ko je količnik med dejavnikoma 0,89.

4.7.2 Analiza trendov

Trend naraščanja je sicer za analizirano obdobje podatkov postaje Slovenske Konjice prisoten, vendar ne znaten (grafikon 7). Naklona obeh linearnih trendnih črt (za vrednosti R in $R_{maj-okt}$)

sta si blizu, podobno tudi vrednosti koeficientov τ , rezultata Mann-Kendall testa (preglednica 20). Trend naraščanja v obeh primerih **ni statistično značilen** ($\alpha = 0,05$).

Preglednica 20: Rezultati analize Mann-Kendall za Slovenske Konjice, obdobje 1976-2016

	<i>S</i>	<i>var S</i>	<i>Z</i>	τ	<i>p – vrednost</i>
<i>R</i>	54	7926,7	0,6	0,066	0,552
<i>R_{maj-okt}</i>	60	7926,7	0,7	0,073	0,508

Analizo Mann-Whitney za postajo Slovenske Konjice v vseh primerih primerjave med obdobji izkaže vrednost statistike $U = 17$. Vrednost, ki je višja od U_{krit} , zato lahko ničelno domnevo tudi v tem primeru zavrnemo in s stopnjo zaupanja $\alpha = 0,05$ trdimo, da rezultati niso statistično značilni.

Preglednica 21: Rezultati analize Mann-Whitney za Slovenske Konjice, obdobje 1977-2016

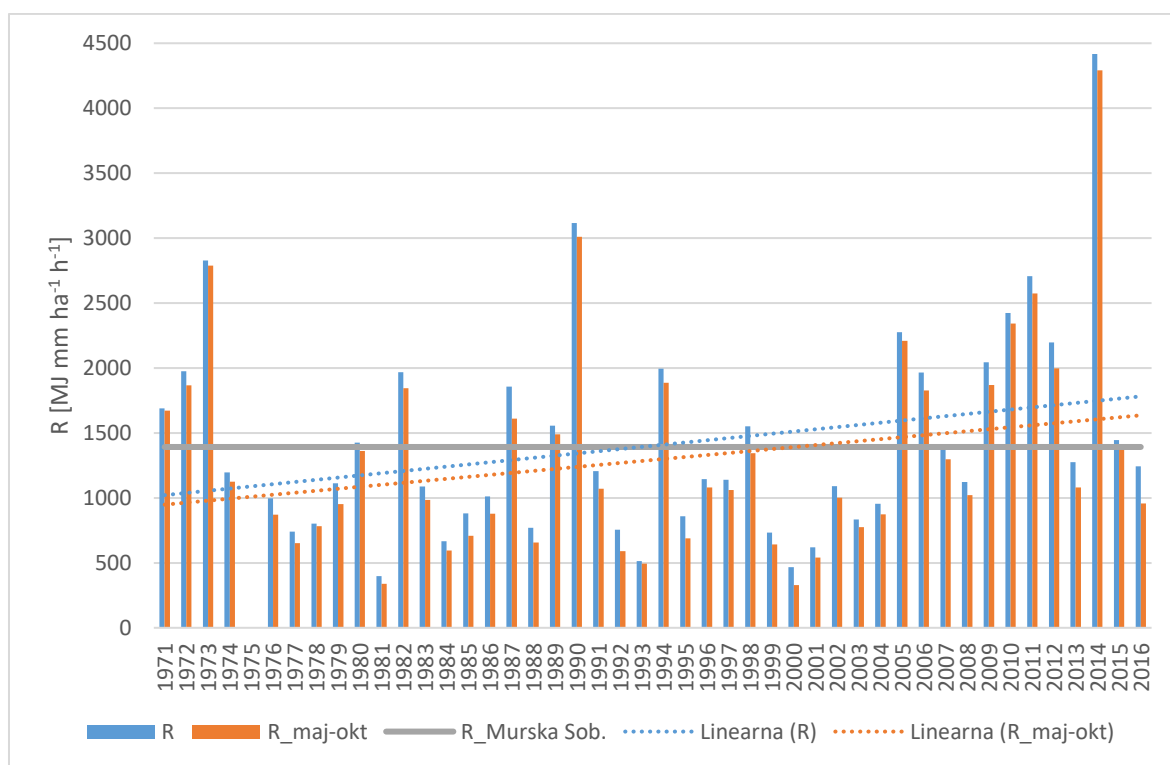
Od	Do	<i>U</i>	<i>U_{krit}</i>	Sklep
1977-1986	1987-1996	17	5	H ₀ zavrnemo; rezultati statistično značilni
1987-1996	1997-2006	17	5	H ₀ zavrnemo; rezultati statistično značilni
1997-2006	2007-2016	17	5	H ₀ zavrnemo; rezultati statistično značilni

4.8 Murska Sobota (187 m nmv)

4.8.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Postaja Murska Sobota ima med vsemi najnižjo povprečno vrednost erozivnosti padavin (slika 17). Nizka vrednost v tem primeru korelira tudi z majhno povprečno letno količino padavin (slika 18) in je tradicionalno značilna za severovzhodno Slovenijo (Petan, 2010; Dolinar in sod., 2014). Kljub temu je ekstremna vrednost v letu 2014 (grafikon 8) dokaj visoka; $R_{2014} = 4418 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $R_{2014_{\text{maj-okt}}} = 4291 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Najnižja celoletna vrednost R se pojavi leta 1981 ($399 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), najnižja polletna pa 2000 ($329 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$).

Standardna deviacija ima podobni vrednosti za oba dejavnika; $791 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (R) in $786,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ($R_{\text{maj-okt}}$), količnik med dejavnikoma pa znaša 0,90.



Grafikon 8: Vrednosti R za podatke med 1971 in 2016, Murska Sobota (izračunano z orodjem RIST)

4.8.2 Analiza trendov

Kljub nizkim vrednostim erozivnosti, je na postaji Murska Sobota opazen naraščajoč trend (grafikon 16). Dokaj visoke vrednosti koeficientov τ je izkazal tudi Mann-Kendall test trenda (preglednica 22), in sicer višjo ($\tau = 0,228$) za primer celoletne vrednosti R , kot za $R_{maj-okt}$ ($\tau = 0,172$). Trend naraščanja **je statistično značilen** v primeru celoletnih vrednosti R , sicer pa ne (ob upoštevanju stopnje značilnosti $\alpha = 0,05$).

Preglednica 22: Rezultati analize Mann-Kendall za Mursko Soboto, obdobje 1976-2016

	S	$var S$	Z	τ	$p - vrednost$
R	236	7926,7	2,6	0,288	0,008
$R_{maj-okt}$	178	11150,0	1,7	0,172	0,094

Preglednica 23 prikazuje analizo Mann-Whitney za postajo Murska Sobota. Vrednost statistike U je v vseh primerih večja od U_{krit} , torej lahko ničelno domnevo zavrnilo in s stopnjo zaupanja $\alpha = 0,05$ trdimo, da rezultati niso statistično značilni.

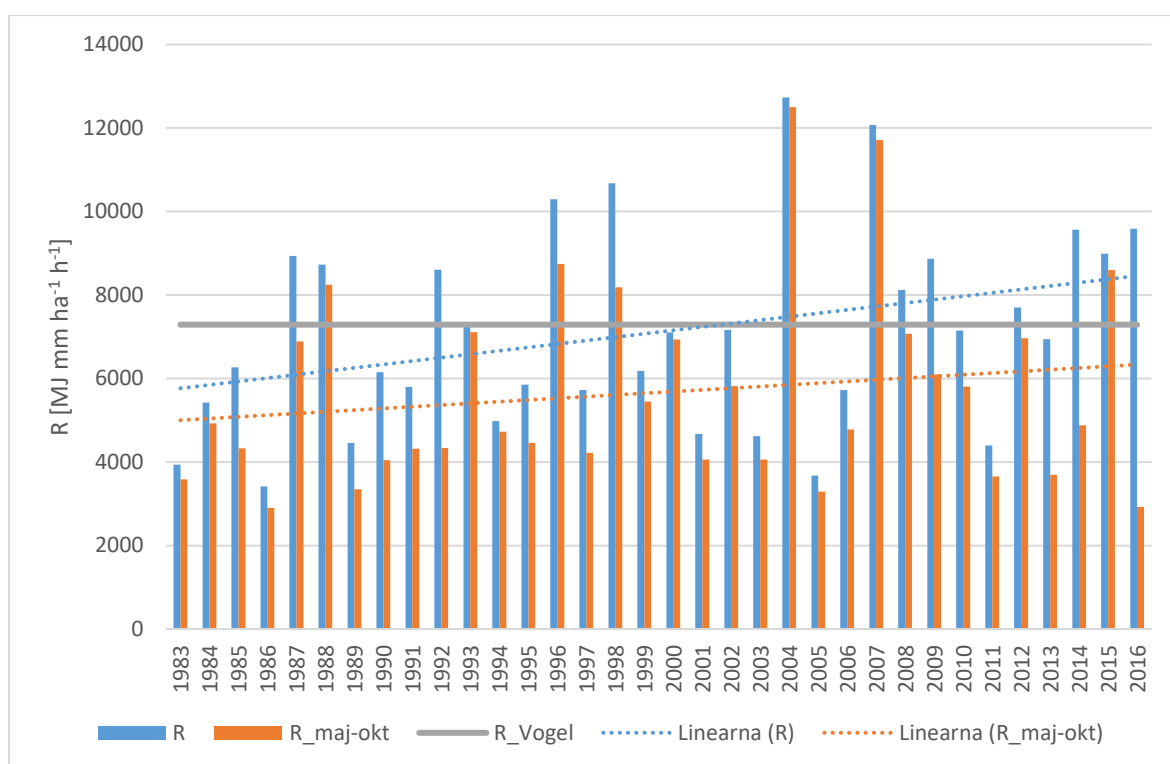
Preglednica 23: Rezultati analize Mann-Whitney za Mursko Soboto, obdobje 1977-2016

Od	Do	U	U_{krit}	Sklep
1977-1986	1987-1996	12	5	H_0 zavrnilo; rezultati statistično značilni
1987-1996	1997-2006	17	5	H_0 zavrnilo; rezultati statistično značilni
1997-2006	2007-2016	10	5	H_0 zavrnilo; rezultati statistično značilni

4.9 Vogel (1535 m nmv)

4.9.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Postaja Vogel se nahaja v območju, ki ga Panagos in sod. (2015a) štejejo med najbolj padavinsko erozivna v Evropi. Zato ne preseneča dejstvo, da so vrednosti erozivnosti tu najvišje med vsemi obravnavanimi lokacijami. Najbolj ekstremno leto je 2004, ko vrednost R doseže $12\,734\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}$, $R_{maj-okt}$ pa $12\,498\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}$. Minimum je v obeh primerih v letu 1986, še vedno z vrednostmi okoli $3000\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}$.



Grafikon 9: Vrednosti R za podatke med 1983 in 2016, Vogel (izračunano z orodjem RIST)

Standardna deviacija ima najvišje vrednosti med analiziranimi postajami; $2342,9\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}$ (R) in $2309,9\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}$ ($R_{maj-okt}$), medtem ko je količnik med dejavnikoma $R_{maj-okt}$ in R nižji kot pri ostalih analiziranih postajah; 0,79.

4.9.2 Analiza trendov

Za primer postaje Vogel, je močnejši pozitiven trend prisoten za celoletno vrednost R , pri kateri vrednost koeficienta τ znaša 0,237. Za polletno vrednost $R_{maj-okt}$ je trend ravno tako prisoten,

vendar v manjši meri ($\tau = 0,109$). V obeh primerih **ne gre za statistično značilen** trend (stopnja značilnosti $\alpha = 0,05$).

Preglednica 24: Rezultati analize Mann-Kendall za Vogel, obdobje 1983-2016

	<i>S</i>	<i>var S</i>	<i>Z</i>	τ	<i>p – vrednost</i>
<i>R</i>	133	4550,3	2	0,237	0,050
<i>R_{maj-okt}</i>	61	4550,3	0,9	0,109	0,374

Zaradi dolžine niza lahko v primeru podatkov s postaje Vogel, primerjamo 3 desetletna obdobja (preglednica 25); v obeh od teh primerov lahko ponovno zavrnemo ničelno domnevo in s stopnjo zaupanja $\alpha = 0,05$ trdimo, da rezultati niso statistično značilni.

