

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



*PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
VARSTVO OKOLJA*

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

SIMON RUSJAN, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.

**HIDROLOŠKE KONTROLE SPROŠČANJA HRANIL
V POREČJIH**

Doktorska disertacija števil.: 179

**HYDROLOGICAL CONTROLS
OF NUTRIENT MOBILIZATION IN WATERSHEDS**

Doctoral thesis No.: 179

Temo doktorske disertacije je odobril Senat Univerze v Ljubljani
na svoji 13. seji dne 20. marca 2007 in imenoval
mentorja prof. dr. Matjaža Mikoša in somentorja prof. dr. Mitjo Brillyja

Ljubljana, 17. marec 2008

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi
prof. dr. Matjaž Mikoš
prof. dr. Mitja Brilly
prof. dr. Mihael Jožef Toman (UL BF)
prof. dr. Franc Lobnik (UL BF)
izr. prof. dr. Jože Panjan

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 3. redni seji dne
28. septembra 2005.

Komisijo za oceno doktorske disertacije v sestavi
prof. dr. Matjaž Mikoš
prof. dr. Mitja Brilly
prof. dr. Mihael Jožef Toman (UL BF)
prof. dr. Franc Lobnik (UL BF)
izr. prof. dr. Jože Panjan

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 14. redni seji dne
30. januarja 2008.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi
prof. dr. Bojan Majes, dekan, predsednik
prof. dr. Matjaž Mikoš
prof. dr. Mitja Brilly
prof. dr. Mihael Jožef Toman (UL BF)
prof. dr. Franc Lobnik (UL BF)
izr. prof. dr. Jože Panjan

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 15. redni seji dne
27. februarja 2008.

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **SIMON RUSJAN** izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom:
»HIDROLOŠKE KONTROLE SPROŠČANJA HRANIL V POREČJIH«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ilirska Bistrica, 12. 3. 2008

.....
(podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 004.6:519.61/.64:556.52:659.2(043.3)

Avtor: Simon Rusjan, univ. dipl. inž. vod., kom. inž.

Mentor: prof. dr. Matjaž Mikoš

Somentor: prof. dr. Mitja Brilly

Naslov: Hidrološke kontrole sproščanja hranil v porečjih

Obseg in oprema: 206 str., 12 pregl., 96 sl., 11 en.

Ključne besede: hidrologija, hranila, zvezne meritve, porečje Padeža, rudarjenje podatkov, modeliranje

Izveček

Doktorska disertacija obravnava časovno dinamiko sproščanja hranil z gozdnatega prispevnega območja s poudarkom na opredelitvi in analizi hidroloških mehanizmov, odgovornih za uravnavanje opazovanih odzivov koncentracije nitratnega dušika v vodotoku, ter količin spranega nitratnega dušika. Na območju obravnave, gozdnatem prispevnem območju potoka Padež, smo v letih 2006 in 2007 zvezno spremljali hidrometeorološke razmere na več dežemerih in vodomernih postajah ter meteorološki postaji. Meritve hidrometeoroloških razmer smo periodično dopolnili z zveznimi meritvami kemizma vode v vodotoku v različnih letnih časih in hidroloških razmerah. Zvezne meritve koncentracije nitratnega dušika v vodotoku v času padavinskih dogodkov razkrivajo precejšnjo, a spremenljivo odzivnost koncentracije na hidrološke razmere. Navkljub pestrosti opazovanih hidroloških razmer se v merjenih koncentracijah nitratnega dušika odraža sezonski vpliv, ki ima prevladujočo vlogo pri regulaciji intenzivnosti biogeokemijskih transformacij dušikovih spojin, njihovi nadaljnji razpoložljivosti za mobilizacijo pod vplivom hidroloških mehanizmov ter s tem odzivnosti na padavinske dogodke. V okviru konceptualizacije spiranja nitratnega dušika smo zaznane časovne vzorce formacije hidrogramov odtoka ter koničnih koncentracij nitratnega dušika v vodotoku navezali na časovno frekvenco nihanj zasičene cone talnega profila in s tem povezane spremenljivosti prostorske razsežnosti območij zasičenega talnega profila. Obsežno bazo podatkov, pridobljenih v okviru zveznih meritev, smo uporabili za aplikacijo metod rudarjenja po podatkih. Z algoritmom M5, ki na podlagi prepoznanih zvez med podatki gradi modelna drevesa oz. nize klasifikacijskih pravil, smo dopolnili naše domensko poznavanje spiranja nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja in modelirali koncentracijo nitratnega dušika v vodotoku ter opredelili letno masno bilanco sproščene količine nitratnega dušika z gozdnatega porečja.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 004.6:519.61/.64:556.52:659.2(043.3)

Author: Simon Rusjan, BSE (Water Manag. and Municipal Eng.)

Supervisor: Prof. Matjaž Mikoš, PhD

Co-advisor: Prof. Mitja Brilly, PhD

Title: Hydrological controls of nutrient mobilization in watersheds

Notes: 206 p., 12 tab., 96 fig., 11. eq.

Key words: hydrology, nutrients, continuous measurements, the Padež stream watershed, data mining, modelling

Abstract

The doctoral dissertation deals with the temporal dynamics of the nutrient mobilization from a forested watershed with the emphasis on the definition and analysis of the hydrological mechanisms responsible for the regulation of observed responses of the streamwater nitrate concentrations and the amounts of the flushed nitrate. In 2006 and 2007 we continuously monitored the changeability of hydrometeorological conditions on rain gauges, limnigraphs and meteorological station on the studied area, the Padež stream forested watershed. The measurements of the hydrometeorological conditions were periodically supplemented by the continuous measurements of the streamwater chemistry in different seasonal and hydrological settings. The measurements of the streamwater nitrate concentrations during the hydrological events disclosed a considerable but variable responsiveness of the concentration to the hydrological conditions. In spite of the variability of the hydrological conditions, a seasonal influence could be recognised which has a prevailing role in regulating the intensity of biogeochemical transformations of nitrogen compounds, their further availability to mobilize under the impact of the hydrological mechanisms and respond to rainfall events. In the scope of the conceptual explanation of nitrate flushing, the perceived temporal patterns of the hydrograph and peak streamwater concentration formation were linked to the temporal frequency of the soil profile saturation deficit oscillations and associated changeability of spatial extension of the saturated variable areas. An extensive database obtained through continuous measurements was used for the application of the data mining methods. Using the algorithm M5 which, based on the recognised relations between the data builds the model trees and classification rules, we supplemented our domain knowledge of the nitrate flushing from the forested watershed and modelled the streamwater nitrate concentration. Additionally, we calculated the mass flux of the nitrate which is annually washed from the studied forested watershed.

ZAHVALA

- Mentorju *prof. dr. Matjažu Mikošu* in somentorju *prof. dr. Mitji Brillyju* za številne napotke pri izdelavi naloge.
- *Mateju Padežniku* in *mag. Andreju Vidmarju*, ki sta veliko pripomogla k temu, da so se meritve lahko izvedle v takšnem obsegu.
- *Sašu Petanu*, *Anji Horvat* in *Tomažu Kralju* za pomoč pri pridobivanju in analizi podatkov.
- *Mojci Vilfan* za lektorski pregled besedila.
- Vsem bližnjim, ki so mi cel čas študija stali ob strani.

Večji del meritev v okviru doktorske disertacije je bil opravljen v sklopu dopolnilnih hidroloških in kemijskih raziskav za potrebe projekta »Ureditev oskrbe prebivalstva s pitno vodo slovenske Istre in zalednega kraškega območja«, ki ga je financiralo Ministrstvo za okolje in prostor. Moj doktorski študij je finančno podprlo Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport Republike Slovenije.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
1.1 SPLOŠNI PREGLED	1
1.2 HIPOTEZA	4
1.3 CILJI	5
1.4 METODOLOŠKA IZHODIŠČA	6
2 TEORETIČNE OSNOVE.....	9
2.1 MEHANIZMI TVORBE PADAVINSKEGA ODTOKA	9
2.1.1 Hortonov površinski odtok.....	11
2.1.2 Zasičen površinski odtok	12
2.1.3 Podpovršinski tok	13
2.2 ZADRŽEVALNI ČAS PADAVINSKEGA ODTOKA	16
2.2.1 Okoljska sledila	16
2.2.2 Ugotavljanje komponent odtoka z uporabo okoljskih sledil.....	18
2.3 BIOGEOKEMIJA DUŠIKA V GOZDU.....	21
2.3.1 Atmosferski vnos dušika v gozdni ekosistem.....	22
2.3.2 Značilnosti tal.....	23
2.3.3 Gozdna vegetacija	25
2.4 HIDROLOŠKI KONTROLNI MEHANIZMI	29
2.4.1 Vloga topografskih in hidromorfoloških karakteristik površja	31
2.4.2 Hidrološko pogojena mobilizacija dušika v riparijskem območju	33
2.4.3 Hidrološka mobilizacija dušika v višjih pobočnih območjih in hidrološka povezanost z riparijskimi območji	36
3 METODE	39
3.1 UVOD	39
3.2 OPIS POREČJA PADEŽA	41
3.2.1 Geologija in geomorfologija	41
3.2.2 Pedologija.....	46
3.2.3 Pokrovnost tal.....	50
3.2.4 Klimatske razmere	51
3.2.4.1 Temperature	52
3.2.4.2 Padavine	52
3.2.4.3 Sončno obsevanje.....	53
3.2.5 Hidrološke lastnosti porečja.....	53
3.3 MERSKE METODE	56
3.3.1 Meritve padavin.....	57
3.3.2 Meritve ostalih meteoroloških dejavnikov	57
3.3.3 Meritve nivoja gladine in pretokov.....	58
3.3.4 Meritve kemizma vode	58

3.4 MODELIRANJE SPIRANJA NITRATNEGA DUŠIKA	61
3.4.1 Strojno učenje in rudarjenje podatkov.....	61
3.4.2 Odločitvena drevesa	62
3.4.2.1 Generiranje regresijskih dreves	65
3.4.2.2 Vrednotenje kredibilnosti regresijskih dreves	67
3.4.2.3 Algoritem za generiranje regresijskih dreves M5.....	68
4 REZULTATI	71
4.1 UVOD	71
4.2 PADAVINE IN PRETOKI VODE	72
4.3 METEOROLOŠKI DEJAVNIKI	75
4.4 KEMIZEM VODE	77
4.4.1 Prostorska spremenljivost koncentracije nitratnega dušika	78
4.4.2 Padavinski dogodki in časovna spremenljivost koncentracije nitratnega dušika v letu 2006	79
4.4.2.1 Padavinski dogodki zgodaj spomladi	81
4.4.2.2 Padavinski dogodki pozno spomladi	83
4.4.2.3 Padavinski dogodki poleti	84
4.4.2.4 Padavinski dogodek jeseni	87
4.4.3 Padavinski dogodki in časovna spremenljivost koncentracije nitratnega dušika v letu 2007	89
4.4.3.1 Padavinska dogodka v maju	89
4.4.3.2 Padavinski dogodek v juniju	91
4.4.3.3 Padavinski dogodek v avgustu	91
4.4.3.4 Padavinski dogodek v septembru	92
4.5 HIDROLOŠKE KONTROLE MOBILIZACIJE NITRATNEGA DUŠIKA	95
4.5.1 Sezonska spremenljivost hidrološke mobilizacije nitratnega dušika	95
4.5.1.1 Prvi hidrogrami	96
4.5.1.2 Nizi hidrogramov v sestavljenih padavinskih dogodkih	100
4.5.2 Sestava odtoka in dinamika spiranja nitratnega dušika	103
4.5.3 Primerjava spremenljivosti hidrološke mobilizacije nitratnega dušika v letih 2006 in 2007	110
4.5.4 Časovna formacija konic hidrogramov in maksimalnih koncentracij nitratnega dušika ..	113
4.5.5 Masna bilanca spranega nitratnega dušika v času opazovanih padavinskih dogodkov....	117
4.6 ČASOVNA SPREMENLJIVOST KONCENTRACIJE NITRATNEGA DUŠIKA V OBDOBJIH BREZ PADAVIN.....	121
5 KONCEPTUALIZACIJA ČASOVNE IN PROSTORSKE DINAMIKE HIDROLOŠKE MOBILIZACIJE NITRATNEGA DUŠIKA S POREČJA.....	127
5.1 UVOD	127
5.2 SPREMENLJIVOST VSEBNOSTI NITRATNEGA DUŠIKA V GOZDNIH TLEH.....	129
5.3 HIDROLOŠKA MOBILIZACIJA NITRATNEGA DUŠIKA NA PROSTORSKEM NIVOJU VARIABILNIH OBMOČIJ ZASIČENEGA POVRŠINSKEGA ODTOKA.....	133
5.3.1 Spiranje nitratnega dušika iz talnih horizontov.....	133

5.3.2 Regulacija mobilizacije nitratnega dušika preko variabilnih območij zasičenega talnega profila	135
5.3.3 Potencialni viri nitratnega dušika, mobiliziranega preko tvorbe variabilnih območij zasičenega talnega profila	141
6 RAZVOJ MODELA	145
6.1 UVOD	145
6.2 MODELIRANJE DINAMIKE KONCENTRACIJE NITRATNEGA DUŠIKA V ČASU PADAVINSKIH DOGODKOV	147
6.2.1 Nabor atributov	147
6.2.2 Modelno drevo koncentracije nitratnega dušika v obdobjih padavinskih dogodkov	148
6.2.3 Interpretacija zgradbe in rezultatov modela v kontekstu domenskega znanja	154
6.2.4 Preizkus modelnega drevesa v drugačnih hidroloških in sezonskih okvirih	157
6.3 MODELIRANJE SEZONSKE DINAMIKE KONCENTRACIJE NITRATNEGA DUŠIKA	161
6.3.1 Nabor atributov	161
6.3.2 Modelna drevesa in nizi klasifikacijskih pravil za napovedovanje koncentracije nitratnega dušika v vseh merskih obdobjih	162
6.3.3 Masna bilanca spranega nitratnega dušika	171
7 ZAKLJUČEK	177
7.1 SEZONSKA SPREMENLJIVOST DINAMIKE SPIRANJA NITRATNEGA DUŠIKA V ČASU PADAVINSKIH DOGODKOV	178
7.2 FORMACIJA HIDROGRAMOV ODTOKA NAPRAM FORMACIJI KONIČNIH KONCENTRACIJ NITRATNEGA DUŠIKA V VODOTOKU	179
7.3 SEZONSKA SPREMENLJIVOST DNEVNEGA CIKLA IZPIRANJA NITRATNEGA DUŠIKA V OBDOBJIH BREZ PADAVIN	179
7.4 MODELIRANJE DINAMIKE KONCENTRACIJE NITRATNEGA DUŠIKA	180
7.5 USMERITVE ZA NADALJNJE DELO	182
POVZETEK	183
SUMMARY	186
LITERATURA	189
PRILOGA A ZVEZNE MERITVE ELEKTROPREVODNOSTI VODE V VODOTOKU V OBDOBJIH PADAVINSKIH DOGODKOV V LETU 2006	201
PRILOGA B SHEMATSKI PRIKAZ STRUKTURE MODELNIH DREVES GLEDE NA KRITERIJ MINIMALNEGA ŠTEVILA PRIMEROV V POSAMEZNEM LISTU	205

KAZALO SLIK

2 TEORETIČNE OSNOVE

Slika 2.1: Shematski diagram mehanizmov tvorbe skupnega odtoka iz porečja (povzeto po Knighton, 1998).....	10
Slika 2.2(A): Potencialne poti odtoka padavinske vode (1 – podtalna voda; 2 – medtok; 3 – Hortonov površinski odtok; 4 – saturiran površinski odtok kot kombinacija povratnega toka in neposrednega padavinskega odtoka z zasičenih območij). Nešrafirano območje predstavlja bolj prepustne plitve talne horizonte, šrafirano območje manj prepustna globlja tla (povzeto po Knighton, 1998).	11
Slika 2.2(B): Shematski prikaz tvorbe plitvega podpovršinskega toka in zasičenih razmer v dveh talnih horizontih z različnima hidravličnima prepustnostma, kjer je $K_1 > K_2$ (povzeto po Knighton, 1998).....	11
Slika 2.3: Hipotetičen časovni profil biološke aktivnosti, hidroloških razmer in koncentracije nitratnega dušika v vodotoku in tleh (povzeto po Cirmo in McDonnell, 1997).....	30