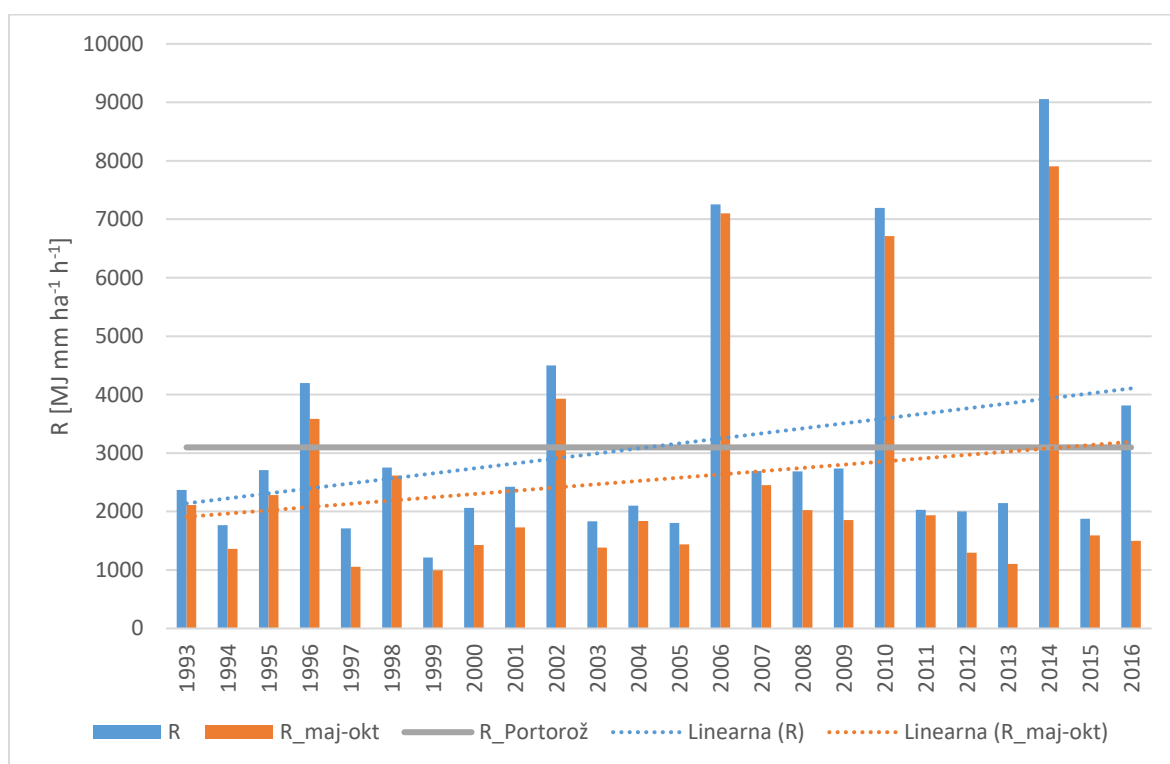
Preglednica 25: Rezultati analize Mann-Whitney za Vogel, obdobje 1987-2016

Od	Do	<i>U</i>	<i>U_{krit}</i>	Sklep
1987-1996	1997-2006	17	5	H ₀ zavrnemo; rezultati statistično značilni
1997-2006	2007-2016	15	5	H ₀ zavrnemo; rezultati statistično značilni

4.10 Portorož (2 m nmv)

4.10.1 Letne vrednosti dejavnika erozivnosti in trendi

Za rezultate izračuna erozivnosti postaje Portorož je značilna razmeroma visoka vrednost dejavnika R , poleg tega pa zaradi najkrajšega niza meritev med vsemi postajami v tem primeru tudi nimamo težav z izpadom zimskih meritev. Kot že pogosto v prejšnjih obravnavanih primerih, je najvišja vrednost erozivnosti v letu 2014; 9058 (R) oz. 7907 ($R_{maj-okt}$) $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$.



Grafikon 10: Vrednosti R za podatke med 1993 in 2016, Portorož (izračunano z orodjem RIST)

Standardna deviacija ima visoke vrednosti 1960,9 $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$ (R) in 1914 $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$ ($R_{maj-okt}$), medtem ko je količnik med dejavnikoma nižji kot pri ostalih analiziranih postajah (z izjemo Vogla) 0,79.

4.10.2 Analiza trendov

Postaja Portorož ima dokaj kratek niz meritev, a so slednje zaradi kasnejšega obdobja začetka spremljanja zimskih padavin, bolj zanesljive za celotno obdobje, kot pri ostalih. Za razliko od

nekaterih drugih primerov postaj tu v prvih letih meritev ne beležimo enakosti letnih vrednosti R in $R_{maj-okt}$ (preglednica 26), kar omogoča, da z večjo gotovostjo sprejmemo analizo trendov. Ta kaže na naraščajoč trend (preglednica 26), tako za R ($\tau = 0,029$) kot $R_{maj-okt}$ ($\tau = 0,026$), vendar sta si vrednosti koeficientov zelo blizu, ravno tako glede na ostale postaje dosegata nižje absolutne vrednosti. Trenda **nista statistično značilna** (z upoštevanjem stopnje značilnosti $\alpha = 0,05$).

Preglednica 26: Rezultati analize Mann-Kendall za Portorož, obdobje 1993-2016

	S	$var S$	Z	τ	$p - vrednost$
R	66	35611,3	0,3	0,029	0,731
$R_{maj-okt}$	60	35611,3	0,3	0,026	0,755

Portorož ima med vsemi postajami najkrajši niz podatkov. Primerjava obeh desetletnih obdobj s pomočjo Mann-Whitneyeve analize za ta primer kažejo vrednost statistike $U > U_{krit}$; ničelno domnevo lahko zavrremo. S Stopnjo zaupanja $\alpha = 0,05$ lahko trdimo, da rezultati niso statistično značilni.

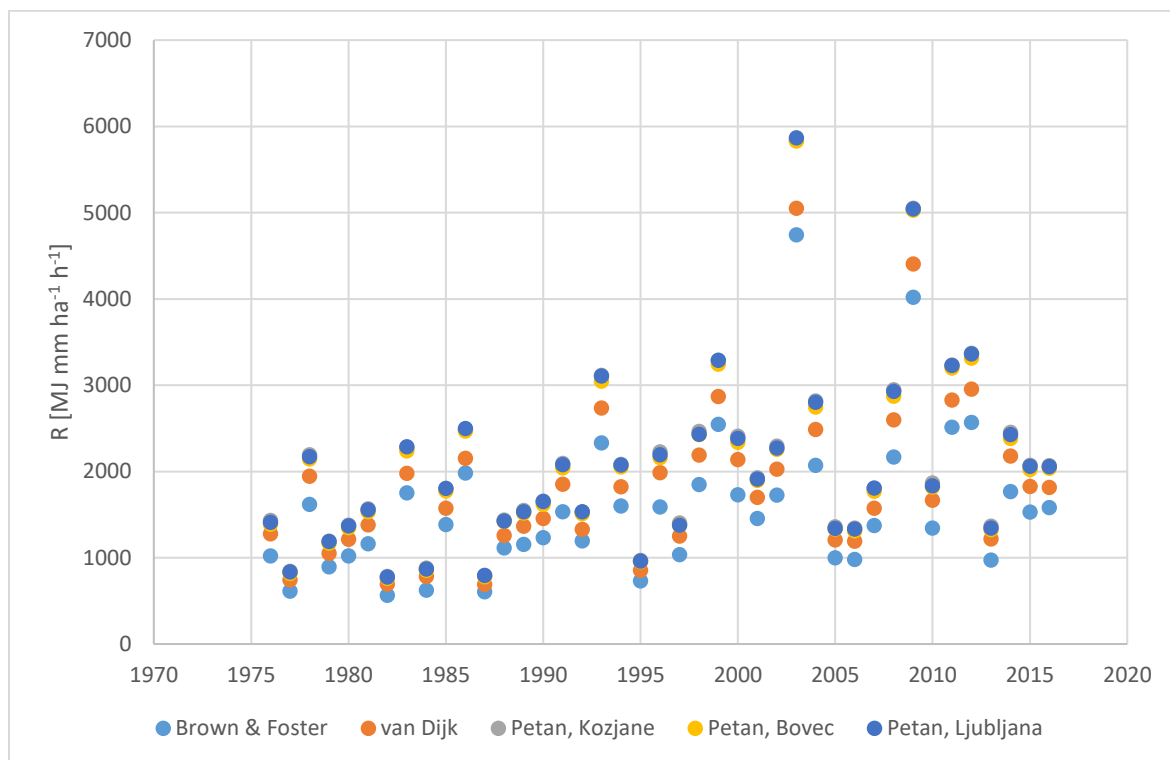
Preglednica 27: Rezultati analize Mann-Whitney za Portorož, obdobje 1997-2016

Od	Do	U	U_{krit}	Sklep
1997-2006	2007-2016	14	5	H_0 zavrremo; rezultati statistično značilni

5 ANALIZA REZULTATOV

5.1 Primerjava različnih enačb za oceno dejavnika erozivnosti R na primeru izbrane pluviografske postaje

Izračun dejavnika R z uporabo različnih enačb za oceno dejavnika erozivnosti padavin R (Brown & G. R Foster, 1987; van Dijk in sod., 2002; Petan, 2010) pokaže znatna odstopanja med različnimi pristopi (grafikon 11).



Grafikon 11: Primerjava letnih vrednosti dejavnika erozivnosti, izračunano po različnih enačbah za oceno kinetične energije za obdobje med 1976 in 2016, postaja Rateče

Največje vrednosti erozivnosti so dosežene z uporabo katerekoli Petanove enačbe (Bovec, Ljubljana in Kozjane). Odstopanja med njimi so na grafu komaj opazna, v splošnem pa največje vrednosti od treh daje enačba za Kozjane, sledi Ljubljana in nato Bovec.

Enačba van Dijk daje vrednosti med Petanovimi ter tistimi, izračunanimi s pomočjo enačbe Brown & Foster. Slednja konsistentno vrne najnižjo vrednost R za primer Rateč. Podobno so ugotovili že Mikoš in sod. (2006), in sicer, da enačba, ki jo priporoča RUSLE metodologija (Brown & Foster), podcenjuje vrednosti erozivnosti v gorskem podnebju Slovenije.

Absolutna odstopanja med različnimi metodami so večja v primeru let z višjimi vrednosti erozivnosti.

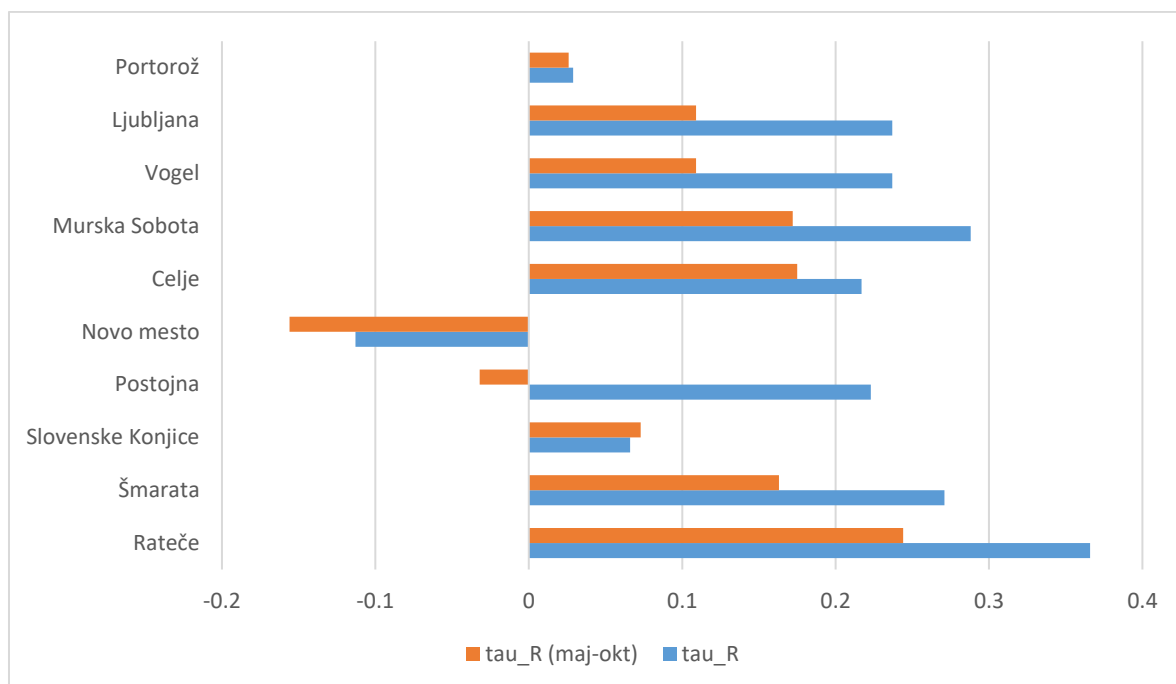
5.2 Analiza trendov za vse analizirane pluviografske postaje

Panagos et al. (2017) navajajo, da bodo v prihodnje največji vpliv na erozivnost padavin imele spremembe v padavinskih vzorcih v toplejšem obdobju leta (med aprilom in septembrom). V analizah je bil zato upoštevan dejavnik erozivnosti med majem in oktobrom, ki v povprečju predstavlja 86% celotne letne erozivnosti. Celoletni dejavnik erozivnosti je zaradi pomanjkanja podatkov v zimskem času v začetnih letih nekaterih meritev manj zanesljiv v analizi trendov, saj zaradi omenjenega razloga konsistentno kaže višje vrednosti (v novejših meritvah se zimske padavine ustrezno beležijo, kar pomeni tudi višjo vrednost izračunanega dejavnika R).