3 METODE

Slika 3.1: Porečje reke Reke (svetlomodra) in Padeža (temnomodra) na šifrantu padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije (vir: Šraj, 2000).	40
Slika 3.2 (A): Pregledna geološka karta hribovitega območja Brkinov (vir: Osnovna geološka karta SFRJ, 1972).	42
Slika 3.2 (B): Geološki profil območja v smeri SV–JZ (vir: Osnovna geološka karta SFRJ, 1972)....	42
Slika 3.3: Prispevno območje Padeža in hidrografska mreža vodotokov na digitalnem modelu reliefa.	44
Slika 3.4: Nakloni površja na območju porečja Padeža.	44
Slika 3.5 (A): Obravnavana odseka Padeža in Suhorke.	45
Slika 3.5 (B): Vzdolžna prereza Padeža in Suhorke.	45
Slika 3.6: Talni profil na Padežu z oznako talnih horizontov po klasifikaciji JKT (levo) in klasifikaciji WRB 2006 (desno).	48
Slika 3.7: Prostorska razporeditev pokrovnosti tal na prispevnem območju Padeža glede na klasifikacijo pokrovnosti tal CORINE.	50
Slika 3.8: Deleži razredov pokrovnosti prispevnega območja Padeža na 3. nivoju klasifikacije CORINE.	51
Slika 3.9: Povprečne, minimalne in maksimalne mesečne padavine na padavinski postaji Tatre.....	53
Slika 3.10: Povprečni, minimalni in maksimalni mesečni pretoki na vodomerni postaji Suhorje.	54
Slika 3.11: Povprečni mesečni koeficient odtoka s prispevnega območja Padeža.	55
Slika 3.12: Merska oprema na prispevnem območju Padeža.....	56
Slika 3.13a: Dežemer na Tatrah.....	60
Slika 3.13b: Avtomatska meteorološka postaja na Kozjanah.....	60
Slika 3.13c: Merilec višine vode (levo) in multiparameterska sonda (desno) v profilu vodomerne postaje Padež03	60
Slika 3.13d: Spominski modul multiparameterske sonde z baterijo	60
Slika 3.14: Shematska predstavitev odločitvenega drevesa.....	63

4 REZULTATI

Slika 4.1: Mesečne količine padavin na prispevnem območju Padeža v letih 2006 in 2007.....	72
Slika 4.2: Relativna odstopanja mesečnih količin padavin v letih 2006–2007 napram dolgoletnim povprečnim mesečnim količinam padavin za padavinsko postajo Tatre.....	72

Slika 4.3: Urne intenzitete padavin in vrednosti pretoka v letu 2006.....	73
Slika 4.4: Urne intenzitete padavin in vrednosti pretoka v letu 2007.....	74
Slika 4.5: Povprečne dnevne temperature v letih 2006 in 2007.....	75
Slika 4.6: Drseče povprečje povprečnih dnevni temperatur za obdobja 14 dni za leti 2006 in 2007.....	76
Slika 4.7: Primerjava koncentracij nitratnega dušika, določenih z multiparametrsko sondo in laboratorijsko analizo.....	78
Slika 4.8: Razporeditev merskih profilov na porečju Padeža (levo) in merjene koncentracije nitratnega dušika v posamezni seriji (desno).....	79
Slika 4.9: Dnevne vrednosti indeksa predhodnih padavin za obdobje 3 (IPP3), 7 (IPP7) in 14 (IPP14) predhodnih dni.....	81
Slika 4.10: Padavinski dogodek v marcu.....	82
Slika 4.11: Padavinski dogodek v aprilu.....	82
Slika 4.12: Padavinski dogodek v maju.....	83
Slika 4.13: Padavinski dogodek maj–junij.....	84
Slika 4.14: Padavinski dogodek avgust I.....	85
Slika 4.15: Padavinski dogodek avgust II.....	86
Slika 4.16: Padavinski dogodek avgust III.....	86
Slika 4.17: Padavinski dogodek v novembru.....	87
Slika 4.18: Padavinski dogodek maj I.....	90
Slika 4.19: Padavinski dogodek maj II.....	90
Slika 4.20: Padavinski dogodek v juniju.....	91
Slika 4.21: Padavinski dogodek v avgustu.....	92
Slika 4.22: Padavinski dogodek v septembru.....	92
Slika 4.23 (a–f): Histerezne zanke izbranih prvih poplavnih valov padavinskih dogodkov v letu 2006.....	97
Slika 4.24: Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere v dvigajočem delu prvih hidrogramov.....	98
Slika 4.25: Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere v padajočem delu prvih hidrogramov.....	99
Slika 4.26: Razlike med začetnimi in maksimalnimi koncentracijami nitratnega dušika ter povprečne urne vrednosti temperatur zraka za predhodna obdobja 14 dni za izbrane prve hidrograme.....	100
Slika 4.27: Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere znotraj sestavljenega padavinskega dogodka maj–junij za naraščajoče (levo) in padajoče dele hidrogramov (desno).....	101
Slika 4.28: Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere znotraj sestavljenega padavinskega dogodka avgust I za naraščajoče (levo) in padajoče dele hidrogramov (desno).....	101
Slika 4.29: Histerezna zanka za drugi hidrogram v novembrskem padavinskem dogodku.....	103
Slika 4.30: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku marca.....	105
Slika 4.31: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku aprila.....	105
Slika 4.32: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku maja.....	106
Slika 4.33: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku maj–junij.....	106
Slika 4.34: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku avgust I.....	107
Slika 4.35: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku avgust II.....	107
Slika 4.36: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku avgust III.....	108
Slika 4.37: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v novembrskem padavinskem dogodku.....	108
Slika 4.38: Kronološki pregled opazovanih padavinskih dogodkov in vrednosti indeksa predhodnih padavin v letu 2006.....	110
Slika 4.39: Kronološki pregled opazovanih padavinskih dogodkov in vrednosti indeksa predhodnih padavin v letu 2007.....	111

Slika 4.40: Primerjava povprečnih dnevni temperatur za obdobje 14 predhodnih dni v letih 2006 in 2007.	111
Slika 4.41: Soodvisnost med konico hidrograma odtoka in pretokom v času maksimalne koncentracije nitratnega dušika za izbrane prve hidrograme.	116
Slika 4.42: Soodvisnost med konico hidrograma odtoka in pretokom v času maksimalne koncentracije nitratnega dušika za vse opazovane hidrograme.	116
Slika 4.43: Povezava med deležem nove vode v opazovanih hidrogramih odtoka in dolžino časovnega zamika nastopa maksimalnih koncentracij nitratnega dušika za konicami hidrogramov odtoka.	117
Slika 4.44: Masna bilanca nitratnega dušika, spranega s prispevnega območja Padeža v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006.	118
Slika 4.45: Masna bilanca nitratnega dušika, spranega s prispevnega območja Padeža v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2007.	119
Slika 4.46: Povprečne dnevne vrednosti količine spranega nitratnega dušika v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006.	120
Slika 4.47: Povprečne dnevne vrednosti količine spranega nitratnega dušika v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2007.	120
Slika 4.48a – 4.48g: Zvezne meritve koncentracije nitratnega dušika v obdobjih brez padavin.	122
Slika 4.49: Dnevni cikli odklonov koncentracije nitratnega dušika od srednjih vrednosti koncentracije v posameznem merskem obdobju.	124
Slika 4.50: Dnevni cikli odklonov povprečnih urnih koncentracije nitratnega dušika od srednjih vrednosti koncentracije v posameznem merskem obdobju.	125

5 KONCEPTUALIZACIJA ČASOVNE IN PROSTORSKE DINAMIKE HIDROLOŠKE MOBILIZACIJE NITRATNEGA DUŠIKA S POREČJA

Slika 5.1: Hipotetični prikaz akumulacije nitratnega dušika v profilu gozdnih tal v sušnem obdobju.	130
Slika 5.2: Hipotetični prikaz spremembe vsebnosti nitratnega dušika v talnem profilu v času padavinskega dogodka.	132
Slika 5.3: Shematski prikaz procesa spiranja nitratnega dušika iz talnih horizontov v času padavinskega dogodka.	135
Slika 5.4: Prostorska razporeditev vrednosti topografskega indeksa na prispevnem območju Padeža gorvodno od merskega mesta Padež03.	136
Slika 5.5: Hipotetičen primer prostorske razsežnosti zasičenih območij znotraj obravnavanega prispevnega območja v sušnih obdobjih.	137
Slika 5.6: Hipotetičen primer prostorske razsežnosti zasičenih območij znotraj obravnavanega prispevnega območja v obdobjih padavinskih dogodkov.	138

6 RAZVOJ MODELA

Slika 6.1: Urni podatki za leto 2006.	149
Slika 6.2: Velikost modelnih dreves v odvisnosti od števila primerov v listu.	149
Slika 6.3: Napovedna uspešnost modelnih dreves (vrednosti RMSE in r).	150
Slika 6.4: Napovedna uspešnost modelnih dreves (vrednosti srednje absolutne napake, relativne absolutne napake in napake RRSE).	151
Slika 6.5: Delite podatkovnega nabora koncentracij nitratnega dušika na podlagi klasičinskih kriterijev 1. in 2. nivoja delitve v modelnem drevesu MD125.	153
Slika 6.6: Merjene koncentracije nitratnega dušika napram koncentracijam, napovedanim z modelnim drevesom MD125.	153
Slika 6.7: Primerjava merjenih koncentracij nitratnega dušika in koncentracij, napovedanih z modelnim drevesom MD125.	155

Slika 6.8: Merjene koncentracije nitratnega dušika v letu 2007 napram koncentracijam, napovedanim z modelnim drevesom MD125.....	158
Slika 6.9: Primerjava merjenih koncentracij nitratnega dušika v letu 2007 in koncentracij, napovedanih z modelnim drevesom MD125.....	159
Slika 6.10: Nabor urnih podatkov za vsa merska obdobja.....	163
Slika 6.11: Velikost modelnih dreves v odvisnosti od števila primerov v listu.....	163
Slika 6.12: Napovedna uspešnost modelnih dreves (vrednosti RMSE in r).....	164
Slika 6.13: Napovedna uspešnost modelnih dreves (vrednosti srednje absolutne napake, relativne absolutne napake in napake RRSE).....	164
Slika 6.14: Število klasifikacijskih pravil v odvisnosti od števila primerov v posameznem klasifikacijskem pravilu.....	166
Slika 6.15: Napovedna uspešnost nizov klasifikacijskih pravil (vrednosti RMSE in r).....	167
Slika 6.16: Merjene koncentracije nitratnega dušika napram koncentracijam napovedanim z nizom klasifikacijskih pravil KP600.....	169
Slika 6.17: Primerjava merjenih koncentracij nitratnega dušika v letih 2006 in 2007 ter koncentracij, napovedanih z nizom klasifikacijskih pravil KP600.....	171
Slika 6.18: Pretočne razmere, merjene in napovedane koncentracije nitratnega dušika znotraj celotnega obdobja leta 2006.....	172
Slika 6.19: Pretočne razmere, merjene in napovedane koncentracije nitratnega dušika znotraj celotnega obdobja leta 2007.....	172
Slika 6.20: Deleži letne masne bilance spranega nitratnega dušika po posameznih mesecih v letu 2006.....	173
Slika 6.21: Deleži letne masne bilance spranega nitratnega dušika po posameznih mesecih v letu 2007.....	174
Slika 6.22: Deleži letne masne bilance odtoka vode po Padežu za posamezne mesece v letu 2006..	174
Slika 6.23: Deleži letne masne bilance odtoka vode po Padežu za posamezne mesece v letu 2007..	175

KAZALO PREGLEDNIC

3 METODE

Preglednica 3.1: Podrobnejši opis talnega profila na območju Padeža po posameznih talnih horizontih	46
Preglednica 3.2: Rezultati laboratorijske analize talnih vzorcev odvzetih na različnih globinah talnega profila	49
Preglednica 3.3: Karakteristike merske opreme na prispevnem območju Padeža. Delež površine prispevnega območja (*), ki ga pokriva posamezen dežemer, je določen s Thiessenovimi poligoni. ...	57

4 REZULTATI

Preglednica 4.1: Karakteristike hidrogramov odtoka znotraj opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006	88
Preglednica 4.2: Karakteristike hidrogramov odtoka znotraj opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2007	94
Preglednica 4.3: Karakteristični časi T_k v [h] in T_z v [h] za hidrograme opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006	114
Preglednica 4.4: Karakteristični časi T_k v [h] in T_z v [h] za hidrograme opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2007	114

6 RAZVOJ MODELA

Preglednica 6.1: Nabor atributov, uporabljenih pri generiranju modelnih dreves z algoritmom M5. 147	
Preglednica 6.2: Shematski prikaz modelnega drevesa MD125 (levo) in seznam linearnih regresijskih enačb (modelov), ki se nahajajo v listih	152
Preglednica 6.3: Nabor atributov, uporabljenih pri analizi celotnega nabora meritev z uporabo algoritma M5	162
Preglednica 6.4: Shematski prikaz modelnega drevesa MD600 (levo) in seznam linearnih regresijskih enačb (modelov), ki se nahajajo v listih	165
Preglednica 6.5: Nabor niza klasifikacijskih pravil KP600 in seznam linearnih regresijskih enačb (modelov), ki napovedujejo primere znotraj posameznega pravila	168

1 UVOD

1.1 SPLOŠNI PREGLED

Načrtovanje sodobnega, celostnega urejanja in gospodarjenja z vodami pomeni usklajevanje varstva in rabe voda ter obvodnega prostora. S tega vidika upravljanje voda ne more biti usmerjeno zgolj v območja strug vodotokov in ozkih koridorjev obvodnih zemljišč. Sonaravno in trajnostno gospodarjenje z vodotoki zahteva poznavanje medsebojne povezanosti med vodnimi zemljišči in obvodnimi (priobalnimi) površinami ter procesi, kateri se odvijajo na celotnem prispevnem območju (porečju) vodotoka (Fogg in Wells, 1998). Okoljski cilji Direktive Evropskega parlamenta in Sveta o določitvi okvirja za ukrepanje Evropske skupnosti na področju politike do voda predvidevajo izboljšanje ekološkega stanja vodotokov do leta 2015 (Directive 2000/60/EC). Poznavanje in razumevanje razmer v vodotoku kot posledica širšega dogajanja v porečju ima za načrtovanje vodnogospodarskega upravljanja ter planiranja ukrepov za izboljšanje ekološkega stanja vodotokov tako še večji pomen.

Takšen pogled z znanstvenega vidika odpira povsem nova vprašanja glede celostnega razumevanja ekoloških procesov na različnih prostorskih in časovnih nivojih. Rečni ekosistem predstavlja prostorski okvir, znotraj katerega se odvijajo intenzivni procesi transporta snovi in energije (Stanford, 1996). V poteku spoznavanja in analiziranja teh procesov je treba preseči okvire razumevanja mehanske in fizične stabilnosti posameznih komponent ter se usmeriti v obravnavanje variabilnosti in kompleksnosti ekološke dinamike rečnih ekosistemov kot celote (Hillman in Brierely, 2005). V tem kontekstu predstavlja spremljanje hidroloških odzivov prispevnih površin vodotoka na padavinske pojave ter vpliva teh odzivov na kemizem vode v vodotoku kot posledico spreminjajočih se biogeokemijskih razmer na prispevnih površinah vodotoka poskus celostne obravnave ekosistema v smislu prostorske razsežnosti (porečje) ali prevladujoče rabe površin (npr. gozd).