Analiza trendov za vse analizirane pluviografske postaje sicer kaže naraščajoči trend v vseh primerih, z izjemo postaje Novo mesto, ter polletnega dejavnika erozivnosti na postaji Postojna (slika 19). Novo mesto kaže izrazit padajoči trend z vrednostjo τ v obeh primerih nižje od -0,1. Trendi so statistično značilni s stopnjo značilnosti $\alpha = 0,05$ v primeru celoletnih vrednosti R na postajah Rateče, Postojna, Šmarata, Celje, Murska Sobota ter v primeru polletnih vrednosti $R_{maj-okt}$ na postaji Rateče.

V primeru večine postaj je trend močnejši za celoletne vrednosti (R), kar pa ne velja za postajo Slovenske Konjice – v tem primeru polletni dejavnik erozivnosti $R_{maj-okt}$ kaže močnejši trend naraščanja. $R_{maj-okt}$ kaže močnejši trend tudi za postajo Novo mesto, v tem primeru trend upadanja.

Trendi naraščanja so najbolj izraziti na postaji Rateče, Murska Sobota, Celje in Šmarata, najmanj pa v primeru Slovenskih Konjic, Ljubljane, Vogla in Portoroža. Postojna ima edinstveno sliko trenda, saj precej strmo narašča, vendar zgolj v primeru R .



Slika 19: Analiza po Mann-Kendallu za vse analizirane pluviografske postaje

Celotno analizo je treba umestiti v okvir dosedanjih študij. Rajczak in sod. (2013) so večino Slovenije uvrstili v južno-Alpsko regijo, za katero so s pomočjo več regionalnih in globalnih klimatskih modelov predvideli:

- zmanjšane srednje količine padavin in pogostosti deževnih dni v pomladnem in jesenskem času (po nekaterih modelih);
- povečano intenziteto padavin v zimskem času;
- znatno zmanjšanje srednje količine padavin (stopnja zmanjšanja sicer odvisna od modela, vendar večinoma kaže drastične spremembe, do -30% in celo -50% v obdobju 2070-2099 v primerjavi z 1970-1999) in pogostosti deževnih dni v poletnih mesecih.

Medtem, ko so Panagos in sod. (2015a) predvideli zmanjšanje dejavnika R v prihodnjih desetletjih za območje Slovenije. Z izjemo ene postaje je glede na dosedanje trende to zmanjšanje manj verjetno.

Mann-Whitneyev test smo izvedli za desetletna obdobja, ter povprečne vrednosti šestih mesecev (od maja do oktobra), ki prispevajo večji del vrednosti dejavnika R , primerjali med različnimi obdobji ter za vsako posamezno postajo. Rezultati, prikazani v preglednicah pri posameznih analiziranih postajah, dajejo dokaj enolično sliko; ničelno domnevo smo namreč v vseh primerih zavrnili s stopnjo značilnosti $\alpha = 0,05$.

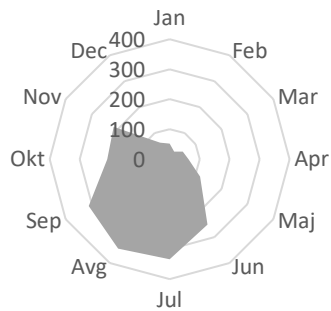
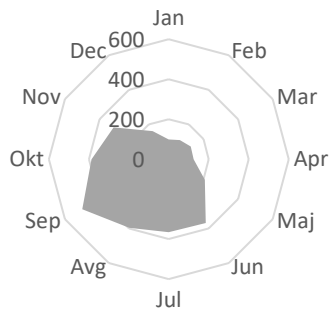
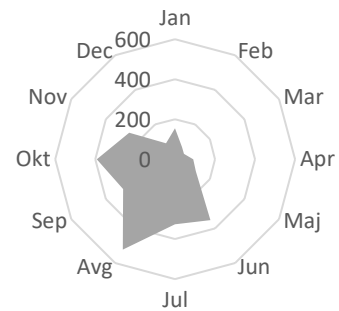
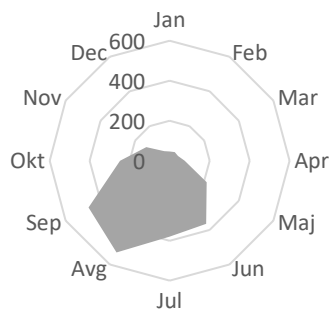
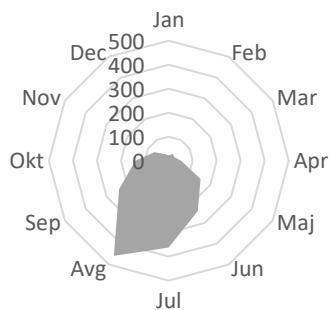
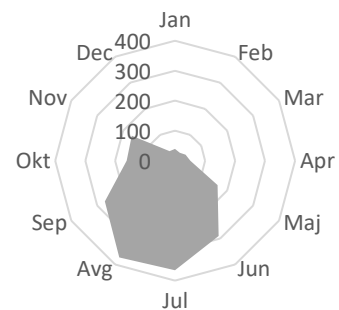
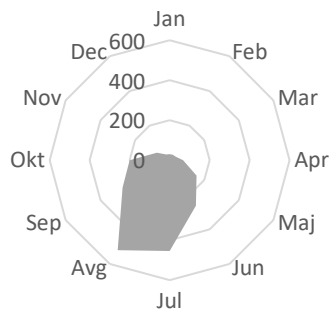
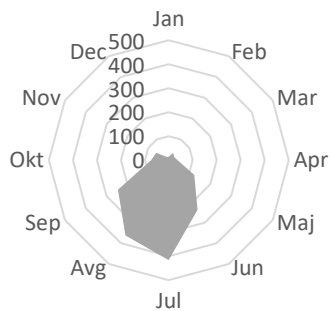
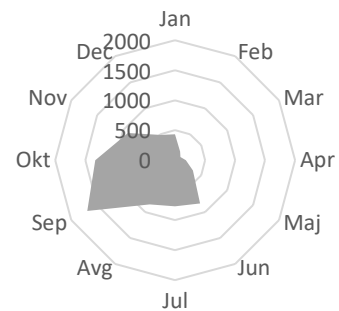
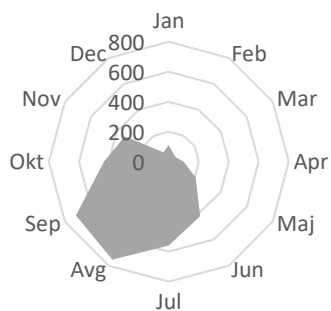
5.3 Analiza sezonskosti

Medtem, ko smo sezonskost dejavnika erozivnosti R že omenjali v sklopu posameznih pluviografskih postaj, velja tematiko celovito pogledati še sistematično. *Slika 20* zajema sezonske grafe vseh analiziranih pluviografskih postaj; vrednosti dejavnika erozivnosti R so prikazane na krožnici, ki ponazarja koledarsko leto. Oblika zapolnjenega poligona torej prikazuje sezonskost dejavnika.

Med postajami lahko že na prvi pogled ločimo različne oblike; Šmarata ima višek erozivnosti v avgustu, poleg tega pa ima dva znatna viška tudi v juniju in oktobru, ki dajeta grafu sezonskosti zvezdasto obliko. Precej zapolnjene oblike (kar nakazuje zvezno naraščanje in upadanje) imajo Rateče, Postojna, Celje in Ljubljana, medtem ko imajo Novo mesto, Murska Sobota in Slovenske Konjice izrazit en višek. Postaja Portorož se nahaja nekje na sredini med omenjenimi oblikami.

V avgustu največ analiziranih pluviografskih postaj doseže svoje najvišje vrednosti erozivnosti; Rateče, Šmarata, Ljubljana, Novo mesto, Celje, Slovenske Konjice in Portorož. Murska Sobota – najvzhodnejša postaja in obenem tista z najmanjšo količino padavin (in dejavnikom erozivnosti) ima višek erozivnosti v juniju, kar je najzgodneje v letu med analiziranimi postajami.

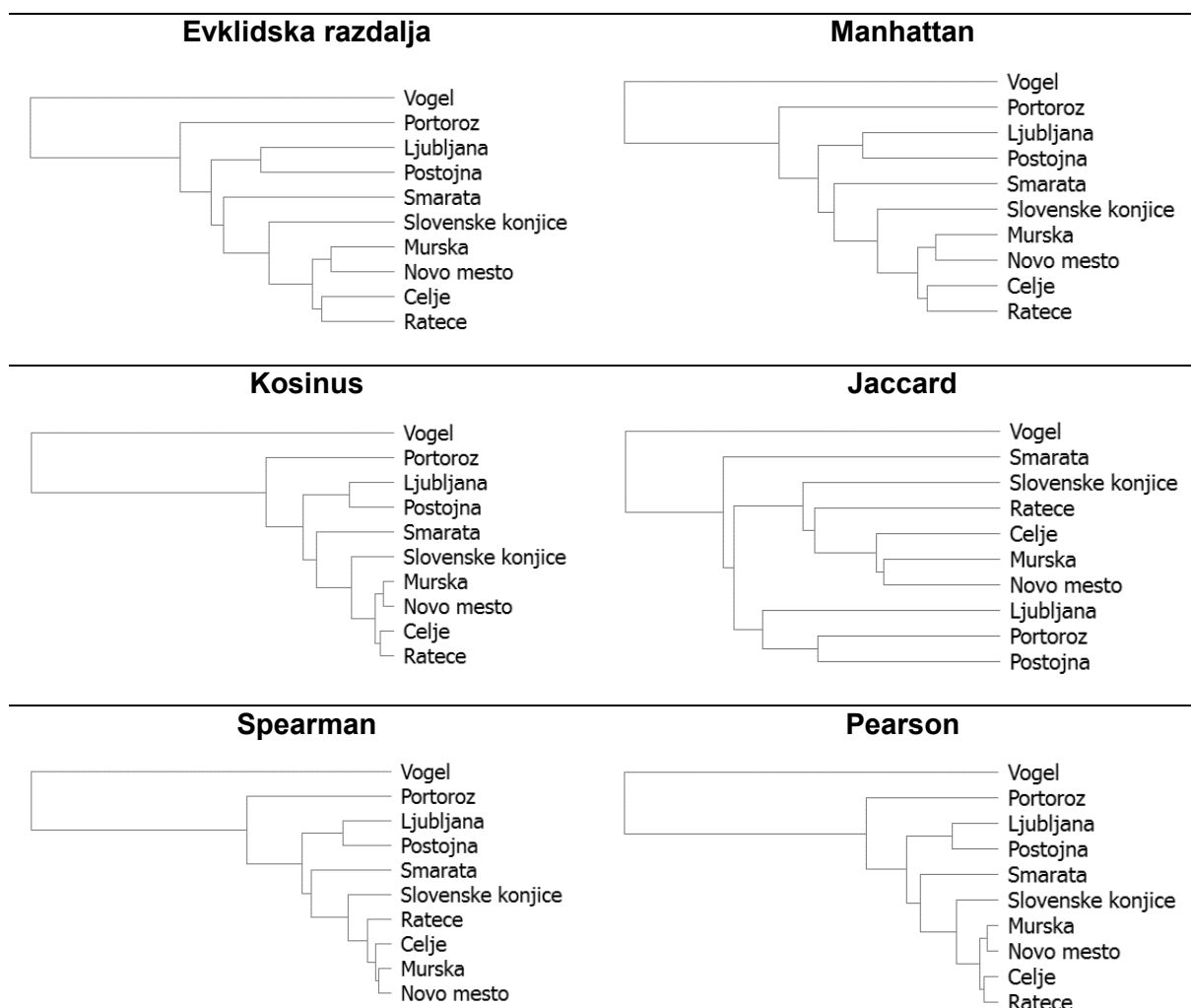
Zanimiv režim erozivnosti padavin ima Vogel, ki je precej pod vplivom visokogorja – višek doseže v septembru, precej visoke vrednosti pa kaže tudi junija. Največje vrednosti v septembru doseže tudi postaja Postojna, ki pa se od prej omenjenega Vogla precej razlikuje po obliki.

Rateče**Postojna****Šmarata****Ljubljana****Novo mesto****Celje****Slovenske Konjice****Murska Sobota****Vogel****Portorož**

Slika 20: Grafi sezonskosti dejavnika erozivnosti padavin za analizirane pluviografske postaje v Sloveniji

Analizo grafov smo s pomočjo rudarjenja po podatkih in analize slik izvedli s programom Orange. Uporabljene slike so imele enotno merilo (za razliko od prikazanih, slika 20), ki omogoča iskanje podobnosti med postajami. Zgrajeni dendogrami, ki povezujejo podobne oblike v drevo, prikazuje slika 21. Glede na uporabljen tehniko določanja razdalj (evklidska razdalja, Manhattan, Kosinus, Jaccard, Spearman, Pearson) se razdalje med vejami dendograma rahlo razlikujejo. Kljub temu vse dendograme znotraj strukture lahko razdelimo na 3 glavne skupine postaj, pri čemer z izjemo metode Jaccard pri vseh dobimo enako razvrščene postaje, ki se skoraj v celoti skladajo z razvrstitvijo v podnebne tipe (z izjemo postaje Rateče - poglavje 3.2) in sicer:

- skupina 1: Vogel
- skupina 2: Portorož
- skupina 3: Ljubljana, Postojna, Šmarata, Slovenske Konjice, Murska Sobota, Novo mesto, Celje, Rateče



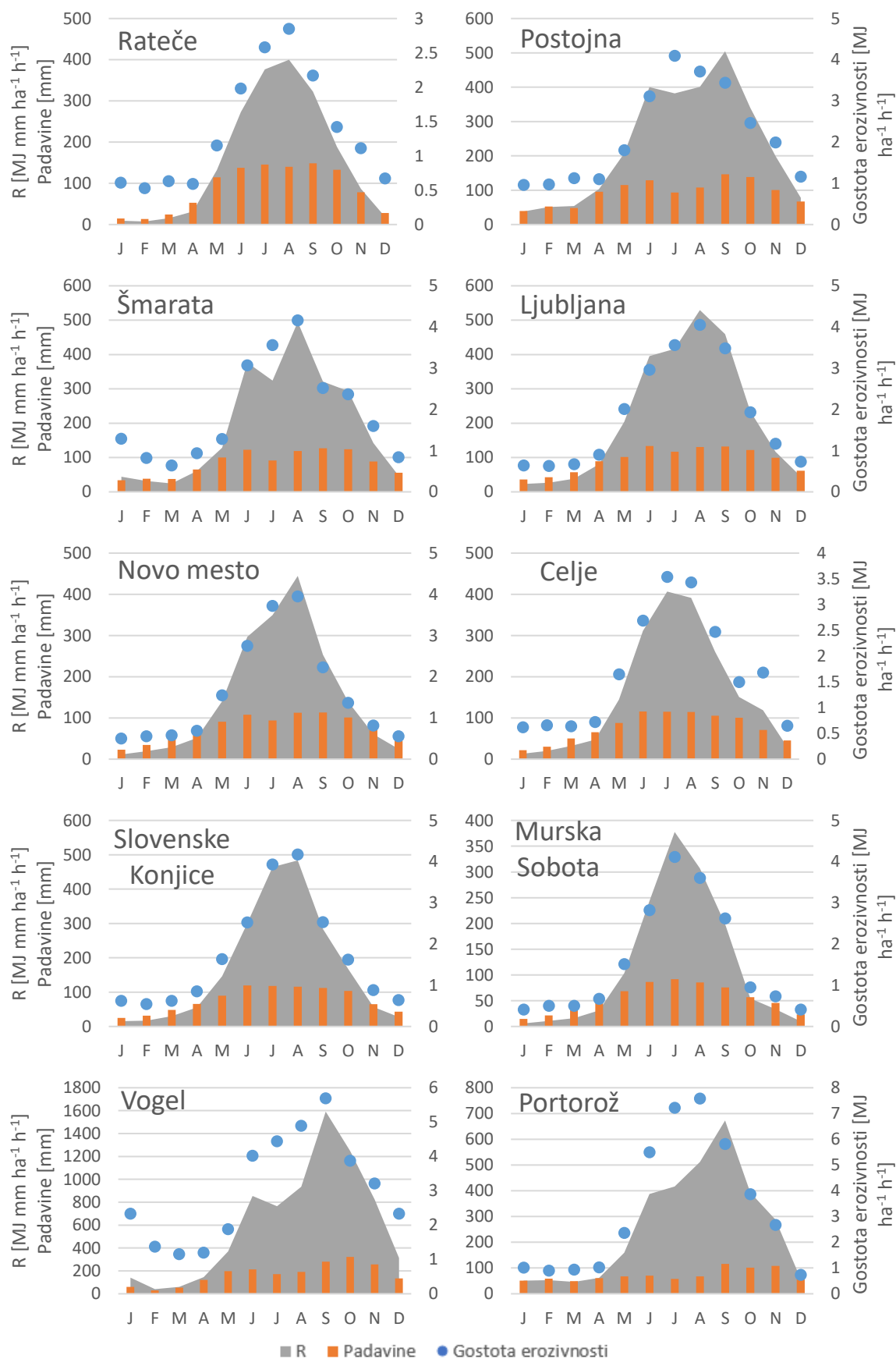
Slika 21: Dendogrami različnih tehnik računanja razdalj na osnovi atributov slik razporeditve dejavnika erozivnosti tekom leta

5.4 Analiza erozivnih dogodkov

S pomočjo količnika med polletno vrednostjo dejavnika erozivnosti $R_{maj-okt}$ in njegovo letno vrednostjo R je že bilo ugotovljeno (individualna analiza za pluviografske postaje v poglavjih od 4.1 do 4.10), da se večina erozivnih dogodkov nastopi med majem in oktobrom. Kljub temu si velja nihanja vrednosti znotraj leta posebej ogledati. Spreminjanje padavin, dejavnika erozivnosti R in gostote erozivnosti za posamezno postajo prikazuje slika 22. Za vse postaje so bile za izračun uporabljeni celotni nizi podatkov, uporabljena pa Brown & Foster enačba ter programsko orodje RIST. Padavine so ponazorjene s stolpčnim diagramom, siva območja predstavljajo dejavnik erozivnosti R , točke pa ponazarjajo vrednost gostote erozivnosti (sekundarna ordinatna os).

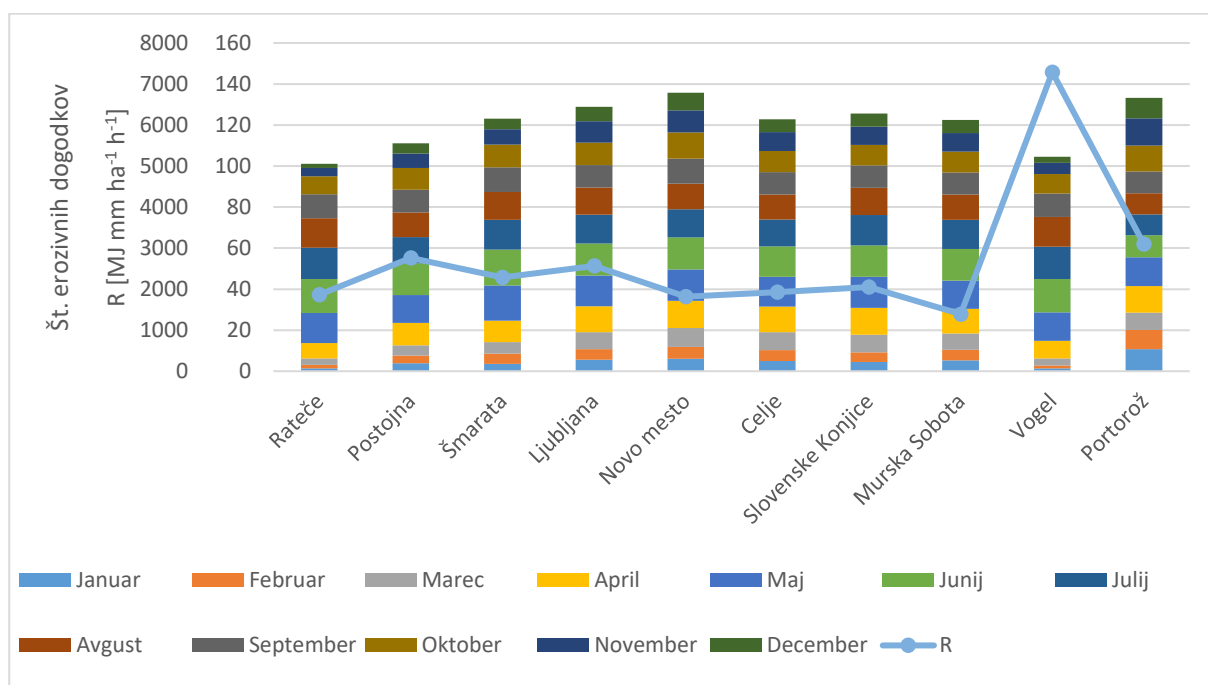
Znotraj koledarskega leta prihaja do znatnih razlik v vrednosti erozivnosti in gostote erozivnosti. Medtem, ko ima večina postaj zvonasto obliko grafa dejavnika erozivnosti R z enim viškom (Rateče, Ljubljana, Novo mesto, Celje, Slovenske Konjice, Murska Sobota), pa druge postaje izkazujejo bolj razgibano naravo letne porazdelitve erozivnosti (Postojna, Šmarata, Vogel in Portorož). Oblika grafa erozivnosti načeloma sledi konturam količine padavin po mesecih.

Graf gostote erozivnosti (točke, slika 22) se obnaša različno v odvisnosti od postaje. Konturi grafa erozivnosti sledi v primeru postaj Rateče, Ljubljana, Novo mesto, Slovenske Konjice, Celje in Murska Sobota, medtem ko odstopanja kaže v primeru Postojne in Šmarate, precej pa za Vogel in Portorož. Slednji dve sta tudi postaji z najvišjo izračunano vrednostjo dejavnika R , obe z viškom v septembru.



Slika 22: Povprečne vrednosti dejavnika R, gostote erozivnosti in količine padavin po mesecih za analizirane pluviografske postaje v Sloveniji in njihova celotna analizirana obdobja (enačba Brown & Foster, izračunano s pomočjo RIST)

Poleg mesečne razporeditve padavin, dejavnika erozivnosti padavin in gostote erozivnosti, nas zanima tudi število erozivnih dogodkov na posameznih postajah ter vpliv tega števila na izračunano vrednost erozivnosti (grafikon 12). Na letni ravni skupna količina erozivnih padavinskih dogodkov nima večjega vpliva na vrednost dejavnika erozivnosti, R ; postaja Vogel, ki ima najvišjo izračunano vrednost dejavnika R ima namreč manj erozivnih padavinskih dogodkov, kot večina ostalih (manj jih ima le še postaja Rateče; preglednica 28). Največ erozivnih dogodkov na letni ravni (136) ima postaja Novo mesto, ki ima edina izrazit negativen trend dejavnika erozivnosti (poglavje 4.5). Precej visoko letno število erozivnih dogodkov (133) ima še postaja Portorož, ki v splošnem izkazuje tudi precej visoko vrednost dejavnika erozivnosti (poglavje 4.10)



Grafikon 12: Povprečno število erozivnih padavinskih dogodkov po mesecih in v letu ter izračunana vrednost dejavnika erozivnosti za postaje

Preglednica 28: Srednja vrednost količine erozivnih padavinskih dogodkov v letu za posamezne postaje

	Rateče	Postojna	Šmarata	Ljubljana	Novo mesto	Celje	Slovenske Konjice	Murska Sobota	Vogel	Portorož
Povprečno število erozivnih dogodkov v letu	101	111	123	129	136	123	126	123	105	133

5.5 Analiza občutljivosti

Analizo občutljivosti smo izvedli s petimi parametri, opisanimi v poglavju 3.4. Uporabili smo standardiziran regresijski koeficient (SRK) ter normaliziran kazalnik občutljivosti (NKO). Normaliziran kazalnik občutljivosti (NKO) se je izkazal kot primerno orodje v sorodnih študijah (Bezak in sod., 2015), medtem ko standardiziran regresijski koeficient (SRK) služi kot učinkovito orodje pri odkrivanju linearne odvisnosti vhodnih in izhodnih parametrov.