Procesi biogeokemijskih pretvorb in transporta hranil na nivoju posameznih prostorskih in ekosistemskih enot so že vrsto let predmet raziskav znanstvenikov z različnih znanstvenih področij. Ob tem je dušik zaradi splošne okoljske razširjenosti in kritične vloge kot dejavnik biološke produkcije bil, in prav gotovo bo tudi v prihodnje, deležen posebne pozornosti (Vitousek et al., 1997). Dušik je za ogljikom, vodikom in kisikom najbolj razširjen element na Zemlji, je osnovna komponenta aminokislin, ki predstavljajo gradnike beljakovin. Dušik najdemo pretežno v atmosferi (4×10^{21} g N), sedimentih (5×10^{20} g N), oceanih ($2,3 \times 10^{19}$ g N), tleh (3×10^{17} g N) in zemeljski biomasii ($1,3 \times 10^{16}$ g N), (Binkley, 2000, povzeto po Reeburgh, 1997). Razumevanje dinamike obtoka dušika v okolju omogoča napovedovanje vplivov okoljskih sprememb na spremenjena količinska razmerja dušikovih spojin kot posledico antropogenih dejavnosti, med katerimi imajo nedvomno ključno vlogo kmetijstvo, industrija ter urbanizacija (Seitzinger et al., 2002; Goodale et al., 2002; Soulsby et al., 2002; Turner et al., 2003).

Dušikove spojine v okolju so za organizme različno uporabne in dostopne ter, v odvisnosti od kemijske sestave, raznoliko mobilne. Poglavitni medij transporta dušikovih spojin v terestričnem okolju je voda, s tem pa je dinamika kroženja dušikovih spojin in intenziteta njihovih kemijskih sprememb neposredno vezana na gibanje vode. Poznavanje hidroloških kontrolnih mehanizmov vodnega toka v smislu tvorbe padavinskega odtoka tako omogoča sledenje transporta dušikovih spojin ter posledično sklepanje o časovnih in prostorskih trendih biogeokemijskih transformacij dušikovih spojin. Razumevanje interakcije med hidrološkimi in biogeokemijskimi dejavniki, ki kontrolirajo transport dušikovih spojin, zahteva podrobno, usklajeno spremljanje hidroloških odzivov ter rezultirajočih sprememb kemizma vode in vsebnosti dušikovih spojin. Znanstvena vrednost sicer maloštevilnih dolgotrajnih, zveznih študij biogeokemijskih odzivov posameznih ekosistemov, podprtih s hidrološkimi meritvami, je s tega vidika še toliko večja (Likens in Bormann, 1995). Za razumevanje in opredelitev vpliva spremenjenih količinskih razmerij znotraj dušikovega obtoka v okolju na ekosistemske procese v različnih prostorskih in časovnih okvirjih predstavlja spremljanje količin spranega dušika z naravnih, gozdnatih območij brez izrazitih antropogenih vplivov osnovne informacije, na podlagi katerih je možna primerjava razmer z območji s povečanim vnosom dušika (Goodale et al., 2001).

Za opredelitev hidroloških kontrol mobilnosti dušikovih spojin so najbolj zanimive tiste dušikove spojine, ki so v vodi dobro topne, se pojavljajo v merljivih koncentracijah, obenem pa je njihova biogeokemijska stabilnost v okolju dovolj velika. S tem je omogočeno sledenje njihovega transporta ob spremenjenih hidroloških pogojih z možnostjo kratkotrajne izključitve vpliva biogeokemijskih pretvorb na vsebnost posamezne kemijske oblike dušika v vodi. Raziskave vpliva hidroloških razmer na spiranje dušika s prispevnih površin vodotokov so se usmerile predvsem v analizo variabilnosti koncentracij neorganskih kemijskih oblik v vodi raztopljenega dušika, predvsem nitratnega dušika in dušika, vezanega v amonijevem ionu, ki predstavljata večino raztopljenega neorganskega dušika v vodi.

1.2 HIPOTEZA

Hipoteza, ki jo preverja disertacija, je, da imajo hidrološke razmere znotraj sezonskih biogeokemijskih okvirjev pomemben vpliv na dinamiko sproščanja hranil v porečjih. Na manjšem eksperimentalnem prispevnem območju s prostorsko enovitimi hidrogeološkimi in pedološkimi razmerami ter rabo površin je možno na podlagi zveznih časovnih meritev hidroloških razmer in kemizma vode v vodotoku z veliko časovno frekvenco zajema podatkov opredeliti hidrološke mehanizme, ki kontrolirajo sproščanje hranil s porečja. Na ta način je omogočena realnejša ocena količin hranil, ki se s prispevnih območij s specifično rabo površin (gozd) sprostijo v vodotoke.

1.3 CILJI

Cilji naše raziskave dinamike sproščanje nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja so bili naslednji:

- 1) Analizirati časovno dinamiko spiranja raztopljenega neorganskega dušika v vodi (nitratnega dušika) v času spremenjenih hidroloških pogojev, torej v obdobjih padavinskih dogodkov.
 - 2) Opredeliti hidrološke kontrolne mehanizme, ki uravnavajo spiranje nitratnega dušika z gozdnatih prispevnih površin v vodotok.
 - 3) Opredeliti interakcije med sezonsko spremenljivostjo biogeokemijskih transformacij nitratnega dušika in spremenljivostjo hidroloških pogojev v času posameznih padavinskih dogodkov.
 - 4) Na podlagi opazovane dinamike nitratnega dušika opredeliti mobilizacijo in spiranje nitratnega dušika z vidika časovne in prostorske spremenljivosti procesov.
 - 5) Izgradnja modela spiranja nitratnega dušika z obravnavanega prispevnega območja, ki bo omogočal napovedovanje časovne dinamike spiranja nitratnega dušika v odvisnosti od spreminjajočih se hidroloških in sezonskih biogeokemijskih razmer.
 - 6) Pridobiti vpogled v bilanco »naravnega ozadja« količin nitratnega dušika, ki se spirajo z gozdnatega porečja.
-

1.4 METODOLOŠKA IZHODIŠČA

Poznavanje procesov tvorbe padavinskega odtoka je temelj konceptualnega razumevanja transporta v vodi raztopljenih snovi. Namen prvega dela raziskave (2. poglavje) je bil podati pregled nad potencialnimi hidrološkimi kontrolnimi mehanizmi transporta raztopljenih neorganskih dušikovih spojin z gozdnih površin. Hidrološki kontrolni mehanizmi uravnavajo zadrževalne čase padavinskega odtoka, s tem interakcijski čas med padavinskim odtokom in produkti biogeokemijskih transformacij v talnih horizontih ter znotraj samega vodnega telesa (vodotoka). V okvir teoretičnih osnov smo vključili rezultate obstoječih raziskav transporta raztopljenega neorganskega dušika (večinoma kot nitratnega dušika) z gozdnatih območij pod vplivom spremenjenih hidroloških razmer. Z namenom razumevanja kompleksnosti vzajemnih hidroloških kontrol in biogeokemijskih transformacij dušikovih spojin v gozdu zajema pregled nad obstoječimi raziskavami tako raziskovalno delo, ki je usmerjeno v ozek hidrološki vidik tvorbe padavinskega odtoka z gozdnatih prispevnih območij, kot tudi raziskave, katerih namen je opredeliti dinamiko naravnih in antropogeno pogojenih sprememb biogeokemijskega obtoka dušika v gozdu.

Izkušnje, pridobljene s spremljanjem hidrološko pogojene dinamike kemizma vode v urbanih vodotokih na območju mesta Ljubljane (Glinščica, Mali graben, Ljubljanica), kjer smo monitoring kemizma vode izvajali med letoma 2003 in 2005 (Brilly et al., 2004; Brilly et al., 2006), smo uporabili pri vzpostavitvi hidrološkega in biogeokemijskega monitoringa na izbranem eksperimentalnem območju potoka Padež, ki ga pokriva gozd. Ključni kriteriji pri izbiri eksperimentalnega območja so bili raba površin, velikost eksperimentalnega porečja, geološka in pedološka enovitost ter hidrološka odzivnost. Hidrološki monitoring smo dopolnili s periodičnimi zveznimi meritvami kemizma vode v vodotoku. Ob tem je bila frekvenca zajema podatkov o kemizmu vode (temperaturi, pH-vrednosti, vsebnosti kisika, elektroprevodnosti, skupni količini raztopljenih snovi) ter koncentraciji nitratnega dušika enaka frekvenci zajema hidrometeoroloških podatkov. Kontinuirane meritve so potekale tako v obdobjih padavinskih dogodkov kot tudi v daljših, hidrološko »nezanimivih« obdobjih brez večjih količin padavin. Podrobneje je obravnavano prispevno območje potoka Padež s sistemom hidrološkega monitoringa, predstavljeno v 3. poglavju.

Velika časovna ločljivost hidroloških podatkov, ki je bila podprta s podatki o kemizmu vode ter podatki o koncentraciji raztopljenega nitratnega dušika, nam je omogočila analizo in razumevanje mehanizmov tvorbe padavinskega odtoka v času posameznih padavinskih dogodkov. Z vidika spremljanja masnih bilanc raztopljenih snovi v vodi so nam hidrološki podatki (količina padavin, pretok v vodotoku) omogočili opredelitev količin spranih raztopljenih snovi v obdobjih posameznih padavinskih dogodkov, obenem pa smo zvezne nize podatkov o koncentracijah raztopljenih snovi v padavinskem odtoku uporabili za opredelitev hidroloških mehanizmov, ki uravnavajo procese tvorbe padavinskega odtoka. Rezultati meritev ter analize pridobljenih podatkov, ki predstavljajo osrednji del naloge, so predstavljeni v 4. poglavju. Na podlagi analize podatkov smo v 5. poglavju procesno in konceptualno uokvirili dinamiko mobilizacije nitratnega dušika z obravnavanega gozdnatega prispevnega območja.

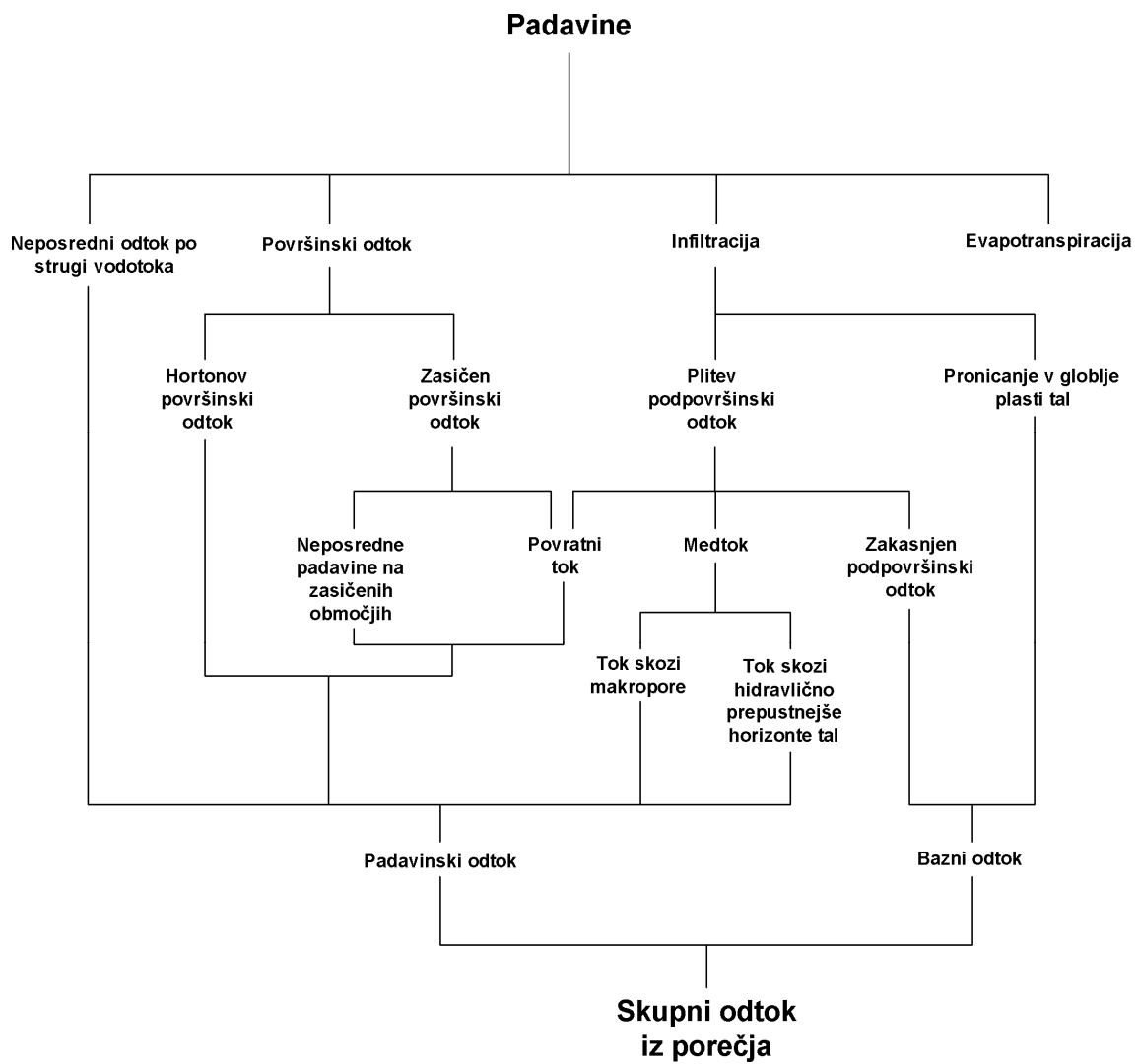
Pridobljeno domensko poznavanje pogojev, ki kontrolirajo dinamiko spiranja nitratnega dušika z gozdnatega porečja, smo v 6. poglavju upoštevali pri izgradnji modela, ki smo ga uporabili za napovedovanje odziva koncentracije nitratnega dušika v vodotoku na spremenljive hidrološke in sezonske biogeokemijske razmere na prispevnem območju ter v nadaljnji fazi za opredelitev masne bilance spranega nitratnega dušika z gozdnatega porečja v opazovanem obdobju. Model spiranja nitratnega dušika smo pridobili s pomočjo metode rudarjenja po podatkih, ki omogoča generiranje modelnih dreves oz. nizov klasifikacijskih pravil.