5.5.1 Standardiziran regresijski koeficient

Vrednosti SRK so razmeroma visoke za vse parametre in postaje, kar kaže na visoko občutljivost dejavnika erozivnosti na spreminjanje vhodnih parametrov.

Z večanjem časovnega intervala (parameter t), ki ločuje padavinska dogodka (RUSLE priporoča 6 ur), se viša tudi vrednost dejavnika erozivnosti R . Vrednosti SRK analize so v tem primeru visoke, najvišja vrednost je značilna za postajo Portorož (0,990), najnižja pa za postajo Rateče (0,972). Precej nizka je tudi za postajo Vogel, ki je bila, kot Rateče, izračunana s pomočjo enačbe Petan – Bovec. Za postajo Portorož smo uporabili enačbo Petan – Kozjane. V splošnem podaljševanje časa med dvema dogodkoma povečuje tudi vrednost erozivnosti padavin.

Parameter p predstavlja vpliv količinskega kriterija na ločitev padavinskih dogodkov; po metodologiji RUSLE smo upoštevali kriterij 6 ur, količino pa spreminjali. Očitno pa je, da večanje tega parametra pomeni manjšanje erozivnosti R . Razlog za to je v manjšem številu erozivnih dogodkov. Najmanj parameter p vpliva na postaji Vogel in Novo mesto, najbolj pa na postajo Murska Sobota – ta ima tudi najmanjšo količino srednjih letnih padavin.

Z višanjem dejavnika k , ki označuje različne mejne vrednosti za upoštevanje padavinskega dogodka v računu erozivnosti R , se vrednost erozivnosti manjša z višanjem njegove vrednosti - po RUSLE metodologiji je vrednost, ki dogodek uvrsti med erozivne, enaka $k = 12,7$ mm padavin. Ponovno gre pri tem za združevanje padavinskih dogodkov ter njihovo posledično manjše število, ki vpliva na končno erozivnost R .

Dejavnik / zajame časovno dimenzijo upoštevanja erozijskih dogodkov; dogodek upoštevamo, če v določenem času pade vsaj 6,2 mm padavin. Osnovna vrednost po RUSLE metodologiji znaša 15 min, očitno pa je, da daljši čas sorazmerno vpliva na vrednost erozivnosti R . Vpliv je

najmanjši na postaji Portorož (enačba Petan Kozjane), največji pa na postaji Rateče (enačba Petan Bovec).

Podoben kriterij zajame tudi parameter c , le da v 15 minutah analiziramo vpliv količine padlih padavin na upoštevanje erozivnih dogodkov. Višanje parametra pomeni nižjo erozivnost R , saj tudi v tem primeru zajamemo manj padavinskih dogodkov.

Preglednica 29: Rezultati analize občutljivosti s SRK

	t	p	k	l	c
Rateče	0,972	-0,978	-0,992	0,980	-0,892
Postojna	0,985	-0,971	-0,991	0,921	-0,912
Šmarata	0,982	-0,983	-0,992	0,871	-0,903
Novo mesto	0,990	-0,966	-0,991	0,978	-0,900
Celje	0,981	-0,965	-0,992	0,885	-0,920
Slovenske Konjice	0,989	-0,977	-0,992	0,899	-0,903
Murska Sobota	0,993	-0,985	-0,993	0,946	-0,909
Vogel	0,975	-0,966	-0,992	0,949	-0,908
Portorož	0,990	-0,975	-0,992	0,867	-0,918

5.5.2 Normaliziran kazalnik občutljivosti

NKO ovrednoti občutljivost izbranega vhodnega parametra na izhodno vrednost modela. Vhodni parametri in njihove vrednosti so opisani v poglavju 3.4, rezultati analize pa so predstavljeni v nadaljevanju (preglednica 30 in preglednica 31).

V prvem primeru (preglednica 30) smo analizirali občutljivost posameznih vhodnih parametrov in spreminjanja njihovih vrednosti na izhodne vrednosti erozivnosti padavin (R). Vrednosti so v preglednici obarvane s temnejšo barvo, v kolikor gre za višjo občutljivost (vrednost normaliziranega kazalnika občutljivosti). $P_1, P_2, \dots, P_5$ predstavljajo različne vrednosti posameznega vhodnega parametra (t, k, p, l, c). Iz rezultatov je razvidno, da se občutljivost večja sorazmerno z višanjem vrednosti P_i v primeru parametra k , medtem ko NKO v splošnem za vse ostale parametre niža, v kolikor se viša vrednost P_i .

Najvišje vrednosti normaliziranega kazalnika občutljivosti kažeta parametra t in k ; torej vpliv časovnega intervala na ločitve dogodkov (t) in kriterij ločitve dveh padavinskih dogodkov na podlagi količine padavin (k).

Kljub splošnemu trendu naraščanja oz. padanja vrednosti NKO v odvisnosti od višje vrednosti parametrov P_i , pa se pri dejavnikih t , k , l pojavi vmesni višek vrednosti NKO pri P_3 . Pri vseh dejavnikih je P_3 po vrednosti najbližje osnovnemu parametru P_m ; P_3 je večji od P_m v primerih dejavnikov t , l in c , manjši pa za p in k .

Preglednica 30: Rezultati analize občutljivosti z NKO za posamezne parametre – temnejši odtenek kaže na večjo občutljivost

Parameter	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
t	0,108	0,086	0,095	0,078	0,072
k	0,077	0,096	0,117	0,112	0,105
p	0,090	0,063	0,049	0,032	0,031
l	0,025	0,031	0,056	0,031	0,023
c	0,069	0,067	0,024	0,012	0,008

Preglednica 31: Rezultati analize občutljivosti z NKO za različne postaje in parametre – temnejši odtenek kaže na višjo občutljivost

	t	p	k	l	c
Rateče	0,037	0,050	0,099	0,090	0,043
Postojna	0,110	0,058	0,081	0,012	0,022
Šmarata	0,097	0,057	0,087	0,010	0,023
Ljubljana Bežigrad	0,089	0,065	0,106	0,119	0,067
Novo mesto	0,105	0,062	0,140	0,020	0,038
Celje	0,083	0,053	0,120	0,014	0,036
Slovenske Konjice	0,103	0,055	0,123	0,017	0,036
Murska Sobota	0,093	0,055	0,156	0,022	0,051
Vogel	0,068	0,030	0,030	0,021	0,019
Portorož	0,094	0,049	0,073	0,007	0,027

Analizo in primerjavo normaliziranega kazalnika občutljivosti za različne postaje prikazuje preglednica 31. V splošnem lahko opazimo podobno obnašanje kazalnikov na vseh

pluviografskih postajah, z manjšimi odstopanji. Postaji Rateče in Ljubljana tako kažeta višje vrednosti v primeru dejavnikov I in c , medtem ko Portorož izkazuje najnižjo vrednost za dejavnik I (izračunano s pomočjo Petanove enačbe za Kozjane), Vogel pa za vse dejavnike kaže nizko vrednost občutljivosti (gre za postajo z daleč najvišjo vrednostjo erozivnosti). Murska Sobota (postaja z najnižjo vrednostjo erozivnosti) ima najvišjo vrednost dejavnika k ; torej dejavnik vpliva količine padavin na obravnavo dogodkov. Majhna količina padavin torej vpliva na večjo vrednost občutljivosti, kar predstavlja predvsem dejavnik k .

Najvišje vrednosti NKO med dejavniki dosežeta t in k (povprečno 0,1) – časovni in količinski ločitveni kriterij, najnižje vrednosti pa ima dejavnik I (*»vpliv časovnega kriterija na izbiro erozivnih dogodkov, kjer v P_t minutah pade vsaj 6,2 mm padavin«* (poglavje 3.4.2); povprečno 0,03). Za kazalnike postaje sledijo podobnim trajektorijam, odstopajo le postaje Vogel (nižje vrednosti v vseh primerih) ter Rateče in Ljubljana (odstopanje pri vrednostih dejavnikov I in c).

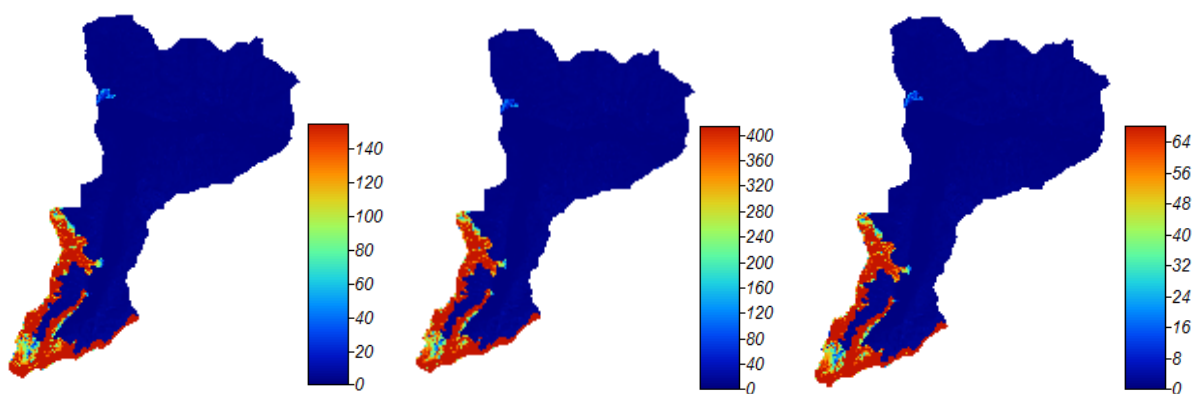
5.6 RUSLE in porečje Save Dolinke do Kranjske gore

5.6.1 Potencialna izguba tal v odvisnosti od izračuna dejavnika R po različnih enačbah za kinetično energijo dežja

V vrednotenju vpliva dejavnika erozivnosti padavin in površinskega odtoka R na skupno vrednost potencialne izgube tal A , smo celotnemu analiziranemu porečju pripisali vrednosti dejavnika R , izračunanega po različnih enačbah za postajo Rateče, ki se nahaja na porečju Sava – Kranjska Gora (1111) do vodomerne postaje Kranjska Gora. Uporabili smo enačbe Brown & Foster (povprečno, minimalno in maksimalno vrednost za obravnavano obdobje), Petan (Bovec, Kozjane in Ljubljana) ter van Dijk. Vrednosti sproščenega materiala so največje pri uporabi maksimalne vrednosti R za postajo Rateče, najmanjše pa pri uporabi minimalne (slika 23). Podobne vrednosti med seboj dosegajo vse tri Petanove enačbe (Kozjane z najvišjo in Bovec z najnižjo vrednostjo) ter Brown & Foster (osnovna vrednost) in van Dijk, ki najbolj podceni vrednost erozijskega sproščanja tal ob upoštevanju vrednosti erozivnosti za celotno obdobje podatkov (preglednica 32).

Preglednica 32: Rezultati RUSLE enačbe za različne vrednosti dejavnika R.

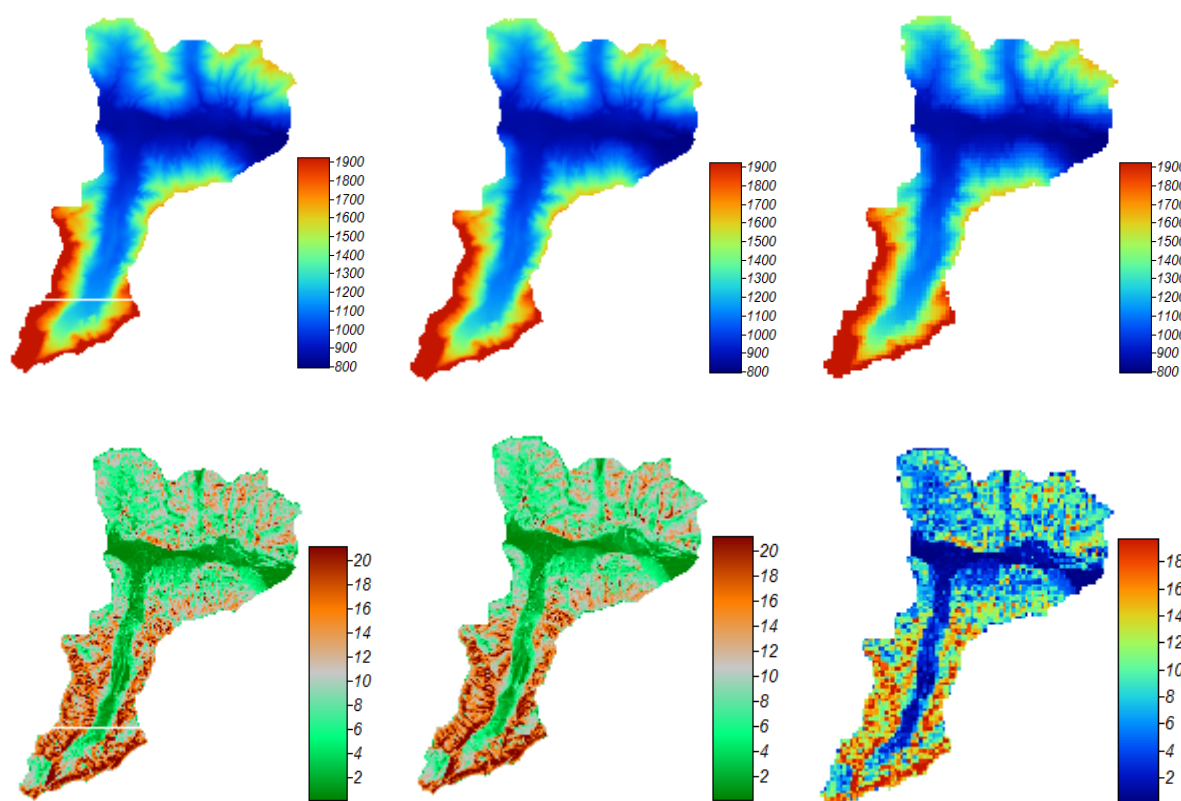
	Potencialna letna izguba tal A (t/ha/leto)	Količina sproščenega materiala v letu m (t)	Dejavnik erozivnosti padavin R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)
Brown & Foster - osnovna vrednost	22,774	98780,7	1861,2
Brown & Foster - minimalna vrednost	10,019	43456,7	818,8
Brown & Foster - maksimalna vrednost	60,777	263611,5	4966,9
Petan Bovec	27,917	121087,5	2281,5
Petan Kozjane	28,451	123401,5	2325,1
Petan Ljubljana	28,285	122685,0	2311,6
van Dijk	22,496	97575,9	1838,5



Slika 23: Grafični prikaz potencialne izgube tal v porečju Save Dolinke, izračunane s pomočjo enačbe Brown & Foster za oceno dejavnika erozivnosti padavin R; osnovna, maksimalna in minimalna vrednost (od leve proti desni) v t/ha/leto.

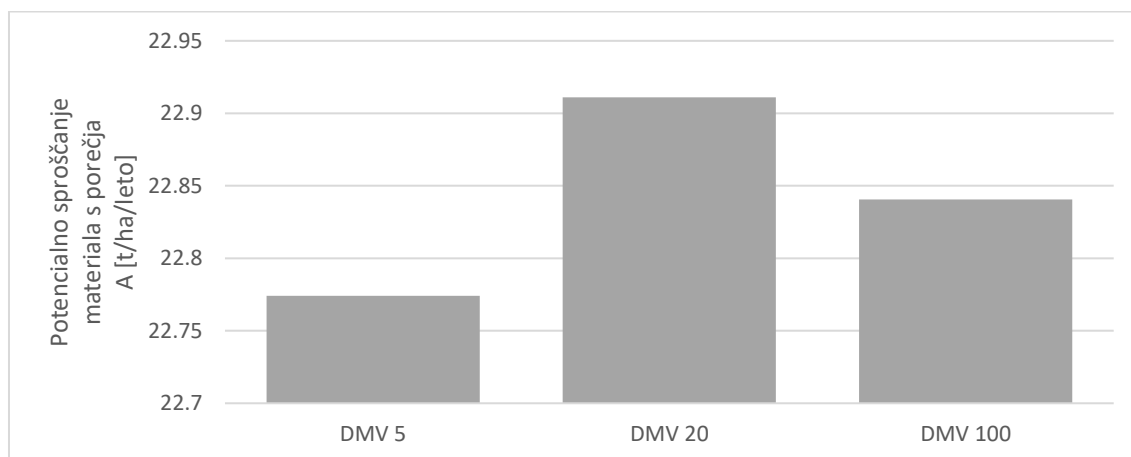
5.6.2 Vpliv spremembe velikosti celice DMV

Velikost celice digitalnega modela višin posledično vpliva na preračun dejavnika topografije LS v orodju SAGA GIS. Posebno v goratem območju je velikost celice digitalnega modela višin bistvenega pomena, saj se nadmorska višina tam na kratkih razdaljah lahko znatno spremeni. Dejavnik so Panagos in sod. (2015c) identificirali kot največji vpliv na skupni izračun potencialne letne izgube tal. Grafično primerjavo med različnimi velikostmi celice DMV predstavlja slika 24.



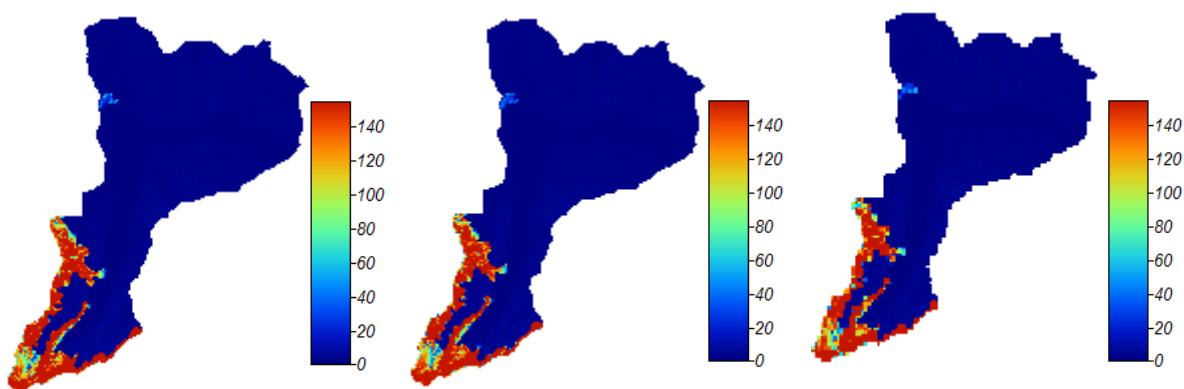
Slika 24: Digitalni modeli višin z velikostjo celice 5, 20 in 100 m (zgoraj, po vrsti z leve) ter pripadajoči izračuni dejavnika LS, porečje Sava - Kranjska Gora (1111).

Ob spremembi velikosti celice DMV torej prihaja do vidnih odstopanj med različnimi produkti modela. Zanimiva je tendenca spremembe srednje vrednosti LS dejavnika v odvisnosti od DMV; najnižjo srednjo vrednost ima $LS_{DMV\ 100}$; 8,50, sledi $LS_{DMV\ 5}$ s 8,56, znatno višjo vrednost pa doseže $LS_{DMV\ 20}$ – in sicer 9,15. Vse to vpliva tudi na končni izračun potencialne letne izgube tal (grafikon 13).



Grafikon 13: Primerjava ocen letnih količin izgube tal A (v t/ha/leto) z uporabo različnih velikosti celice digitalnega modela višin

Sprememba celice DMV torej nima linearne vpliva na končni izračun izgube tal, ima pa znaten vpliv. Čeprav DMV 100 bolj zaobli pobočja, kot DMV 20, slednji predvidi višjo oceno izgube tal. Pri tem gre verjetno za edinstveno interakcijo visokogorja in nižinskih delov, ki omogočijo oceno izgube tal, kot jo prikazuje grafikon 13. Z večjo velikostjo celice lahko rezultat precenimo za 5951 ton na nivoju porečja. Gledano na celotno porečje smo namreč izračunali letno izgubo tal 990770 ton v primeru DMV 5, 996721 ton ob uporabi DMV 20 ter 993655 ton z uporabo DMV 100.

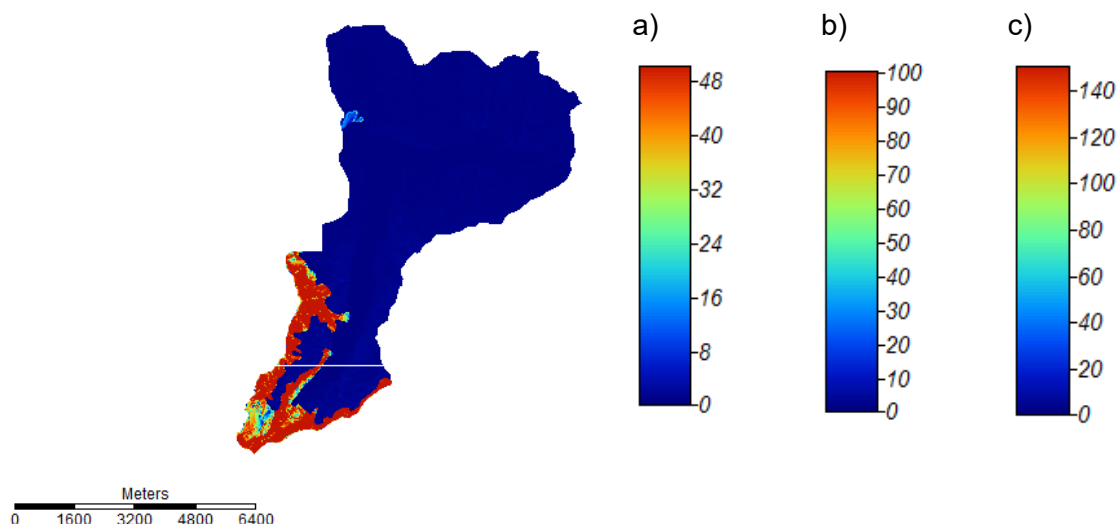


Slika 25: Izračun potencialne izgube tal A (t/ha.leto) v porečju Save Dolinkse nad Kranjsko goro, ocenjen s pomočjo različne velikosti celice DMV; DMV5, DMV20, DMV100 (z leve proti desni)

Na obravnavanem območju prihaja do večjih razgibanosti terena (slika 24, zgoraj), saj se nadmorska višina terena giblje med 791 in 2616 metri nadmorske višine, skladno s podatki DMV5. Slednje se odraža tudi v precej pestrem razponu vrednosti izgube tal (slika 25).

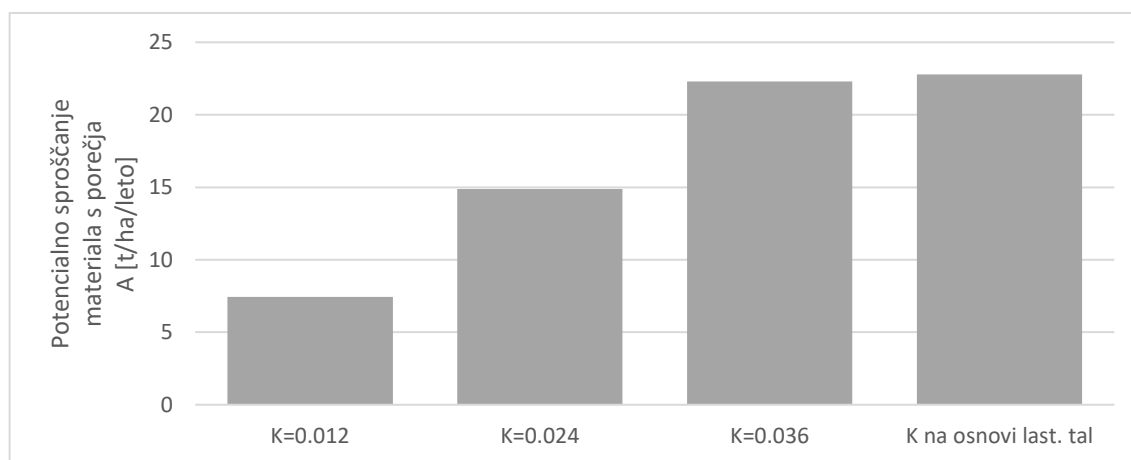
5.6.3 Vpliv dejavnika erodibilnosti tal (K)

Dejavnik erodibilnosti tal je praviloma določen na podlagi pedoloških profilov, saj je neposredno odvisen od velikosti zrn zemljine. Ker nas je zanimal vpliv spremembe dejavnika K na vrednost erozije, smo tega ročno spreminjali (slika 26). Dejavnik K ima na obravnavanem območju precej nizko vrednost, kar kaže na dokaj neprepustno kamninsko podlago.