2 TEORETIČNE OSNOVE

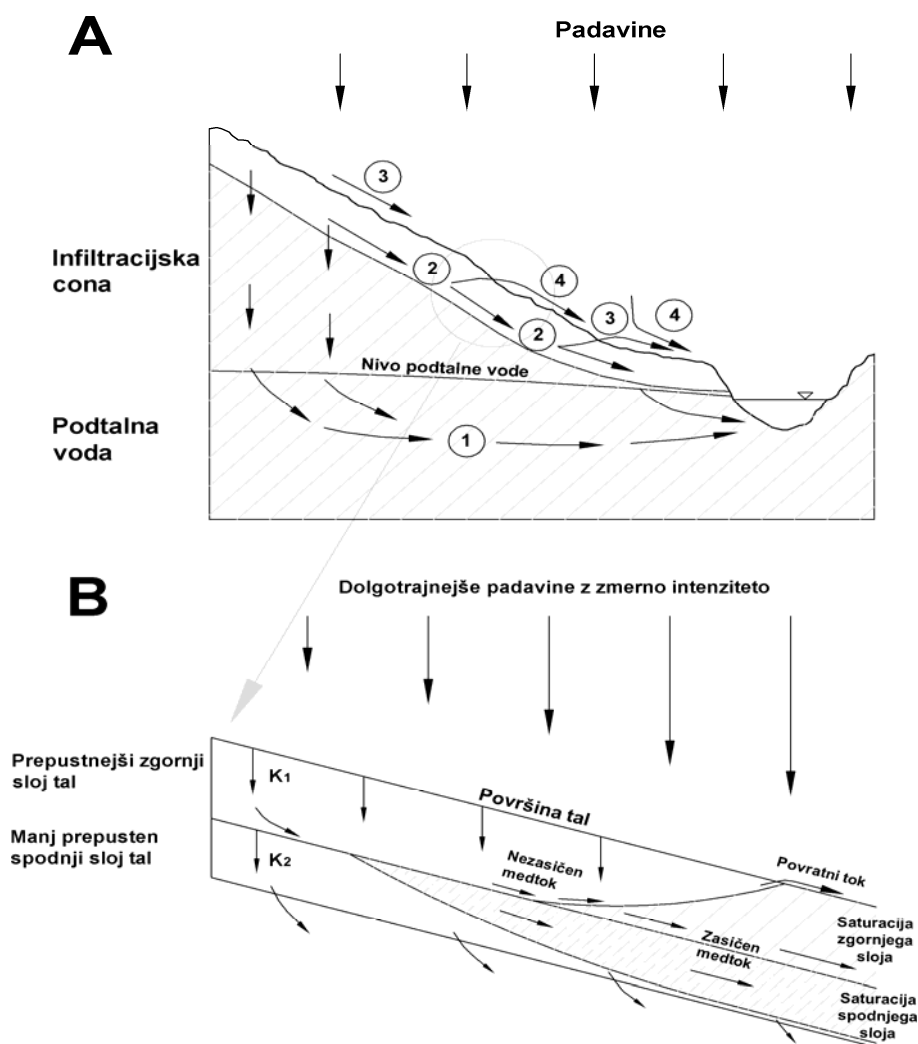
2.1 MEHANIZMI TVORBE PADAVINSKEGA ODTOKA

Raziskave časovnih in prostorskih odzivov odtoka v vodotokih na padavinske pojave so povezane z ugotavljanjem pomena različnih procesov tvorbe in poti stekanja padavinskega odtoka. Prostorska variabilnost formiranja padavinskega odtoka je posledica sprememb v lokalni topografiji terena, sestavi vegetacijskega pokrova, značilnosti zemljine in geoloških karakteristik, tako med porečji kot tudi znotraj obravnavanih prispevnih površin vodotoka (Kirkby, 1993). Časovna porazdelitev padavinskega odtoka je odvisna od zgoraj naštetih dejavnikov, obenem pa je treba skladno upoštevati še časovne okvirje trajanja in intenzitete padavin, z njimi povezanih padavinskih izgub ter predhodnih vlažnostnih razmer v tleh (Knighton, 1998). Razvitih je bilo več hidroloških hipotez, katerih namen je bil prispevati h konceptualnemu razumevanju mehanizmov, pod vplivom katerih se odtok odzove na padavinski dogodek. Na sliki 2.1 je prikazan shematski diagram mehanizmov tvorbe odtoka s porečja.

Osnova za večino hidroloških hipotez tvorbe padavinskega odtoka, ki so predstavljene v nadaljevanju, so številne hidrološke študije in eksperimenti na različnih prostorskih hidroloških enotah. Študije vključujejo analize posameznih plotov ali pobočij (mikrohidrološke prostorske enote) ter obširnejših prispevnih območij oz. porečij različnih velikosti (mezo- in makrohidrološke prostorske enote). V povezavi z različnimi eksperimentalnimi prostorskimi enotami se pojavljajo problemi prostorskih ekstrapolacij ugotovljenih hidroloških karakteristik (Quinn, 2004). Potencialne poti stekanja padavinskega odtoka na prostorskem nivoju pobočja so prikazane na sliki 2.2.



Slika 2.1: Shematski diagram mehanizmov tvorbe skupnega odtoka iz porečja (povzeto po Knighton, 1998).
Figure 2.1: Schematic diagram of total runoff formation mechanisms from a watershed (adapted after Knighton, 1998).



Slika 2.2(A): Potencialne poti odtoka padavinske vode (1 – podtalna voda; 2 – medtok; 3 – Hortonov površinski odtok; 4 – saturiran površinski odtok kot kombinacija povratnega toka in neposrednega padavinskega odtoka z zasičenih območij). Nešrafirano območje predstavlja bolj prepustne plitve talne horizonte, šrafirano območje manj prepustna globlja tla (povzeto po Knighton, 1998).

Slika 2.2(B): Shematski prikaz tvorbe plitvega podpovršinskega toka in zasičenih razmer v dveh talnih horizontih z različnima hidravličnima prepustnostma, kjer je $K_1 > K_2$ (povzeto po Knighton, 1998).

Figure 2.2(A): Potential pathways of rainfall runoff (1 – Groundwater; 2 – Throughflow; 3 – Horton overland flow; 4 – Saturated overland flow as a combination of return flow and rainfall runoff from saturated areas).

Unshaded area represents more permeable shallow soil horizons, shaded area represents less permeable subsoils (adapted after Knighton, 1998).

Figure 2.2(B): Schematic representation of shallow subsurface flow and saturated areas formation in two soil horizons of contrasting hydraulic conductivity where $K_1 > K_2$ (adapted after Knighton, 1998).

2.1.1 Hortonov površinski odtok

Eno prvih pomembnejših teorij formiranja površinskega padavinskega odtoka, ki upošteva presežek intenzitete padavin nad sposobnost infiltracije zemljine kot ključni mehanizem

formiranja padavinskega odtoka, je predlagal Horton (1933). Padavinska voda v celoti pronica v zemljino, ko je intenziteta padavin manjša od intenzitete infiltracije vode v zemljino. Karakteristike infiltracije vode v zemljino so variabilne tako v prostorskem kot tudi v časovnem smislu. Infiltracijska kapaciteta zemljine se med padavinskim dogodkom običajno zmanjšuje zaradi površinske konsolidacije zemljinskih agregatov pod vplivom udarcev dežnih kapelj, spiranja drobnih zrn zemljine v pore in nabrekanja z vodo zasičenih, predvsem glinenih delcev zemljine (Knighton, 1998). Pogoj za pojav Hortonovega toka (intenziteta padavin $>$ intenziteta infiltracije) je torej običajno izpolnjen šele po določeni časovni zakasnitvi od začetka padavinskega dogodka. Hortonov mehanizem tvorbe padavinskega površinskega odtoka je pogost na aridnih in semiaridnih območjih, kjer se pojavljajo kratkotrajne padavine z veliko intenziteto, površine, po katerih se vrši odtok, pa so večinoma brez obsežnejšega vegetacijskega pokrova. V gozdu se zaradi vpliva višje vegetacije, podrasti in humusnega horizonta tal Hortonov površinski odtok pojavi zelo redko (Knighton, 1998).

2.1.2 Zasičen površinski odtok

Hewlett (1961); (cit. po Hibbert in Troendle, 1988) je predlagal alternativno in, glede na različne pojavne oblike hidroloških razmer, širše sprejemljivo hipotezo tvorbe površinskega odtoka. Površinski padavinski odtok se pojavi, ko padavine padejo na območja, ki so predhodno že postala zasičena z vodo. V teh razmerah se padavine najprej infiltrirajo v tla in na ta način povzročijo dvig zasičenega (saturiranega) nivoja tal (nivoja talne vode) proti površju. Kjer nivo talne vode doseže površje, pride ob dodatnih padavinah na teh območjih do t. i. zasičenega površinskega odtoka. Ta je kombinacija iztisnjene talne vode (t. i. povratnega toka) in neposrednega površinskega odtoka, ki ga tvorijo padavine, ki so padle na zasičena območja.

Zasičena območja kot predpogoj za nastanek zasičenega površinskega odtoka se pojavljajo, kjer je nivo talne vode plitvo pod površjem tal. Z nadaljevanjem padavinskega dogodka se površina zasičenih območij dinamično spreminja. Hewlett in Hibbert (1967) sta to spremenljivost površine zasičenih območij opisala kot »*koncept variabilnih virov*«. Variabilna območja zasičenega površinskega odtoka se ne pojavljajo zgolj na območjih v neposredni bližini vodotokov, kjer je nivo talne vode običajno blizu površju tal, ampak

povsod, kjer pride do zadostne konvergenca tokov vode v tleh, ki privede do dviga zasičene cone na površje tal. Variabilna območja zasičenega površinskega odtoka se tvorijo na (Moldan in Černy, 1994):

- Konkavnih pobočjih, kjer konvergenca tokov vode v tleh privede do podpovršinskih tokov, ki presežejo lateralno hidravlično prevodnost tal. Podtalna voda priteče na ta območja v večjih količinah, kot so jih tla sposobna prevesti dolvodno.
- Predelih pobočij, kjer pride do spremembe gradienta površja ob predpostavki, da tokovi vode v tleh približno sledijo gradientu površja tal.
- Predelih pobočij, kjer je zaradi zmanjšane debelina vodoprepustnejših horizontov tal zmanjšana zadrževalna sposobnost vode v tleh in njena hidravlična transmisivnost.

Poleg zgoraj omenjenih topografskih in pedoloških dejavnikov imajo bistveno vlogo pri tvorbi variabilnih virov zasičenega površinskega odtoka v času padavinskega dogodka še predhodne vlažnostne razmere v tleh in lastnosti padavin.

2.1.3 Podpovršinski tok

S hidrološkimi raziskavami je bilo ugotovljeno, da predstavlja podpovršinski odtok v veliki večini primerov glavni delež padavinskega odtoka z gozdnatih porečij, ob tem pa ostajajo razlage specifičnih poti, zadrževalnih in odzivnih časov padavinskega odtoka zelo različne in mnogokrat nejasne (Becker et al., 1999, Uhlenbrook et al., 2003). Nekonsistentnost razlag mehanizmov tvorbe padavinskega odtoka ni zgolj posledica razlik v hidroloških razmerah na eksperimentalnih porečjih, ampak predvsem nezmožnosti merljivosti in izolacije posameznih komponent padavinskega odtoka (Uhlenbrook et al., 2002).

Konceptualno razumevanje mehanizmov, odgovornih za tvorbo podpovršinskega odtoka, v osnovi loči podpovršinski tok na dve komponenti, in sicer plitev podpovršinski tok vode skozi zgornje horizonte tal, ki so običajno v času brez padavin nenasičeni z vodo, in globlji tok podtalne vode, ki se vrši v večinoma permanentno saturirani coni tal. Z namenom razlage hitre odzivnosti podpovršinskih tokov na padavinske dogodke je bilo predlaganih nekaj mehanizmov, ki naj bi bistveno kontrolirali formacijo podpovršinskega toka s preusmeritvijo padavinskega podpovršinskega odtoka po t.i. preferenčnih odtočnih poteh. Med te mehanizme se uvršča sistem makropor v tleh (Brammer in McDonnell, 1996; Sidle et al.,

2001), mreža strukturnih razpok med različnimi geološkimi formacijami (Onda et al., 2001) ter spremenljivost hidravličnih lastnosti talnih horizontov (McNamara et al., 2005).

Spremenljivost hidravličnih lastnosti talnih horizontov se odraža predvsem v spremenjeni vertikalni infiltracijski sposobnosti. Padavine se infiltrirajo skozi talne horizonte, ob tem pa se hidravlična prevodnost talnih horizontov z globino običajno manjša. Ko infiltrirajoča voda doseže horizont, ki bistveno omejuje nadaljnjo vertikalno infiltracijo padavin, se odtok padavinske vode preusmeri lateralno, torej vzporedno s slojem manj prepustnega talnega horizonta. Takšen način gibanja padavinskega odtoka se imenuje medtok (Kirkby in Chorely, 1967). Bistveni element, s katerim opišemo lastnosti takšnega plitvega podpovršinskega odtoka padavin, je lateralna hidravlična transmisivnost tal. Medtok se lahko pojavi, preden pride do stika med infiltrirajočimi padavinami in globljo saturirano cono tal, kjer se nahaja podtalna voda. Bistvena razlika med medtokom in globljim podpovršinskim tokom vode je v njegovi večji hitrosti in izrazitejši usmerjenosti proti vodotoku, s čimer je možno opis gibanja medtoka navezati na topografske karakteristike površja. Medtok se vrši zlasti v A horizontu in globljih delih organskih horizontov tal (Ritter et al., 2002).

Upoštevanje hitrega stekanja podpovršinskega odtoka ima pomembno vlogo v konceptu variabilnih virov zasičenega površinskega odtoka. Prilagajanje variabilnih virov zasičenega odtoka tekom padavinskega dogodka in tvorba zasičenega površinskega odtok se vrši zelo hitro v odvisnosti od dodatne količine padavin in na ta način prispeva k hitrem povečanju skupnega odtoka s prispevnega območja. Za razlago hitrega odziva zasičenega površinskega odtoka na padavinski dogodek je bil predlagan koncept translatornega podpovršinskega toka, ki se nanaša na opis toka podtalne vode v globljih, saturiranih predelih tal. Ob tem se lateralno premeščanje vode v tleh iz obdobja pred padavinskim dogodkom (t. i. stara voda) vrši pod vplivom dodatnih količin infiltriranih padavin (t. i. nova voda). Vsak nov časovni prirastek količine padavin vpliva na lateralno mobilizacijo vseh predhodno infiltriranih padavin dolvodno po pobočju proti vodotoku (Hibbert in Troendle, 1988). Pojav takšne tvorbe translatornega podpovršinskega toka vode je vprašljiv z vidika variabilnosti debeline transmisivnih horizontov tal ter zahteve po nepretrgani saturirani coni tal od vodotoka gorvodno po pobočju. Hidrološke raziskave so pokazale, da je mehanizem translatornega toka

učinkovit na pobočjih z zmernimi nagibi v času dolgotrajnejših padavin, ko je izpolnjen pogoj kontinuitete zasičenosti tal po pobočju (Moldan in Černy, 1994).

Soroden poskus razlage mehanizma tvorbe zasičenega površinskega odtoka je hipoteza, ki predvideva upoštevanje spremenjenih kapilarnih razmer v tleh pod vplivom padavinske vode. V nižjih predelih pobočij pride pod vplivom infiltriranih padavin gorvodno na pobočju do povečanja pornih tlakov v tleh, s čimer se kapilarna cona tal hitro zapolni z vodo in privede do zasičenja celotnega profila tal že ob zelo majhni dodatni količini padavin. Vpliv kapilarne cone na hiter dvig saturiranega nivoja tal do površja je zlasti izrazit na območjih, kjer je nivo talne vode plitvo pod površjem. Razporeditev teh območij posledično v veliki meri vpliva na formiranje hidrograma odtoka (Ward in Elliot, 1995).

Hidrološke raziskave padavinskega odtoka se v zadnjem času poslužujejo intenzivne uporabe okoljskih kemijskih sledil ter stabilnih izotopov nekaterih elementov (večinoma kisika in vodika). Meritve koncentracij sledil v posameznih komponentah padavinskega odtoka (neposrednih padavinah, baznem ali sušnem odtoku ter odtoku v času konic poplavnih valov) kažejo velik, pogosto prevladujoč delež vode iz obdobj pred nastopom padavinskega dogodka (t. i. stare vode) v primerjavi z deležem »neposrednega« površinskega padavinskega odtoka (t. i. nove vode). Sklash in Farvolden (1979) sta zato predlagala drugačen mehanizem za razlago hitrega odziva podtalne vode na dotekajoče padavine. Njuna hipoteza sloni na dejstvu, da je v bližini vodotokov nivo saturirane cone plitvo pod nivojem tal v primerjavi s primanjkljaji vlažnosti na višjih predelih pobočij. Kmalu po infiltraciji dodatnih količin vode se zasičen talni nivo obrežnih območjih dvigne proti površju tal, tvori t. i. greben podtalne vode in poveča hidravlični gradient podtalne vode proti vodotoku. Na ta način je omogočen večji odtok podtalne vode proti vodotoku že v zgodnji fazi padavinskega dogodka.