Slika 26: Vpliv spremembe vrednosti dejavnika K na erozijo tal (a - $K=0,012$, b - $K=0,024$, c - $K=0,036$)

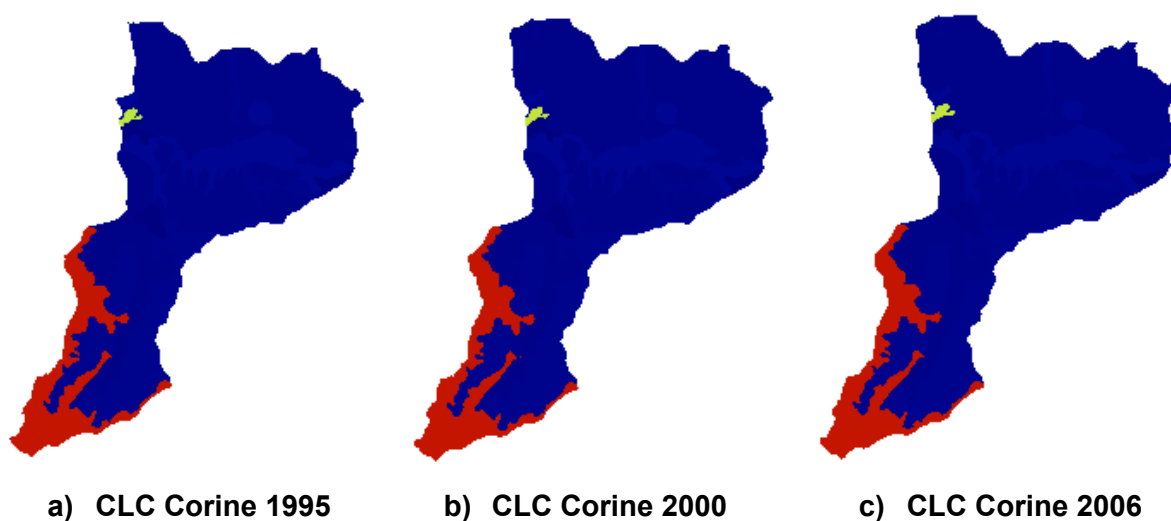
Rezultati kažejo, da z upoštevanjem najnižje vrednosti K (0,012) v grobem trikrat podcenimo vrednost potencialne izgube tal, ki je bila izračunana s pomočjo pedoloških profilov. Najbolj se ji približa poenotena vrednost 0,036 za celotno obravnavano območje (grafikon 14).



Grafikon 14: Primerjava letnih količin izgub tal A (v t/ha/leto) za porečje Save Dolinke nad Kranjsko goro, ocenjenih z uporabo različnih vrednosti dejavnika erodibilnosti tal K

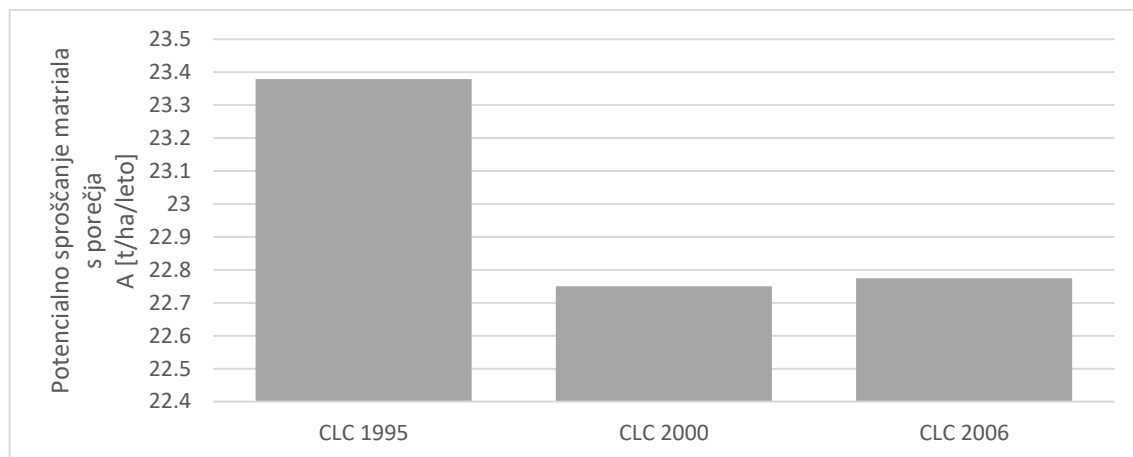
5.6.4 Vpliv rabe tal

Vpliv rabe tal je v enačbi RUSLE zajet s pomočjo faktorja pokrovnosti tal *C*. Dejavnik ima vrednosti med 0 (za dobro zaščitene površine) in 1 (gola območja), določen pa je bil na podlagi kart pokrovnosti tal CLC Corine. Te so za območje Slovenije na voljo na spletnih straneh Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO, 2017) za leta 1995, 2000, 2006 in 2012 (slika 27). Za tri od teh primerov smo na obravnavanem območju okoli pluviografske postaje Rateče določili vrednosti potencialne letne izgube tal (grafikon 15).



Slika 27: Podlage CLC Corine za različna leta podatkov o pokrovnosti tal, obrezana na obravnavano območje.

Med leti 1995, 2000 in 2006 prihaja le do majhnih razlik v pokrovnosti tal (slika 27), ki pa v končnem računu vplivajo na količino potencialne izgube tal. Slednja je najvišja v primeru upoštevanja pokrovnosti tal iz leta 1995, v naslednjem desetletju pa se zniža za 0,6 t/ha, z najmanjšo izračunano vrednostjo izgub tal ob upoštevanju stanja v letu 2000 (grafikon 15). Kljub rasti urbanih površin v majhnem delu obravnavanega pobočja, je učinek zaraščanja v poznih devetdesetih in prvih letih tega tisočletja, vplivalo na zmanjšanje izgub tal v letu 2000. Do leta 2006 je bil trend rahlo obrnjen. Kljub temu izrazit preskok med oceno izgub tal s pomočjo CLC Corine 1995 in 2000 lahko pripišemo tudi drugačni ločljivosti oz. pomanjkanju podatkov v zahodnem delu obravnavanega območja, ki so vplivali na končni izračun.



Grafikon 15: Primerjava letnih količin izgub tal A (v t/ha/leto) za porečje Save Dolinke nad Kranjsko goro z uporabo različnih kart pokrovnosti tal CLC Corine

6 SKLEPI

V nalogi je bilo predstavljeno stanje na področju raziskav erozivnosti padavin in z njo povezane erozije tal; opisane so vrste erozije tal, njeni dejavniki, ter podrobno obravnavan eden izmed njih – dejavnik erozivnosti padavin R .

Za zmerno podnebje so Panagos in sod. (2017b) predvideli vrednost dejavnika erozivnosti padavin $3729 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Tej vrednosti je dejavnik R najbližje na postaji Portorož ($3097,8 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), ostale analizirane pluviografske postaje v Sloveniji pa, z izjemo Vogla, izkazujejo nižje vrednosti. Za vse je sicer značilno, da se večina erozivnih dogodkov (86% za analizirane postaje) zgodi v toplejšem delu leta, t.j. med majem in oktobrom. Zaradi drugačne merilne opreme v preteklosti, vrednosti obeh dejavnikov (R in $R_{maj-okt}$) v prvih letih meritev na nekaterih analiziranih postajah sovpadata; zimske padavine so bile namreč pod vplivom izpada podatkov oz. niso bile predmet meritev padavin. To vpliva tudi na izrazitejši trend naraščanja pri večini analiziranih postaj za celoletne vrednosti R ; z izboljšanjem/zamenjavo merilne opreme v preteklosti na analiziranih postajah, je bilo izmerjenih več padavinskih dogodkov in posledično izračunana višja vrednost faktorja erozivnosti R . Podobno so tudi vrednosti standardne deviacije za celoletne vrednosti S_R višje od polletnih vrednosti $S_{R_{maj-okt}}$. Najvišje vrednosti standardne deviacije ima postaja Vogel, sledi ji postaja Portorož, najnižje pa izkazuje na postaji Novo mesto.

Hipotezo (i): »Erozivnost padavin, opisana z erozijskim faktorjem R , se v Sloveniji v zadnjih desetletjih zmanjšuje«, na analiziranih postajah lahko v splošnem **ovržemo**. S pomočjo trendnega testa po Mann-Kendallu smo dokazali, da je negativen trend prisoten le na postaji Novo mesto (kjer trend ni statistično značilen), ter za polletne vrednosti $R_{maj-okt}$ na postaji Postojna. V vseh ostalih primerih je prisoten pozitiven trend, ki je najbolj izrazit na postaji Rateče. Trendi so statistično značilni s stopnjo značilnosti $\alpha = 0,05$ v primeru celoletnih vrednosti R na postajah Rateče, Postojna, Šmarata, Celje, Murska Sobota ter v primeru polletnih vrednosti $R_{maj-okt}$ na postaji Rateče.

Hipotezo (ii): »Izbrani parametri, ki določajo erozivne dogodke, imajo izrazit vpliv na izračunano vrednost parametra erozivnosti padavin R « lahko **potrdimo**. Analiza občutljivosti je pokazala, da prav vsi izbrani parametri vplivajo na končno vrednost R -faktorja, vsak sicer v drugačnem obsegu. Normaliziran kazalnik občutljivosti (NKO) med vhodnimi parametri ni pokazal večjih odstopanj. Kljub temu dejavnika t in k kažeta najvišje vrednosti NKO, ki pa kljub temu ne presežejo vrednosti 0,12 (t pri P_3). Najbolj na R -faktor torej vpliva izbira časovnega

intervala za ločitev padavinskih dogodkov (dolžina časovnega intervala P_t) ter vpliv izmerjene količine padavin na uvrstitev padavinskega dogodka med erozivne; ob kriteriju, da pade več kot P_k mm padavin.

Erozivnost padavin je najvišja na postaji Vogel ($7289,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), najnižja pa na postaji Murska Sobota ($1392 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), pri večini postaj pa je prisoten naraščajoč trend v vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R s srednjo vrednostjo koeficienta tau (pri Mann Kendallovem testu za vse postaje; poglavje 5.2) 0,09. Erozivnost se v splošnem od zahoda proti vzhodu Slovenije zmanjšuje, podobno kot tudi letna količina padavin, vendar odvisnost ni linearna. Relativno se erozivnost padavin spreminja bolj od količine padavin, predvsem pa je to značilno za zahodno Slovenijo, kjer so si vrednosti dejavnika erozivnosti med bližnjimi postajami zelo različne (primer postaj Rateče in Vogel).

Izguba tal v izbranem porečju Save Dolinke nad Kranjsko goro (študij primera) je bila ocenjena s pomočjo enačbe RUSLE in s pomočjo orodja SAGA. Ob primerjavi različnih enačb za oceno kinetične energije dežja in posledično izračun erozivnosti padavin R in njihovim vplivom na vrednosti izgube tal je bilo ugotovljeno, da najvišje vrednosti izgube tal napoveduje Petanova enačbe za kinetično energijo dežja za postajo Kozjane. Vrednost izgube tal se precej spreminja v odvisnosti od meteoroloških značilnosti posameznega koledarskega leta, saj se vrednosti ob upoštevanju maksimalnega in minimalnega dejavnika erozivnosti R iz obravnavanega obdobja precej razlikujeta (potencialna letna izguba tal ob upoštevanju maksimalne vrednosti erozivnosti padavin predstavlja šestkratnik tiste, ki jo dobimo ob upoštevanju minimalne vrednosti erozivnosti padavin). Zanimivo je tudi, da sprememba ločljivosti digitalnega modela višin nima linearne odvisnosti z ocenjeno letno količino sproščenega materiala, saj povečanje računske celice s 5 m na 20 m vrednost potencialnega sproščanja najprej zviša, nato pa s povečanje z 20 m na 100 m zniža. V povezavi s pokrovnostjo tal je bilo ugotovljeno, da linearnega trenda v treh primerih ni bilo (torej med leti 1995, 2000 in 2006); je pa vrednost potencialnega sproščanja v letu 2006 za obravnavano območje nižja, kot v letu 1995.