2.2 ZADRŽEVALNI ČAS PADAVINSKEGA ODTOKA

Odtok vode po vodotoku je mešanica različnih virov padavinskega odtoka z različno starostjo oz. zadrževalnim časom in je odraz preteklega časovne razporeditve padavinskih dogodkov. V vsaki točki vzdolž poti padavinskega odtoka je zadrževalni čas definiran kot čas, ki je potekel, odkar je vodni delec dosegel prispevno območje vodotoka (Andersson in Lepisto, 1998). Časovni okvir, znotraj katerega se voda zadržuje na prispevnem območju, je eden osnovnih deskriptorjev, ki združuje informacije o količinah zadržane vode in obliki padavinskega odtoka ter predstavlja integracijo lastnosti formiranja padavinskega odtoka po različnih poteh. Zadrževalni čas je fizično merilo, ki presega prostorsko merilo porečja v smislu prilagodljivosti različnim prostorskim hidrološkim dimenzijam, obenem pa je neposredno povezan z internimi procesi, ki se odvijajo na prispevnem območju (Sivapalan, 2003). Zadrževalni čas padavinskega odtoka opisuje, kako prispevne površine zavirajo in pospešujejo padavinsko vodo in v njej raztopljene snovi, ki so produkt biogeokemijskih krogotokov ali prisotnosti onesnažil v tleh. Daljši zadrževalni časi pomenijo daljši stik med vodo in tlemi ter na ta način omogočajo potek intenzivnejšega raztapljanja in biogeokemijskih reakcij v času, ko se padavine stekajo s prispevnega površja proti iztoku (Burns, 1998). Kvantifikacija zadrževalnih časov in njihova distribucija torej omogoča vpogled v vzajemno delovanje hidrološkega in biogeokemijskega sistema ter občutljivost tega sistema na antropogene vplive (Alexander et al., 2002; Pardo et al., 2004; Eshleman et al., 2004).

2.2.1 Okoljska sledila

Spremljanje zadrževalnih časov padavinskega odtoka se je razvilo predvsem z vpeljavo meritev koncentracij različnih okoljskih sledil, ki jih lahko najdemo z zaznavanjem dovolj različnih vsebnosti teh sledil v posameznih komponentah padavinskega odtoka (padavinah, snežni odeji, baznem odtoku itd.). Hidrologija sledil običajno ločuje tri časovne parametre (Becker et al., 1999):

- *Zadrževalni čas*: Čas, ki je potekel od vstopa sledila v hidrološki sistem do trenutka, ko je sledilo prisotno v sistemu.
 - *Potovalni čas*: Čas med vtokom sledila v hidrološki sistem in njegovim iztokom.
-

- *Izmenjevalni čas*: Čas, potreben za izmenjavo celotnega mobilnega volumna hidrološkega sistema.

Najpogosteje se kot sledilo uporablja izotope kisika in vodika, ki so del molekule vode (^{18}O , ^2H in ^3H). Uporaba vodnih izotopov omogoča časovno opredelitev starosti vode (ločitev odtoka na nov, padavinski del odtoka) in del odtoka, ki ga predstavlja voda iz obdobj pred padavinami (podtalna voda in preostala voda v zemljini), opredelitev prostorskih poti stekanja padavinske vode pa je pogosto vprašljiva in večinoma ostaja nejasna. Podobne omejitve veljajo tudi pri uporabi drugih geokemijskih sledil, kot npr. silikatnega, kloridnega in bromidnega iona ter fizikalnih in kemijskih karakteristik vode (temperatura, elektroprevodnost, pH-vrednost). Kvalitetno opredelitev prostorske variabilnosti padavinskega odtoka se doseže predvsem s kombiniranjem različnih sledil.

Okoljska sledila so se izkazala kot zelo uporabno orodje hidroloških raziskav in njihova uporaba je v zadnjem času nedvomno veliko prispevala k novim razsežnostim razumevanja hidroloških procesov; od določitve starosti podtalne in površinske vode, ločitve komponent hidrograma odtoka pa vse do poskusov opredelitve poti padavinskega odtoka s prispevnih območij (Burns, 2002). Spremljanje okoljskih sledil je omogočilo boljše interpretacijo hidroloških procesov na nivoju celotnega porečja, ki zgolj na podlagi ekstrapolacije rezultatov z manjših eksperimentalnih ploskev ni mogoča. Po drugi stran pa je prav uporaba okoljskih sledil na različnih hidroloških prostorskih nivojih razkrila kompleksnost in spremenljivost hidroloških razmer ter s tem dodatno izpostavila problem prostorskega prenosa določenih hidroloških predpostavk in omejitve pri konceptualnem razumevanju procesov tvorbe padavinskega odtoka zgolj na podlagi spremljanja sledil.

Za interpretacijo rezultatov meritev vnosa sledil (s padavinami) in njihovega iztoka (po vodotoku) se najpogosteje obravnava porečje kot črno skrinjico (»black-box« model), ob čemer se predpostavlja, da ni fizikalnih ali kemijskih interakcij sledila z okoljem (tlemi), skozi katerega se sledilo giblje. Ob tem velja stalnost hidrološkega sistema, kar olajša spremljanje količinske bilance sledila, in popolno mešanje različnih komponent padavinskega odtoka, ki pa je ob naravni heterogenosti hidroloških procesov le redko prisotno (Amin in Campana, 1996).

Rezultati uporabe okoljskih sledil torej kažejo na potrebo po opredelitvi hidroloških konceptov, ki so prostorsko sorazmerno robustni in omogočajo neposredno povezavo med internimi hidrološkimi procesi na mikrohidroloških enotah ter njihovo poenostavitev, sorazmerno z večanjem področja obravnave (Sivapalan, 2003). McGlynn et al. (2003) je v svoji raziskavi ugotavljal povezavo med srednjim zadrževalnim časom prispevnega območja in njegovo velikostjo. Čeprav neposredna soodvisnost srednjega zadrževalnega časa padavinskega odtoka in velikosti prispevnega območja ni bila ugotovljena, rezultati raziskave kažejo na bistveno vlogo topografske organiziranosti površja pri kontroliranju zadrževalnih časov padavinskega odtoka s prispevnih površin različnih velikosti. Razumevanje ključnih dejavnikov, ki vplivajo na integrirane lastnosti prispevnih površin, kakršen je zadrževalni čas, je eden glavnih izzivov sodobne hidrologije v težnji po izmenljivosti hidroloških informacij med različnimi prostorskimi merili (Quinn, 2004; Sivapalan et al., 2004). Raziskavam prilagodljivosti hidroloških meril primanjkuje empiričnih podatkov o procesnih nivojih, kar bi omogočilo povezavo prostorskega merila in hidrološkega procesa (Blöschl, 2001).

2.2.2 Ugotavljanje komponent odtoka z uporabo okoljskih sledil

Uporaba okoljskih sledil z namenom opredelitve komponent odtoka temelji na določevanju masne bilance sledila v posameznih delih odtoka. Predpogoj za uspešno apliciranje je identifikacija glavnih virov vode, ki imajo dovolj raznoliko in časovno relativno konstantno vsebnost sledila, na poteh stekanja različnih virov vode pa pride do dobrega premešanja, ki je po predpostavki glavni vzrok spremenjene koncentracije sledila v odtoku (Becker et al., 1999). Najpogosteje se za določitev deležev posameznih virov odtoka uporablja dvokomponentne modele mešanja, kjer eno komponento predstavlja voda, ki izvira iz časa padavinskega dogodka (t. i. nova voda), drugo pa voda iz predhodnih obdobij baznega odtoka (t. i. stara voda). Določitev deležev komponent hidrograma odtoka poteka na naslednji način (Weiler et al., 1999):

$$Q(t) = Q_e(t) + Q_p(t), \quad (2.1)$$

$$Q_p(t) = f_p(t) \cdot Q(t), \quad (2.2)$$

$$f_p(t) = \frac{C(t) - C_e(t)}{C_p(t) - C_e(t)}, \quad (2.3)$$

kjer je Q merjen celoten odtok, Q_p je odtok »stare vode« (vode iz obdobja pred padavinskim dogodkom), Q_e je odtok »nove vode« (padavinske vode), C_p in C_e sta koncentraciji sledila v stari oz novi vodi, f_p pa je delež stare vode v skupnem odtoku.

Razvite so bile številne metode, s katerimi se lahko predpostavi spremenljivost vsebnosti sledila med padavinskimi dogodki, saj običajno časovne spremembe vsebnosti sledila v padavinah ali skupnem odtoku v času padavinskega dogodka niso merjene, obstajajo pa podatki o vsebnosti sledila v posameznih komponentah odtoka (npr. koncentracija v padavinah in baznem odtoku pred padavinskim dogodkom). Najpogosteje se časovno spremenljivost koncentracije sledila generira preko transformacijske funkcije s konvolucijskim integralom (Vitvar et al., 1999):

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} C_{in}(t-T) \cdot g(T) dT, \quad (2.4)$$

kjer C_{out} predstavlja koncentracijo sledila v skupnem odtoku, C_{in} koncentracijo sledila v padavinah, $g(T)$ je transformacijska funkcija sledila in predstavlja porazdelitev zadrževalnih oz. potovalnih časov sledila, dodanega nad celotnim prispevnih območjem; obenem se z različnimi oblikami transformacijske funkcije zadrževalnih časov kot integrirane lastnosti prispevnih površin poskuša okarakterizirati prevladujoči tip mešanja sledila (od eksponentnega koncepta kot predpostavke popolnega premešanja komponent padavinskega odtoka do predpostavke izoliranosti sestavnih delov odtoka – t. i. batnega toka). T in t sta zadrževalni in kronološki čas. Gledano s stališča tradicionalnih hidroloških modelov prevzame transformacijska funkcija sledila pri določevanju sestavnih delov hidrograma odtoka tradicionalno vlogo enotnih hidrogramov.

Novo vodo (delež padavinske vode v skupnem odtoku) lahko enačimo s površinskim padavinskim odtokom, če je (Kendall et al., 2001):

- časovna spremenljivost koncentracije sledila v padavinah majhna,
 - zadrževalni čas padavin na površini kratek,
 - delež povratnega toka zanemarljiv.
-

Uporaba metodologije ločitve komponent hidrograma odtoka v številnih hidroloških študijah je pokazala, da na določevanje dejanskega deleža nove vode v skupnem odtoku dodatno vpliva skupna količina padavin, njihova intenziteta in predhodne vlažnostne razmere v tleh (Weiler et al., 2003). Poglavitne ugotovitve pri aplikacijah sledil za določevanje komponent hidrograma odtoka so naslednje (Shultz, 1999):

- Delež indirektnega odtoka (stare vode) se manjša s povečevanjem skupnega odtoka.
- Manjša količina padavin povzroči večji odtok stare vode.
- Velik delež skupnega odtoka predstavlja stara voda (v nekaterih primerih neposredno enačena s podpovršinskim ali celo baznim odtokom).
- Vpliv talne in podtalne vode na formacijo celotnega padavinskega odtoka je v večini hidroloških študij podcenjen.
- Infiltracija padavinske vode zelo hitro aktivira iztok talne in podtalne vode v vodotok.

Iz zgornjih trditev sledi, da večina hidroloških modelov, s katerimi se določa skupni odtok s prispevnih površin, pomanjkljivo simulira podpovršinski del skupnega odtoka s prispevnih površin. Vzrok za razhajanja je v nepovezani obravnavi znanja, pridobljenega z uporabo sledil in poskusi konceptualnega razumevanja ter modeliranja fizikalnih, prostorsko porazdeljenih hidroloških karakteristik (Uhlenbrook in Leibundgut, 2002; Soulsby in Dunn, 2003; Kirchner, 2003).

2.3 BIOGEOKEMIJA DUŠIKA V GOZDU

Biogeokemijski procesi, med katere štejemo fizikalno-kemijske in geološke procese, v terestričnem okolju uravnavajo hidrokemijske odzive na manjših porečjih, saj odtok večinoma tvori voda, ki pronica skozi horizonte tal. Biogeokemijske procese lahko kategoriziramo v tri osnovne skupine (Moldan in Černy, 1994):

1. Biokemijski procesi vključno z interakcijami med bioto in atmosfero (fotosinteza, dihanje, fiksacija dušika) ter interakcijami med bioto in talnimi raztopinami (asimilacija in mineralizacija).
2. Geokemijski in kemijski procesi v tleh med talnimi raztopinami in mineralno osnovo tal (kationske izmenjave, adsorpcija, kemijsko preperevanje).
3. Kemijske reakcije v raztopinah (hidroliza, kompleksacija) in reakcije med raztopinami in atmosfero (izpuščanje ogljikovega dioksida kot produkta mikrobnega metabolizma v tleh in dušika ob denitrifikaciji).

Procesi iz vseh treh osnovnih skupin modificirajo fizikalne in kemijske lastnosti talnih horizontov in s tem kemično sestavo pronicajoče vode.

V zadnjem stoletju se je zaradi človekovih dejavnosti zelo povečal vnos dušika v okolje. Po podatkih, ki jih navaja Vitousek et al. (1997), naj bi se samo v drugi polovici 20. stoletja vnos dušika v terestrični sistem na globalnem nivoju podvojil. Skladno s tem naj bi se za podoben faktor povečalo tudi spiranje dušika v vodne ekosisteme. Posledice povečanega vnosa dušika v vodnih ekosistemih se odražajo v eutrofikaciji številnih celinskih vodnih teles, obalnih, estuarijskih in širših morskih območij. Problem presežka dušika v okolju je večinoma vezan na antropogene dejavnosti; za prepoznavanje vpliva posameznih specifičnih virov dušika in ekosistemskih procesov na transport dušika v vodnih ekosistemih je treba opredeliti spremenjene količine dušika kot posledico sedanjih ter bodočih trendov rasti človekove populacije in ekonomskega razvoja (Alexander et al., 2002, Turner et al., 2003).

Z vidika razumevanja vpliva spremenjenih količinskih razmerij znotraj dušikovega obtoka na ekosistemске procese predstavlja spremljanje količin spranega dušika z naravnih, gozdnatih

območij brez izrazitih antropogenih vplivov osnovne informacije, na podlagi katerih je možna analiza razmer na območjih s povečanim vnosom dušika. Količine dušika, ki se z odtokom transportirajo z gozdnatih prispevnih območij in dejansko predstavljajo izgubo ali presežek hranila za gozdni ekosistem, so zelo različne. Variabilnost količin transportiranega dušika je pripisana številnim biotskim in abiotskim dejavnikom, med drugim povečanim količinam vnosa dušika iz atmosfere (Vitousek et al., 1997), pedološkim razmeram (Lovett et al., 2002), razvojni stopnji ter strukturi gozda (Goodale et al., 2002) ter hidrologiji in topografiji (Creed in Band, 1998a; Creed in Band, 1998b). Binkley et al. (2000) je mnenja, da je celostno razumevanje obtoka dušika v gozdu na konceptualnem nivoju dobro poznano, kvantitativna in kvalitativna opredelitev posameznih procesov, katerih vpliv se odraža na variabilnosti količin sproščenega dušika iz gozda, pa je zelo omejena in v literaturi pogosto kontradiktorna. Protislovnost rezultatov študij biogeokemijskih razmer v gozdovih je najpogosteje pripisana razlikam med raziskovalnimi območji, ki pokrivajo zgolj ozek razpon okoljskih pogojev. Sorazmerno z razponom okoljskih pogojev so omejene interakcije med dejavniki variabilnosti količine transportiranega dušika ter možnost prevlade posameznega dejavnika nad ostalimi.

V nalogi je poudarek na hidrološko pogojeni dinamiki transporta dušika s porečij, ki pa je zaradi kompleksnosti mehanizmov transporta dušikovih spojin ne moremo obravnavati ločeno od ostalih biogeokemijskih kontrol. V nadaljevanju zato najprej podajamo zgolj vpogled v nekatere najpogostejše dejavnike, ki vplivajo na spremenljivost količine spranega dušika z gozdnatih porečij na različnih časovnih merilih. Sledi poglobljen pregled hidroloških kontrolnih mehanizmov mobilizacije dušika v gozdu in njihove povezanosti z ostalimi biogeokemijskimi dejavniki kroženja dušika v gozdu.

2.3.1 Atmosferski vnos dušika v gozdni ekosistem

Usoda povečanega vnosa atmosferskega dušika v gozdne ekosisteme je še vedno večinoma nepoznana. Dolgotrajna opazovanja gozdnih ekosistemov pripisujejo povečanje vnosov atmosferskega dušika predvsem vse večje vsebnosti dušikovih oksidov v atmosferi, ki so rezultat onesnaževanja zraka. Dolgoročno povečan vnos dušika v gozd lahko povzroči spremembe v strukturi zapletenih biogeokemijskih transformacij dušikovih spojin v gozdnem ekosistemu, med drugim npr. povečano mineralizacijo in nitrifikacijo v tleh, povečano kislost

tal, nestabilnost vsebnosti dušika v tkivih rastlin in posledično poslabšanje rasti ter povečanje presežkov dušika v gozdnem ekosistemu, ki se izraža v večjih količinah izpranega dušika s pronicajočo vodo (Vitousek et al., 2002; Aber et al., 2003; Aber et al., 2002; Burns, 2004; Vanderbilt et al., 2003). Poskusi povezave povečanih količin dušikovih spojin v vodotokih, ki drenirajo gozdnata področja, s povečanim atmosferskim vnosom dušika v terestrični sistem so privedli do hipoteze saturacije gozda z dušikom (Bernston in Aber, 2000). Nasičenje gozda z dušikom opredeljuje preseženo sposobnost gozdnega ekosistema, da asimilira in zadržuje dodatne količine atmosferskega dušika. Na podlagi meritev vsebnosti dušika v padavinah na območju Rocky Mountains, ZDA, Burns (2004) navaja podatke, naj bi se od sredine 80. do konca 90. let prejšnjega stoletja vnos dušika v obliki nitratnega iona z mokro depozicijo povečal z 1,8 kg/ha/leto na 4,7 kg/ha/leto; skladno s tem se je povečala tudi koncentracija nitratnega dušika v vodotokih. Z nižanjem nadmorske višina prispevnih območij je bil ugotovljen upad atmosferskega vnosa dušika v gozd (Flum in Nodvin, 1995).

Koncentracija nitratnega dušika v vodotokih velja za dejavnik, ki zelo dobro opisuje stanje zasičenosti gozdnega ekosistema pod vplivom povečanega atmosferskega vnosa dušika z vidika prostorske heterogenosti biogeokemijskih razmer na območju, ki ga določen vodotok drenira (Aber et al., 2003).

2.3.2 Značilnosti tal

Gozdna tla so v razvitih gozdovih zmernotoplega pasu največji zadrževalnik dušika in predstavljajo zelo pomemben vezni člen biogeokemijskega obtoka dušika, saj uravnavajo dostopnost dušika gozdni vegetaciji. V organski snovi tal, ki se nahaja večinoma v organskem horizontu tal (humusu), je delež dušika največji, in sicer večinoma v obliki kompleksnih organskih molekul (McHale et al., 2000). Mikrobiološki metabolizem v gozdnih tleh ima veliko sposobnost imobilizacije dušika. Stopnja imobilizacije dušika v tleh je v odvisnosti od biotskih in abiotskih pedoloških procesov zelo različna, vrednosti v literaturi se gibljejo med 35 in 95 % (Bengtsson et al., 2003). Preko zapletenih mikrobioloških transformacijskih procesov prihaja do mineralizacije organske snovi in razgradnje dušikovih organskih molekul v ionsko vezane neorganske oblike dušika, ki jih rastline lahko lažje asimilirajo, hkrati pa postane dušik v ionih (amonijevem, nitritnem in nitratnem) veliko bolj mobilan (Hamilton et

al., 2001; Clark et al., 2004). Potencialno pomemben element zmanjšanja količine neorganskega dušika (nitrata) je denitrifikacija, ki pa postane pomemben dejavnik biogeokemijskega obtoka dušika v gozdnih tleh predvsem na obsežnejših riparijskih in močvirnatih območjih (Burt et al., 1999; Beachtold et al., 2003; Vidon in Hill, 2004).

Struktura humusnega horizonta tal je pomemben indikator zadrževalne sposobnosti tal za neorganske dušikove spojine ter s tem uravnavanja dosegljivosti dušika rastlinam. Prezračenost humusnega horizonta tal je eden osnovnih dejavnikov, ki uravnava mikrobiološko razgradnjo organskih dušikovih spojin. Poleg strukture in teksture tal se uvršča predvsem temperatura, vlažnostne razmere v tleh in pH-vrednost med poglavitne lastnosti tal, s katerimi je možno okarakterizirati presnovo dušikovih spojin v gozdnih tleh (Andersson in Lepisto, 1998). Na območjih zmernih geografskih širin ima mineralizacija dušika v tleh sezonski vzorec; najintenzivnejša mineralizacija se vrši poleti in jeseni, ko so temperature tal najvišje. Maksimalna intenziteta mineralizacije dušikovih organskih spojin v tleh je dosežena v temperaturnem razponu 25 do 35 °C (Nicolardot et al., 1994; Knoepp in Swank, 2002).

Mineralizacija organskih dušikovih spojin ter nadaljnja nitrifikacija se najintenzivneje odvija v zgornjih talnih horizontih, posledica tega je, da z globino vsebnost dušikovih spojin upada (Bishop et al., 2004; Worrall in Burt, 1999). Med ostale pomembne dejavnike variabilnosti vsebnosti dušika v tleh se prišteva zlasti ravnotežje med vsebnostjo kemijskih elementov v tleh, predvsem razmerje med koncentracijo ogljika in dušika v tleh. Lovett et al. (2002) je v svoji raziskavi na več porečjih v gorovju Catskill v ZDA ugotovil, da lahko več kot 50 % variance v srednji letni koncentraciji nitrata v vodotoku pripiše spremenljivemu razmerju med vsebnostjo ogljika in dušika v tleh. Ob višjih vrednostih razmerja C/N se poraba dušika s strani heterotrofnih mikrobov poveča, kar predstavlja imobilizacijo dušika v tleh, s tem pa je manj dušika razpoložljivega za nadaljnjo nitrifikacijo in posledičen odtok s pronicajočo padavinsko vodo. Izrazita negativna soodvisnost med velikostjo razmerja C/N in stopnjo nitrifikacije v gozdnih tleh je bila zaznana tako v listnatih kot iglastih gozdovih (Lovett in Rueth, 1999; Goodale et al., 2000; Goodale in Aber, 2001; Ollinger, 2002). Kot zelo dober indikator intenzivnosti sproščanja in spiranja nitrata z gozdnatih porečij razmerje C/N navaja tudi Gundersen et al. (1998), ki je v svoji raziskavi sproščanja nitrata z

gozdnatih porečij šel še korak dlje. Glede na velikost razmerja C/N je opredelil naslednjo razdelitev gozdnatih porečij:

- Pri vrednostih razmerja C/N nad 30 je status gozdnih tal za pronicanje nitratnega dušika močno limitirajoč, potencialno spiranje nitratnega dušika s teh porečij je majhno.
- Pri vrednostih razmerja C/N med 30 in 25 je sposobnost zadrževanja dušika v gozdnih tleh zmerna, temu primerno je tudi potencialno spiranje nitratnega dušika.
- Pri vrednostih razmerja pod 25 je količina dušika v gozdnih tleh velika, potencialno spiranje nitratnega dušika je veliko.

Podatek o razmerju C/N pove o biogeokemijskih regulacijskih mehanizmih tal, ki uravnavajo stopnjo sproščanja nitratnega dušika iz gozdnih tal več, kot dejanska koncentracija nitratnega dušika v gozdnih tleh, ki je lahko časovno zelo spremenljiva glede na ustreznost pogojev za proces mineralizacije in nitrifikacije v tleh (Janssen, 1996; Dise et al., 1998; MacDonald et al., 2002; Bengtsson et al., 2003).

2.3.3 Gozdna vegetacija

Vpliv vegetacije na kroženje dušika v gozdnem ekosistemu je v veliki meri odvisen od sezonsko pogojene aktivnosti vegetacije. V obdobju neaktivnosti vegetacije pozno jeseni, pozimi in zgodaj spomladi so bile v številnih gozdnih ekosistemih opazne povišane koncentracije raztopljenega neorganskega dušika (večinoma nitrata) v vodotokih, katerim sledi upad vsebnosti nitratnega dušika v obdobjih intenzivne rasti vegetacije, predvsem v poletnem času (Vanderbilt et al., 2003; Lajtha et al., 1995; Johnson et al., 1997). Vegetacijska asimilacija dušika in njegova vgradnja v gozdno biomaso tako predstavlja potencialno zelo velik ponor dušika v terestričnem sistemu, katerega velikost uravnavajo lastnosti same vegetacije in številni drugi okoljski dejavniki (Goodale et al., 2000). Letne količine asimilirane dušika lahko zelo variirajo v odvisnosti od klimatskih razmer, njihovega vpliva na aktivnost vegetacije in dekompozicijo rastlinskih ostankov, tako da lahko v večletnih ciklih vegetacija deluje kot ponor ali vir dušika. Kratkotrajne spremembe v asimilacijski sposobnosti vegetacije lahko nevtralizirajo spremembe v vsebnosti dušika v tleh, tako npr. v obdobjih ugodnih klimatskih pogojev za mineralizacijo organske snovi v tleh ter s tem večjo verjetnost

odstranitve dušika iz tal z infiltrirajočo vodo, rastline preko intenzivnejše asimilacije več dušika vgradijo v biomaso (Magill et al., 2000). Celosten vpogled v vlogo vegetacije v kroženju dušika v gozdu omogočajo dolgotrajne študije biogeokemije gozda, kakršni sta npr. eksperimentalni gozdnati porečji Hubbard Brook (Likens in Borman, 1995) ter hidrološki laboratorij Coweeta (Swank et al., 2001; Swank, 1988).

Vgradnja dušika v gozdno biomaso ni merjena direktno, ampak posredno preko meritev prirastka lesa in količine rastlinskih ostankov ter koncentracije dušika. Večino dušika, ki ga rastline asimilirajo na letni osnovi, se vgradi v koreninski sistem in listje. Predvsem dušik v listni biomasi predstavlja zgolj začasen ponor, saj se na letni ravni večino dušika, vgrajenega v listje, vrne nazaj v gozdna tla. Lesno tkivo vsebuje nižje koncentracije dušika, a predstavlja 95 % celotne teže gozdne biomase (Aber et al., 1997; Aber et al., 1991). Pregled nad vsebnostjo dušika v posameznih delih rastlinskih tkiv, ugotovljenih na podlagi dolgoletnih opazovanj gozdnih ekosistemov v Severni Ameriki in uporabe ekosistemskega modela gozda, podaja Goodale et al. (2002). Ugotovljeni povprečni deleži dušika v suhi teži posameznih delov dreves so naslednji: v listju in vejah je delež dušika 0,28 %; v steblu 0,10 %; v koreninskem sistemu 0,36 %; povprečni delež dušika v celotni suhi teži drevesne biomase znaša 0,19 %.

Zmožnost gozdnega ekosistema, da se prilagodi in odzove na zunanje vplive (npr. gospodarsko izkoriščanje lesa) in se ohrani v okviru stabilnih ekosistemskih razmer, je vezana na dve primarni komponenti: biomaso in odmrlo organsko snov, ki se nahaja v gozdnih tleh (Golladay et al., 1992). Odstranitev gozdnega vegetacijskega pokrova poveča temperaturo in vlažnost tal, kar pospeši mineralizacijo v tleh. Zmanjšana asimilacijska sposobnost vegetacije in intenzivnejša mineralizacija dušikovih organskih snovi privede do razprtja dušikovega obtoka v gozdnem ekosistemu in večjih izgub dušika s padavinskim odtokom. Vpliv odstranitve vegetacije na kroženje dušika je bil opazovan na eksperimentalnih gozdnih porečjih, katerih deli so bili načrtno posekani. Na eksperimentalnem gozdnem porečju Hubbard Brook (Likens in Borman, 1995) je bila tri leta po odstranitvi gozdne vegetacije celotna izguba dušika v tleh 472 kg/ha, povečano spiranje neorganskega dušika je znašalo 337 kg/ha. S poznejšim sukcesijskim razvojem gozda in obnovljeno retenzijo dušika so se letne izgube dušika drastično znižale. V razvitem gozdu zmernih geografskih širin je asimilacija

dušika manjša kot v mlajših gozdovih različnih sukcesivnih stopenj, kar mnogi avtorji povezujejo s pojavom saturacije gozda z dušikom v starejših gozdovih (Worall et al., 2003).

Na podlagi dolgoletnih opazovanj spremenljivosti zadrževalne sposobnosti gozdnega ekosistema za dušik je Stoddard (1994) opredelil štiri t. i. diagnostične stopnje, skozi katere razvojno prehaja gozd od stanja nezadostnih količin dušika v zgodnji fazi razvoja (gozd deluje kot ponor dušika) do presežkov dušika v starih gozdovih, ko lahko potencialno gozd deluje kot dodaten vir dušika, ki se spira z gozdnatih prispevnih površin. Omenjene stopnje veljajo predvsem za območja, kjer so sezonske hidrološke razmere pogojene s tajanjem snežne odeje. Štiri diagnostične stopnje so (Stoddard, 1994):

1. Stopnja 0 (transport nitratnega dušika po vodotoku je izrazito nizek, saj je koncentracija nitratnega dušika v vodotoku čez celo leto nizka, povečana je lahko le v spomladanskem obdobju ob tajanju snežne odeje);
2. Stopnja 1 (transport nitratnega dušika je še vedno predvsem sezonski pojav, a so koncentracije nitratnega dušika v vodotoku v času spomladanskega tajanja snega višje od razmer v stopnji 0);
3. Stopnja 2 (občasne povišane koncentracije nitratnega dušika v vodotoku so primerljive z visokimi koncentracijami v stopnji 1, sezonske razlike v koncentraciji nitratnega dušika v vodotoku so znižane na račun povišanih koncentracij v obdobjih baznega odtoka);
4. Stopnja 3 (velik transport nitratnega dušika po vodotoku, koncentracije nitratnega dušika ne kažejo izrazitega sezonskega značaja, tudi v času baznega odtoka so koncentracije nitratnega dušika visoke v primerjavi s prejšnjimi stopnjami).

Pri kroženju dušika v gozdu ima pomembno vlogo tudi vrstna sestava vegetacije. V vodotokih, ki drenirajo področja, prekrita z listnatim gozdom, so koncentracije neorganskega dušika 2- do 3-krat višje kot v vodotokih, ki drenirajo področja iglastih gozdov. Vodotoki na področjih iglastih gozdov pa imajo 3- do 8-krat višje koncentracije organskega raztopljenega dušika. Medtem ko nitratni dušik predstavlja okoli 60 % celotnega raztopljenega dušika v vodotokih na področjih listnatih gozdov, je delež organskega raztopljenega dušika v vodotokih, ki drenirajo področja iglastih gozdov, kar 80 % celotnega raztopljenega dušika (Binkley et al., 2004).