Verjetno je Slovenija država z eno največjih pestrosti v razponu vrednosti erozivnosti padavin na tako majhnem prostoru v Evropi. Panagos in sod. (2015a) so med vsemi regijami v Evropski Uniji in Švici, območje Alp in Mediterana uvrstili med tista območja z najvišjo erozivnostjo padavin. V omenjeni študiji so prav postaje v Sloveniji dosegle najvišje vrednosti erozivnosti na analiziranem območju z dejavnikom R višjim od $5000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$; in sicer postaje Kneške Ravne, Vogel, Kal nad Kanalom, Log pod Mangartom in Lokve (vse v zahodni Sloveniji). Skrajni severovzhodni del Slovenije pa kaže precej drugačne padavinske značilnosti ter posledično nizke vrednosti erozivnosti padavin. Prej omenjena študija je na Evropski ravni

povprečno vrednost dejavnika R ocenila na $722 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, povprečna vrednost obravnavanih postaj v tej nalogi pa znaša $2705 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$; skoraj štirikrat več. Podobno je tudi pri primerjavi vrednosti gostote erozivnosti; ta ima v Evropi srednjo vrednost $0,92 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, a z visoko mero odstopanja po posameznih regijah. Slovenija spada med bolj erozivno aktivna območja v Evropi; najvišja gostota erozivnosti je bila izračunana na postajah Vogel ($3,6 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) in Portorož ($3,5 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), najnižja pa – presenetljivo – na postaji Rateče ($1,8 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Del odgovornosti za tak rezultat so lahko tudi podcenjene količine padavin, ki neposredno vplivajo na izračun erozivnosti (enačba 24). Srednja vrednost gostote erozivnosti za obravnavane pluviografske postaje v Sloveniji, znaša $2,4 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Tovrstna primerjava pokaže, da je območje Slovenije podvrženo višjim tveganjem kot posledica visoke intenzivnosti padavinskih dogodkov, ki izhajajo iz padavinskih dogodkov visokih intenzitet. Posledica teh naravnih danosti je povečano tveganje izgube tal, se pa številni padavinski dogodki z visoko intenziteto padavin izražajo tudi, ko prožijo zemeljske plazove in povzročajo hudourniške poplave. Pri razumevanju nevarnih pojavov v Sloveniji in načrtovanju varstva pred njimi nam lahko pomaga tudi poglobljeno znanje in analiza, predstavljeni v tej nalogi.

7 VIRI IN LITERATURA

ARSO 2017. Spletna stran Agencije Republike Slovenije za okolje. <http://www.arso.gov.si/> (Pridobljeno 1.6.2017).

Ballabio, C., Borrelli, P., Spinoni, J., Meusburger, K., Michaelides, S., Begueria, S., Klik, A., Petan, S., Janeček, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Tadić, M. P., Diodato, N., Kostalova, J., Rousseva, S., Banasik, K., Alewell, C., Panagos, P. 2017. Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, 579, str. 1298–1315.

Bezak, N., Rusjan, S., Petan, S., Sodnik, J., Mikoš, M. 2015. Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure. *Environ. Earth Sci.*, 74, str. 5245–5261.

Borrelli, P., Diodato, N., Panagos, P. 2016. Rainfall erosivity in Italy: a national scale spatio-temporal assessment. *International Journal of Digital Earth*, 9(9), str. 835–850.

Brown, L.C., Foster, G.R. 1987. Storm erosivity using idealised intensity distribution. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 30(2), str. 293–307.

Ceglar, A., Črepinšek, Z., Zupanc, V., Kajfež-Bogataj, L. 2008. A comparative study of rainfall erosivity for eastern and western Slovenia = Primerjava erozivnosti padavin v zahodni in vzhodni Sloveniji. *Acta agriculturae Slovenica*, 91(2), str. 331–341.

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., Böhner, J. 2017. SAGA - System for Automated Geoscientific Analyses. <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (Pridobljeno 1.8.2017).

Cook, H.L. 1936. The nature and controlling variables of the water erosion process. *Soil Science Society of America*, 1(C), str. 487–494.

Dabney, S., Justice, V. 2016. RIST version 3.98. <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/research/rist/rist-rainfall-intensity-summarization-tool/> (Pridobljeno 13.5.2017).

Demšar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, C., Hočevnar, T., Milutinovic, M., Možina, M., Polajnar, M., Toplak, M., Staric, A., Stajdohar, M., Umek, L., Žagar, L., Žbontar, J., Žitnik, M., Zupan, B. 2013. Orange: Data Mining Toolbox in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 14, str. 2349–2353. <http://jmlr.org/papers/v14/demsar13a.html> (Pridobljeno 20.7.2017).

van Dijk, A.I.J.M., Bruijnzeel, L.A., Rosewell, C.J., 2002. Rainfall intensity - kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, 261, str. 1–23.

Dolinar, M., Vertačnik, G., Bertalanič, R., Dvoršek, D., Nadbath, M., Gartner, D., Klančar, M., Boljka, L., Lanjšček, M., Kolarič, D. 2014. Podnebne spremembe v Sloveniji. http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/podnebne_spremembe/porocilo_podnebne_spremembe1_2.pdf (Pridobljeno 20.6.2017).

Foster, G.R., McCool, D. K., Renard, K. G., Moldenhauer, W. C. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(6), str. 355–359.

Gan, Y., Duan, Q., Gong, W., Tong, C., Sun, Y., Chu, W., Ye, A., Miao, C., Di, Z. 2014. A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model. *Environmental Modelling and Software*, 51, str. 269–285.

GIS, 2017. Karta podnebnih tipov v Sloveniji. http://www.gis.si/egw/GOS_T12_P04/index.html (Pridobljeno 19.6.2017).

Gu, R.R., Li, Y. 2002. River temperature sensitivity to hydraulic and meteorological parameters. *Journal of Environmental Management*, 66, str. 43–56.

Hahn, C.T., Barfield, B.J., Hayes, J.C. 1994. Design hydrology and sedimentology for small catchments, San Diego: Academic Press Inc, 588 str.

Iooss, B., Lemaître, P. 2015. A review on global sensitivity analysis methods. V G. Dellino, C. Meloni, ur. *Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications*. Springer, str. 101–122.

van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., Montanarella, L. 2007. Soil Erosion Risk Assessment in Europe. European Soil Bureau, 34 str.

Komac, B. 2003. Dolomite Relief in the Žibriše hills. *Acta Geographica Slovenica*, 43(2), str. 7–30.

Komac, B., Zorn, M. 2005a. Erozijski prsti na kmetijskih zemljiščih v Sloveniji. *Ujma*, 19, str. 163–174. <http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2005/erozija.pdf> (Pridobljeno 25.5.2017).

Komac, B., Zorn, M. 2005b. Erozijski prsti na kmetijskih zemljiščih v Sloveniji - Meritve žlebične erozije v dolini Besnice = Soil erosion on agricultural land in Slovenia - Measurements of rill erosion in the Besnica valley. *Acta Geographica Slovenica*, 45(1), str. 53–86.

Kraner Šumenjak, T., Šuštar, V. 2011. Parametrični in neparametrični pristopi za odkrivanje trenda v časovnih vrstah. *Acta agriculturae Slovenica*, 97(3), str. 305–312. <http://aas.bf.uni-lj.si/september2011/16kraner.pdf> (Pridobljeno 20.7.2017).

Lobo, G.P., Bonilla, C.A. 2015. Sensitivity analysis of kinetic energy-intensity relationships and maximum rainfall intensities on rainfall erosivity using a long-term precipitation dataset. *Journal of Hydrology*, 527, str. 788–793.

Longobardi, A., Villani, P. 2010. Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean area. *International Journal of Climatology*, 30, str. 1538–1546.

Machiwal, D., Jha, M.K. 2012. *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*, Springer.
Meyer, L.D., Monke, E.D. 1965. Mechanics of Soil Erosion by Rainfall and Overland Flow. *Transactions of the ASAE*, 8(4), str. 572–580.

Mikoš, M. 2000. Izrazje na področju erozijskih pojavov = Technical Terms in the Field of Erosion Processes. *Gradbeni vestnik*, 49(5), str. 102–114.

Mikoš, M., Jošt, D., Petkovšek, G. 2006. Rainfall and runoff erosivity in the alpine climate of north Slovenia: a comparison of different estimation methods. *Hydrological Sciences Journal*, 51(1), str. 115–126.

Mikoš, M., Zupanc, V. 2000. Erozijski tal na kmetijskih površinah. *Sodobno kmetijstvo*, 33(10), str. 419–423. ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/students/urejanje_povirij/Mikos_Zupanc_2000.pdf (Pridobljeno 10.5.2017).

Moore, D.S., McCabe, G.P., Craig, B.A. 2014. Introduction to the practice of statistics Eighth edition. New York: W. H. Freeman and Company, 825 str.

Myers, N. 1991. Gaia, modri planet: atlas za današnje upravljalce jutrišnjega sveta, Ljubljana: Mladinska knjiga, 269 str.

Nearing, M.A., Pruski, F.F., O'Neal, M.R. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. Journal of Soil and Water Conservation, 59(1), str. 42–50.
https://www.researchgate.net/profile/Mark_Nearing/publication/43258785_Expected_Climate_Change_Impacts_on_Soil_Erosion_Rates_A_Review/links/02e7e5304f2526f1be000000.pdf
(Pridobljeno 12.8.2017).

Ogrin, D. 1996. Podnebni tipi v Sloveniji. Geografski Vestnik, 68, str. 39–56.

Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC, 250 str.

Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., Tadić, M. P., Michaelides, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Beguería, S., Alewell, C. 2015a. Rainfall erosivity in Europe. Science of the Total Environment, 511, str. 801–814.

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K. 2015b. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. Geosciences, 5, str. 117–126.

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., van der Zanden, E. H., Poesen, J., Alewell, C. 2015c. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. Environmental Science and Policy, 51, str. 23–34.

Panagos, P., Ballabio, C., Meusburger, K., Spinoni, J., Alewell, C., Borrelli, P. 2017a. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. Journal of Hydrology, 548, str. 251–262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.006>.

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., Yang, J. E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N. 2017b. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. str. 1–12.

Petan, S. 2010. Meritve in prostorsko modeliranje erozivnosti padavin kot parametra erozije tal. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (mentor Mikoš, M., somentor Rakovec, J.), 205 str.

Petan, S., Rusjan, S., Vidmar, A., Mikoš, M. 2010. The rainfall kinetic energy-intensity relationship for rainfall erosivity estimation in the mediterranean part of Slovenia. *Journal of Hydrology*, 391(3–4), str. 314–321.

Petkovšek, G. 2000. Procesno Utemeljeno Modeliranje Erozijske Tal = Process Based Soil Erosion Modelling. *Acta hydrotechnica*, 28(18), str. 41–60.

Petkovšek, G., Mikoš, M. 2004. Estimating the R factor from daily rainfall data in the sub-Mediterranean climate of southwest Slovenia. *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), str. 869–877. ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/students/urejanje_povirij/Petkovsek_Mikos_HSJ_2004.pdf (Pridobljeno 10.6.2017).

Plečko, J. 2015. Analiza tedenske razporeditve padavin za izbrane padavinske postaje v Sloveniji. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentorica Škapin Rugelj, M.), 115 str.

Rajczak, J., Pall, P., Schär, C. 2013. Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, str. 3610–3626.

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), Washington DC: USDA ARS. http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64080530/RUSLE/AH_703.pdf (Pridobljeno 20.5.2017).

Saltelli, A., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S. 2008. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. Wiley, 305 str.

Saltelli, A. 1999. Sensitivity analysis: Could better methods be used? *Journal of Geophysical Research*, 104(D3), str. 3789–3793.

Saltelli, A. Tarantola, S., Campolongo, F., Ratto, M. 2004. Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models. Wiley, 232 str.

Salvati, L., Carlucci, M. 2013. The impact of mediterranean land degradation on agricultural income: A short-term scenario. Land Use Policy, 32, str. 302–308.

Smithson, P., Addison, K., Atkinson, K. 2002. Fundamentals of the Physical Environment. London: Routledge, 792 str.

Snoj, M. 2015. Slovenski etimološki slovar: Tretja izdaja. Ljubljana: Založba ZRC, Znanstvenoraziskovalni center SAZU, 1051 str.

Šraj, M., Brilly, M. 2000. Šifrant hidrografskih območij Republike Slovenije. Načrtovanje v vodnem gospodarstvu: Mišičev vodarski dan. str. 93–100.

Friedrichs, T. 2017. Hellmann Rain Gauge. <http://www.th-friedrichs.de/en/products/rain/rain-gauge/hellmann-rain-gauge/> (Pridobljeno 1.6.2017).

Turk, G. 2012. Verjetnostni račun in statistika, Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 264 str.

Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G., Salles, C. 2006. Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 111(22), str. 1–11.

Vičar, Z. (ARSO), 2017. Prošnja za posredovanje podatkov s pluviografov.

Vičar, Z., Ahčin, M. 2005. Mreža postaj z ombrografi. http://www.arso.gov.si/vreme/poročila_in_projekti/državna_služba/Mreza_postaj_z_ombrografi_dezemberi.pdf (Pridobljeno 20.5.2017).

Vrščaj, B., 2013. Tla ali prst? Prispevek k razpravam o rabi izrazov „tla“ in „prst“ v slovenskem poljudnem in strokovnem izrazoslovju. Acta agriculturae Slovenica, 101(2), str. 317–328. <http://aas.bf.uni-lj.si/september2013/15Vrscaj.pdf> (Pridobljeno 4.6.2017).

Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. Agricultural Handbook, (537), str. 57. <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF> (Pridobljeno 15.7.2017.).

Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Transactions, American Geophysical Union, str. 285-291.