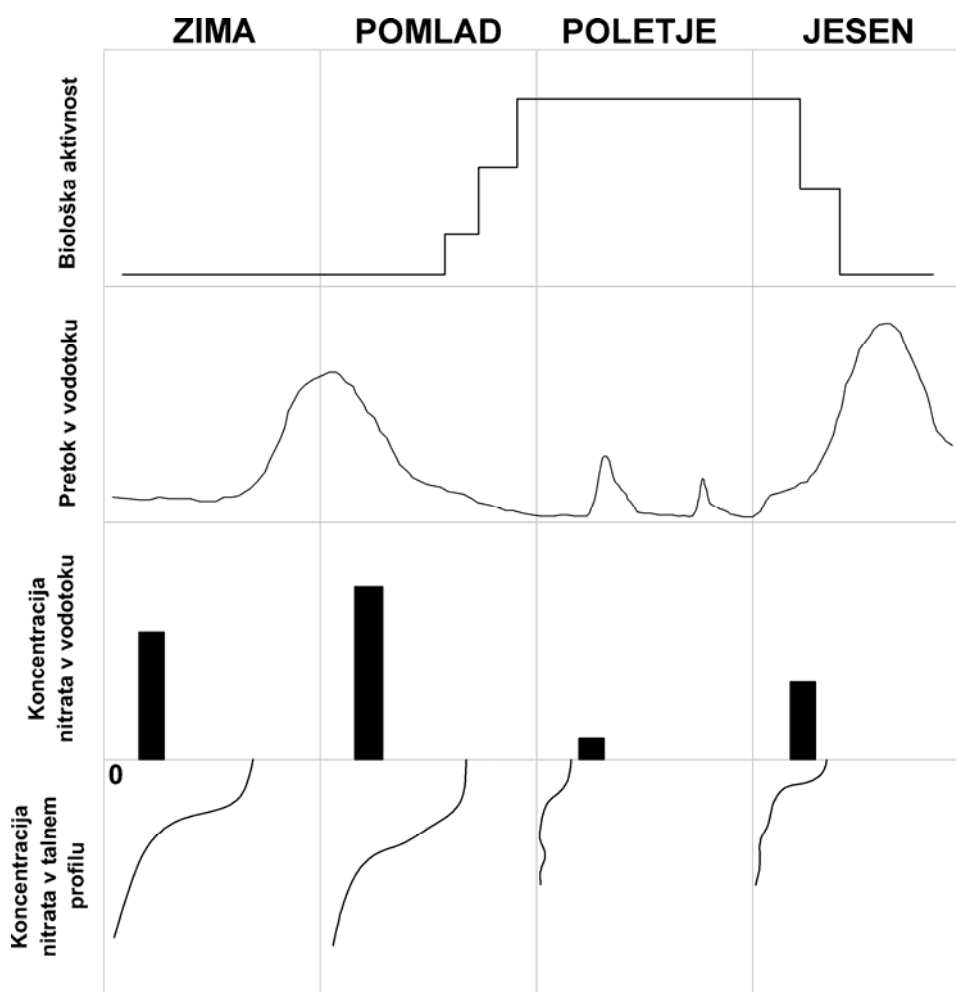
Nekatere drevesne vrste živijo v simbiozi z mikroorganizmi, ki imajo sposobnost fiksacije atmosferskega dušika. Tako npr. črna jelša živi v simbiotskem razmerju z bakterijo *Frankia alni*, ki se nahaja na koreninskem sistemu jelše. Ta bakterija ima sposobnost absorpcije atmosferskega dušika in s tem povečanja vsebnosti dušika v gozdnih tleh za 20 do več kot 50 %; ob tem ima tudi sam koreninski sistem in listi jelše višjo vsebnost dušika (Hart et al., 1997). Ob tem Zitzer et al. (1989) navaja podatek, da aktivnost encima nitrogenaze, ki ga bakterija *Frankia alni* uporablja pri fiksaciji atmosferskega dušika, narašča eksponentno v temperaturnem razponu tal od 10 do 25 °C. V literaturi navedene količine fiksiranega atmosferskega dušika v gozdovih rdeče jelše na severozahodnem delu ZDA se gibljejo med 50 in 200 kg N/ha (Hart et al., 1997; Pastor in Binkley, 1998). Posledica povečanih količin dušika v tleh je zelo velik odtok neorganskega raztopljenega dušika (večinoma kot nitrata). V gozdovih rdeče jelše v Washingtonu, ZDA, je letni odtok dušika po vodotoku znašal do 70 kg N/ha (Moldan in Černy, 1994).

2.4 HIDROLOŠKI KONTROLNI MEHANIZMI

Vpliv preferenčnih poti podpovršinskega in površinskega padavinskega odtoka s porečij ima z vidika analize hidroloških kontrol transporta v vodi raztopljenih dušikovih spojin ključno vlogo pri opredeljevanju količin dušika, ki dosežejo vodotok in se po njem spirajo. Po hidroloških poteh stekanja vode prihaja do številnih interakcij z biogeokemijskimi okolji, ki kontrolirajo obtok dušika. Na hidrološko pogojeno dinamiko transporta dušika v gozdnem ekosistemu je treba gledati s stališča časovne, prostorske in biogeokemijske spremenljivosti razmer (Mitchell, 2001; McDonnell in Tanaka, 2001). Napovedovanje hidrološko pogojenega transporta dušika je treba navezati na sezonska (daljša časovna obdobja), kratkotrajna (časovno merilo posameznih padavinskih dogodkov) in prostorska (topografska in hidrogeomorfološka) nihanja v okolju (Peijl in Verhoeven, 2000).

Na sliki 2.3 je prikazan hipotetični časovni profil biološke aktivnosti in hidroloških razmer ter v odvisnosti od teh časovna spremenljivost koncentracije nitratnega dušika v tleh in vodotoku. Tak časovni vzorec naj bi bil značilen za povirne dele gozdnatih porečij zmernih geografskih širin, katerih hidrološke karakteristike so pogojene z dolgotrajnejšo prisotnostjo snežne odeje v zimskem času. Povečane koncentracije nitratnega dušika v vodotoku v zimskem času so posledica dreniranja nitratnega dušika iz globljih tal, najvišje koncentracije v spomladanskem času so rezultat izpiranja nitratnega dušika, akumuliranega v snežni odeji in gozdnih tleh. V poletnem času je zaradi visoke biološke aktivnosti gozdne vegetacije le malo nitratnega dušika razpoložljivega za mobilizacijo z odtokom (Cirimo in McDonnell, 1997).

Številne raziskave hidrološko pogojenih biotskih in abiotskih transformacij dušikovih spojin, katerih ugotovitve so povzete v nadaljevanju, so pokazale, da so hidrološko najaktivnejša oz. hidrološko najbolj dinamična območja porečij obenem tudi območja intenzivnih biogeokemijskih transformacij dušikovih spojin. Iz tega izhaja potreba po povezavi med časovno hidrološko variabilnostjo (režimom visokih in nizkih voda v vodotoku), biogeokemijskimi razmerami in predhodno vlažnostjo tal v težnji po razumevanju kontrolnih mehanizmov dinamike dušika (Arheimer et al., 1996).



Slika 2.3: Hipotetičen časovni profil biološke aktivnosti, hidroloških razmer in koncentracije nitratnega dušika v vodotoku in tleh (povzeto po Cirno in McDonnell, 1997).

Figure 2.3: Hypothetical temporal profile of biological activity, hydrological conditions and nitrogen concentrations in the form of nitrate in streamwater and soil (after Cirno and McDonnell, 1997).

Mejna območja med terestričnim in vodnim ekosistemom predstavljajo ekotone oz. prehodne okoljske cone med ekosistemi, ki jih okarakterizirajo nenadne spremembe hidroloških lastnosti in biogeokemijskih razmer (Stanford, 1996). Spremenljivost hidroloških lastnosti na teh območjih je vezana predvsem na hitro prostorsko in časovno odzivnost vlažnostnih razmer v tleh, s katero je pogojeno talno biogeokemijsko okolje (prisotnost zraka v tleh, pH-vrednost, redoks potencial itd.). Gradient vertikalnih (v talnih horizontih) in horizontalnih (vzdolž talnih horizontov) con biogeokemijskega okolja je odvisen od stratifikacije hidroloških in fizikalnih lastnosti tal, ki jih opredelimo s hidravlično prevodnostjo tal, poroznostjo in teksturo. Te talne karakteristike se odražajo v stratifikaciji biogeokemijskih talnih okolij s specifično

mineraloško strukturo, vsebnostjo organske snovi in mikrobiološko združbo (Beachtold et al., 2003). V večini poskusov razlage hidrološko spodbujene mobilizacije dušika je izpostavljen problem sočasnega spremenljivega delovanja biogeokemijskega okolja (predvsem sezonsko pogojenega) in hidroloških pogojev, kar otežuje opredelitev spiranja dušika kot posledico povečanja sezonske razpoložljivosti (mobilnosti) ali povečane akumulacije v sušnih obdobjih.

2.4.1 Vloga topografskih in hidromorfoloških karakteristik površja

Topografske karakteristike površja se že dolgo časa uporabljajo za opis hidroloških značilnosti porečij, saj je večina porazdelitve hidroloških poti stekanja padavinskega odtoka pogojena z izoblikovanostjo površja. Na prostorskem nivoju porečja je odtok padavinske vode ter s tem skupen hidrološki odziv prispevnih površin odvisen od geometrije porečja, prostorske variabilnosti prispevnih območij ter razvitosti hidrografske mreže (Knighton, 1998). Bistveni topografski karakteristiki, s katerima se opiše usmerjenost padavinskega odtoka skladno s površjem, sta naklon in lega (Band, 1986; Tarboton, 1997; Lyon et al., 2004). Naklon je s hidrološkega stališča indikator količine gravitacijske energije, ki poganja vodni tok v smeri gradienta naklona in vpliva na količino vodnega toka. Lega opredeljuje usmeritev terena ter omogoča določitev prispevnih površin. Na podlagi podatkov o naklonu in legi površja je mogoča nadaljnja določitev prostorske porazdelitve hidroloških indeksov. Najbolj razširjen izmed teh je topografski indeks oz. indeks hidrološke podobnosti, s katerim opredeljujemo območja, ki naj bi bila hidrološko enako odzivna (Beven, 1997). Topografski indeks ima običajno naslednjo obliko (Quinn et al., 1995):

$$TI_i = \ln\left(\frac{a_i}{\tan \beta_i}\right), \quad (2.5)$$

kjer je TI_i vrednost topografskega indeksa določena v prostorski točki i , a_i je prispevna površina na enoto dolžine konturne črte v prostorski točki i in β_i je naklon površine, določen za prostorsko točko i . Višja pobočna območja z majhnimi prispevnimi površinami ter večjimi nakloni imajo nižje vrednosti topografskega indeksa, najvišje vrednosti topografskega indeksa imajo območja struge vodotoka in obdajajoča območja, katerih prispevne površine so velike, nakloni terena pa majhni.

Na prispevnih površinah, kjer se predvideva, da hidrološki kontrolni mehanizmi prevladujejo nad ostalimi biogeokemijskimi kontrolami transporta dušika, se torej lahko predpostavi povezavo med območji z enakim indeksom hidrološke podobnosti in intenziteto mobilizacije raztopljenih dušikovih spojin (Creed in Band, 1998a; Band et al., 2001).

Če variabilnost hidroloških lastnosti in biogeokemijskih razmer na specifičnem prispevnem območju navežemo na topografske in hidromorfološke značilnosti površja (npr. preko indeksa hidrološke podobnosti), lahko razmejimo tri ključne transformacijske cone dušikovih spojin na nivoju porečja (Cirno in McDonnell, 1997): območje struge vodotoka s hiporeično cono, obrežna (riparijska) območja ter višja pobočna območja. Transport dušika na nivoju porečja je reguliran s prostorsko in časovno spremenljivostjo razsežnosti omenjenih transformacijskih con. S prostorskega stališča območja transformacijskih con opredeljujejo spremembe v naklonu površine. V riparijska območja se tako uvršča spodnje dele konkavnih pobočij, kjer je velikost gradienta naklona površin manjša. Z vidika časovne spremenljivosti gre za razporeditev z vodo zasičenih območij v času padavinskih dogodkov.

Skladno z omenjeno prostorsko opredelitvijo je potekala tudi večina raziskav hidrološko pogojenih biogeokemijskih transformacijskih mehanizmov dušikovih spojin, ki pa so najpogosteje detajlno usmerjene zgolj v eno izmed transformacijskih con, ponavadi sta to območje struge vodotoka ali riparijski obrežni pas. Večinoma neopredeljen ostaja, gledano s prostorske razsežnosti porečja, hidrološki prenos dušika z višjih pobočnih območij skozi obrežni pas v vodotok, ob katerem prihaja do intenzivnih interakcij med hidrološkimi potmi stekanja padavinskega odtoka skozi različna biogeokemijska okolja (Kirchner et al., 2004; McHale et al., 2002; O'Brien et al., 1994).

V manjših vodotokih se odraža tesna povezanost med hidrološkimi in biogeokemijskimi procesi, ki se odvijajo na prispevnih površinah (Moldan in Černy, 1994). Obenem velja, da je vsebnost raztopljenih dušikovih spojin, spranih s povirnih območij v manjši vodotok, v veliki meri z omenjenimi procesi določena »v naprej«, ob stekanju padavinske vode proti vodotoku. Biokemijskim transformacijam v samem vodotoku se zaradi kratkih zadrževalnih časov padavinskega odtoka v manjših vodotokih povirnih delov porečij pripisuje zgolj marginalno vlogo (West et al., 2001; Lovett et al., 2002), še zlasti v primerih hitrega stekanja

padavinskega odtoka v času padavinskih dogodkov. V nadaljevanju pozornost posvečamo dvema transformacijskima conama dušikovih spojin, in sicer riparijskem pasu in višjim pobočnim območjem ter specifičnim hidrološkim povezavam med njima.

2.4.2 Hidrološko pogojena mobilizacija dušika v riparijskem območju

Riparijska območja, ki obdajajo neposredno območje struge vodotoka, so že dolgo časa poznana kot pomembna območja retenzije vnosa hranil v vodna telesa ter odstranjevanja dušika iz terestričnega in vodnega sistema preko denitrifikacije (de Waal et al., 1998). Ohranjanje riparijskih območij sodi med pglavitne elemente mediacije vnosa dušika v vodna telesa z netočkovnih virov onesnaženja skladno s principi sonaravnega urejanja vodotokov (Fogg in Wells, 1998). Riparijska območja predstavljajo zadnje biogeokemijsko okolje, ki ga preidejo konvergentni hidrološki tokovi preden dosežejo vodotok, obenem pa je dejanska prostorska razsežnost riparijskih območij v smislu vlažnostnih razmer v tleh v času padavinskih dogodkov zelo spremenljiva. To spremenljivost s hidrološkega stališča opredeljuje koncept variabilnih virov (Hibbert in Troendle, 1988). Okvir obravnave hidrološko pogojene dinamike kroženja dušika v riparijskih območjih tako zajema časovne in prostorske dimenzije.

Nekatere raziskave v gozdnatih porečjih potrjujejo domnevo, da gozdovi zmernih geografskih širin večinoma delujejo kot ponor dodatnih količin predvsem atmosferskega dušika (Goodale et al., 2003). Iz tega sledi, da je vloga biogeokemijskega okolja na teh gozdnatih območjih ključna pri opredeljevanju kontrolnih mehanizmov transporta dušika skozi terestrični sistem. Potencialno spiranje dušika skozi saturirana riparijska območja v času hidroloških dogodkov je tesno povezano s pedološkimi karakteristikami tal in njihovo biogeokemijsko aktivnostjo, ki prevladuje nad potencialno spremenljivostjo hidroloških razmer. Na območju gorovja Catskill ter eksperimentalnega porečja Hubbard Brook, ZDA (Lawrence et al., 2000; Likens in Bormann, 1995) je bila opazna le manjša pozitivna korelacija med koncentracijo nitratnega dušika in odtokom v začetni fazi povečevanja odtoka, ki ji je sledil upad in razredčenje vsebnosti nitrata z nadaljnjim stekanjem padavinskega odtoka. Predlagana razlaga za takšen odziv nitratnega dušika je ločitev mehanizma biogeokemijskih in hidroloških kontrol v času padavinskih dogodkov na območjih slojevitih sedimentoloških geoloških okolij z relativno

tankim slojem tal, ki so zelo prepustna, kisla, vsebnost organske snovi v tleh pa je relativno nizka (Bechtold et al., 2003). Hidromorfološko gledano je razsežnost riparijskih območij na omenjenih eksperimentalnih območjih majhna, vloga hidroloških karakteristik riparijskih območij pri kontroliranju pronicanja dušika v vodotok je s tem manj pomembna. Kot ključni hidrološki mehanizem mobilizacije nitratnega dušika je bil identificiran vpliv tajanja snežne odeje spomladi. Ob tajanju snežne odeje se izpira nitratni dušik kot produkt počasne mineralizacije in nitrifikacije v snežni odeji in izoliranih tleh pod snežno odejo v pozno jesenskem in zimskem času (Kendall et al., 1995; Meixner et al., 1998).

Druge študije hidroloških in biogeokemijskih interakcij pri mobilizaciji dušika v riparijskih območjih so razkrile različne potencialne hidrološke kontrolne mehanizme. Povečanje hidravličnega gradienta v času padavinskih dogodkov privede do pospešitve padavinskega odtoka čez (kot zasičen površinski padavinski odtok) oz. skozi (kot plitev oz. globok podpovršinski odtok) riparijska območja ter s tem do potencialnega intenzivnejšega vnosa predvsem neorganskega raztopljenega dušika v vodotok. Na območjih s povečanim atmosferskim vnosom dušika lahko v času večjih padavinskih dogodkov ali intenzivnega tajanja snega pride do izolacije riparijskih območij. Dodatne količine vode s povečano vsebnostjo atmosferskega dušika (vezanega pretežno v amonijevem in nitratnem ionu) obidejo zasičena riparijska območja in brez biogeokemijskih interakcij dosežejo vodotok (McHale et al., 2004). Kot pomemben vir dušika z riparijskih območij je bila identificirana tudi podtalna voda, ki vsebuje višje koncentracije raztopljenega neorganskega dušika, katerega večino predstavlja nitrat (Hill et al., 1998). V času padavinskega dogodka pride v fazi dvigajočega dela hidrograma do iztisenja podtalne vode z večjo vsebnostjo nitrata v vodotok, pri čemer je maksimum koncentracije nitrata v vodotoku dosežen pred konico odtoka, ob nadaljnjem stekanju padavinskega odtoka pa se koncentracija nitrata zaradi razredčenja hitro zniža.

V nekaterih gozdnatih porečjih, kjer gozdna vegetacija sega do roba struge vodotoka, je mehanizem mobilizacije dušika v riparijskem območju zaradi vegetacijsko pogojenega nihanja nivoja saturirane cone v tleh drugačen. Nihanja v nivoju saturirane cone omogočajo prezračenost sicer zelo vlažnih tal v riparijskem območju, na ta način pa so zagotovljeni pogoji za intenzivno mineralizacijo organskih dušikovih spojin. Nihanja nivoja zasičene cone

na riparijskih območjih v odvisnosti od dnevno-nočnega cikla aktivnosti vegetacije so lahko precejšnja, odraz tega nihanja so spremenjeni hidravlični gradienti in posledično nivoji gladin v strugi vodotoka (Rushton et al., 2006).

V biogeokemijskem smislu se s spremenjenim nivojem zasičene cone tal vrši mobilizacija »stare« podpovršinske vode s specifičnim redoks stanjem (nizko vsebnostjo raztopljenega kisika). Povečane koncentracije raztopljenega organskega ali amonijevega dušika v tej podpovršinski vodi so na ta način lahko izpostavljene spremenjenemu biogeokemijskemu oksidirajočemu okolju (z višjo pH-vrednostjo), ki stimulira nitrifikacijo v plitvejših, dobro prezračenihi horizontih tal. Ob padavinskem dogodku in hitri saturaciji celotnega profila tal pride do intenzivnega spiranja nitratnega dušika, ki se v času baznega odtoka akumulira v hidrološko izoliranihi, plitvih, z vodo nenasičenihi horizontih tal (Cirno in McDonnell, 1997). Hiter vertikalni odziv saturirane cone tal na padavine je lahko pogosto vezan tudi na prisotnost kapilarne cone v tleh. Pod vplivom kapilarnih sil se voda giblje iz bolj zasičenihi v manj zasičene dele poroznega prostora (Brilly, 2005). Debelina kapilarne cone je teoretično obratno sorazmerna z velikostjo srednjega zrna zemljine in je odvisna od poroznosti, prepustnosti tal ter zrnastostne sestave zemljine.

V nekaterih zgoraj opisanihi primerih lahko riparijska območja dejansko delujejo kot vir neorganskega raztopljenega dušika v času padavinskihi dogodkov. Pozitivna korelacija med koncentracijo nitrata in povečanim padavinskim odtokom je bila zaznana na območju gozdnatega porečja Adirondack, ZDA (McHale et al., 2002) in na nekaterih porečjih na območju južne Švedske in Finske (Arheimer et al., 1996). Na območjih povišanihi koncentracij nitrata v času povečanihi odtokov so tla pretežno ilovnata, debelejša (povprečna debelina okoli 1 meter) z dobro razvitimi talnimi horizonti, vsebnost organske snovi v tleh je povečana.

Velik pomen riparijskihi območij pri hidrološko induciranem transportu neorganskega raztopljenega dušika potrjujejo tudi hidrološke raziskave z uporabo sledil. Na riparijskihi območjih prihaja do intenzivnega mešanja stare vode (iz obdobji pred padavinskihi dogodkom) in nove (padavinske) vode, ob tem se delež nove vode z dolžino in intenziteto padavinskega dogodka povečuje, skladno s tem pa se odziva tudi koncentracija

neraztopljenega nitratnega dušika v vodotoku, ki privede do povišanja koncentracije neorganskega raztopljenega dušika predvsem v času dvigajočega dela hidrograma odtoka (Cirno in McDonnell, 1997). Ugotovljeni deleži nove vode v skupnem odtoku med velikimi padavinskimi dogodki dosežejo več kot 60 %, v primeru manjših padavinskih dogodkov z zmernimi intenzitetami je delež nove vode med 20 in 25 % (Bonell, 1993). Z vidika konceptualnega razumevanja tvorbe padavinskega odtoka se mešanje stare in nove vode razlaga z mehanizmom tvorbe zasičenega površinskega odtoka na riparijskih območjih (Weiler in McDonnell, 2006).

2.4.3 Hidrološka mobilizacija dušika v višjih pobočnih območjih in hidrološka povezanost z riparijskimi območji

Nekateri konceptualni pristopi k razumevanju tvorbe padavinskega odtoka na nivoju porečja so predstavljeni v poglavju 2.1. Mehanizmi tvorbe padavinskega odtoka so odgovorni za veliko odzivnost odtoka v vodotoku na padavinski dogodek oz. hitro mobilizacijo »stare« in »nove« vode že v zgodnji fazi tvorbe padavinskega odtoka. Čeprav so mehanizmi tvorbe padavinskega odtoka lahko med posameznimi porečji ali celo med posameznimi padavinskimi dogodki na istem porečju zelo različni, je lahko geokemijska slika mešanice okoljskega sledila v odtoku enaka. Buttle (1994) to opisuje kot primer, kjer več kombinacij različno odzivnih hidroloških mehanizmov privede do enakih končnih opazovanih odzivov (ang. »equifinality«), torej enakega geokemijskega vzorca sledila v vodotoku.

Za razumevanje transporta dušika na nivoju porečja s hidrološko mobilizacijo v višjih pobočnih predelih preko hidroloških povezav z riparijskimi območji, dodatne mobilizacije na samem riparijskem območju ter spiranjem v vodotok, je zelo pomembno razlikovati med potmi tvorbe padavinskega odtoka in njihovimi povezavami s transformacijskimi conami dušikovih spojin. Prisotnost povečanih fizikalnih, kemijskih in bioloških gradientov med transformacijskimi conami je običajna (Cirno in McDonnell, 1997). Hidravlični zadrževalni časi padavinskega odtoka se lahko v odvisnosti od hidroloških karakteristik tal znatno spremenijo na relativno majhnih razdaljah. Dinamične hidrološke spremembe med riparijskimi območji in višjimi pobočnimi območji se lahko odvijajo v odvisnosti od sezonskih, letnih ali celo desetletnih trendov vodnega režima (Boyer et al., 1997). Hidrološka

povezanost v smeri hidravličnih gradientov je definirana kot splet hidroloških razmer, ki privedejo do združitve v sušnih obdobjih ločenih pobočnih predelov preko podpovršinskih vodnih tokov (Stieglitz et al., 2003). Grayson et al. (1997) je predlagal dve prevladujoči hidrološki stanji v smislu hidrološke povezanosti:

1. *Hidrološko suhe razmere.* Posamezni pobočni predeli v smeri prevladujočih hidravličnih gradientov so hidrološko izolirani. Prevladujejo vodni tokovi v vertikalni smeri, prostorski vzorci vlažnostnih razmer so neorganizirani.
2. *Hidrološko vlažne razmere.* Pobočni predeli se v času padavinskih dogodkov povezujejo s tvorbo lateralnih podpovršinskih tokov, vzorci vlažnostnih razmer v tleh postajajo prostorsko organizirani.

Prevladujoče hidrološko stanje opredeljuje kontaktne čase odtoka v talnih horizontih ter s tem procesiranje dušikovih spojin v talni horizontih in njihovo nadaljnjo mobilizacijo.

McDonnell (1990) je formacijo preferenčnih poti podpovršinskega padavinskega odtoka z višjih pobočnih predelov navezal na tok skozi makropore, ki nastanejo ob vegetacijskem koreninskem sistemu ali na prehodih med posameznimi talnimi horizonti. S sledilnim testom je ugotovil, da je padavinski odtok na pobočnih predelih že zelo dobro premešan, kar nakazuje na interakcije med padavinskim odtokom skozi mikropore in makropore. Makropore omogočajo dobro prezračevnost talnih horizontov ter intenzivno spiranje produktov mineralizacije organskih dušikovih spojin. Ob popolni saturaciji talnega profila na območjih manjšega hidravličnega gradienta naj bi bila vloga makropor pri mobilizaciji raztopljenega neorganskega dušika manjša.

Na podlagi večletnih meritev kemizma vode v vodotokih na območju centralnega Ontaria, Kanada, je Creed et al. (1996) predlagal dva mehanizma spiranja produktov mineralizacije dušikovih organskih spojin kot skupni hidrološki odziv vseh transformacijskih con na nivoju porečja:

1. *Mehanizem spiranja nitratnega dušika.* Princip spiranja povzema konceptualne osnove, ki jih je predlagal Hornberger et al. (1994) v hipotezi spiranja, ki se vrši ob dvigu nivoja zasičene cone tal proti površju v času padavinskih dogodkov ter posledičnem spiranju produktov mineralizacije iz plitvih horizontov tal. Maksimalna koncentracija nitratnega dušika v vodotoku se pojavi pred konico odtoka, čemur sledi hiter upad koncentracije nitratnega dušika. Pri tem je koncentracija nitratnega dušika v
-

rezervoarju tal, ki se meša z dotekajočo padavinsko vodo, časovno spremenljiva v odvisnosti od biogeokemijskih kontrol. Glavni hidrološki mehanizem, ki regulira spiranje nitratnega dušika, je deficit vlažnosti tal in frekvenca njegovih oscilacij.

2. *Mehanizem dreniranja nitratnega dušika.* Dreniranje oz. vertikalno izpiranje poteka predvsem ob tajanju snežne odeje ter padavinskih dogodkih nizkih intenzitet, kjer infiltrirajoča voda translocira nitratni dušik iz plitvih horizontov tal v globlje predele tal, od koder se vrši počasna mobilizacija nitratnega dušika proti vodotoku s podtalno vodo. Mehanizem dreniranja je tako odgovoren za transport nitratnega dušika v času baznega odtoka.

Delež nitratnega dušika, ki se transportira po preferenčnih poteh padavinskega odtoka, je lahko velik, obenem pa imajo plitvi horizonti tal lahko veliko sposobnost imobilizacije nitratnega dušika, kar pomeni, da je dejanska razpoložljiva količina nitratnega dušika za spiranje majhna (Hill et al., 1999), ob tem pa je vloga hidrološkega mehanizma spiranja nitratnega dušika močno omejena.

V času padavinskih dogodkov so izpolnjeni hidrološki pogoji transporta raztopljenega neorganskega dušika, biogeokemijske razmere ob tem lahko delujejo kot prevladujoč omejitveni dejavnik mobilizacije, posledično bo količina spranega dušika po hidrografski mreži manjša. Po drugi strani lahko biogeokemijske razmere privedejo do akumulacije produktov mineralizacije organskih dušikovih spojin v talnih horizontih, vendar zaradi pomanjkanja medija transporta – padavinske vode koncentracija neorganskega raztopljenega dušika v vodotoku ostane nizka. Ugotovitve Creeda et al. (1996) in Hilla et al. (1999) potrjujejo kompleksnost in spremenljivost vzajemnega delovanja hidroloških in biogeokemijskih mehanizmov pri reguliranju mobilizacije nitratnega dušika.

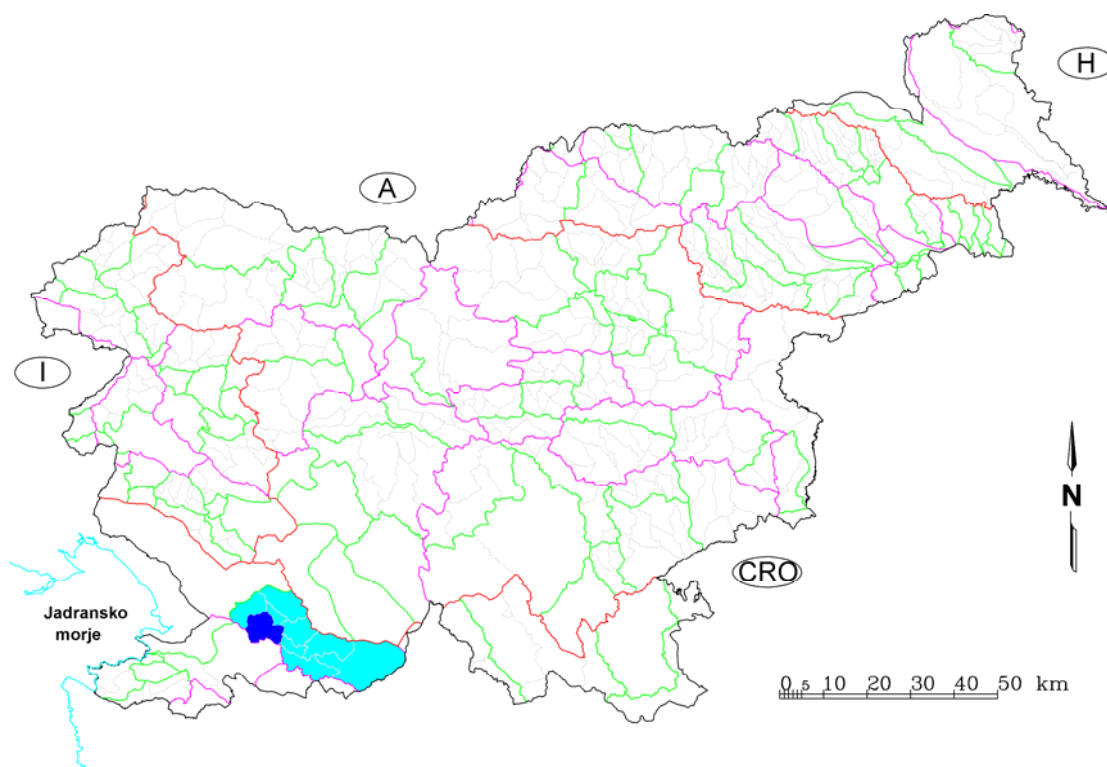
3 METODE

3.1 UVOD

Večji del meritev v okviru doktorske disertacije je bil opravljen v sklopu dopolnilnih hidroloških in kemijskih raziskav za potrebe projekta »Ureditev oskrbe prebivalstva s pitno vodo slovenske Istre in zalednega kraškega območja«. Oskrba slovenske Istre in zalednega kraškega območja s pitno vodo se zaradi pomembnosti, zahtevnosti in kompleksnosti problematike uvršča med prioritete naloge v programu izvajanja nacionalnih projektov državne infrastrukture. Republika Slovenija se je odločila, da pristopi k rešitvi z novim, neodvisnim regionalnim vodnim virom, s katerim bo oskrba s pitno vodo slovenske Istre in zalednega kraškega območja dolgoročno rešena.

Za rešitev problema deficitarnosti preskrbe pitne vode na obalnokraškem območju je bila kot pomemben vir identificirana voda s porečja reke Reke. Konkretnije je bila predlagana izgradnja vodnega zadrževalnika na enem večjih pritokov reke Reke, potoku Padež. Večji pritok Padeža je potok Suhorka, ki naj bi bil mikrolokacijsko tudi najprimernejši za izgradnjo vodne akumulacije.

Velikost prispevnega območja Padeža znaša 43,7 km² kar predstavlja približno desetino porečja reke Reke, ki obsega 422 km². Položaj porečja Padeža na šifrantu padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije je prikazan na sliki 3.1. Prispevna površina potoka Padež do sotočja s Suhorko znaša 24,4 km², prispevno območje Suhorke gorvodno od sotočja s Padežem pa 17,9 km². Manjša naselja (Prelože, Tatre, Kozjane) se nahajajo na samih obronkih Brkinskega gričevja, po katerih poteka tudi razvodnica na južnem delu porečja Padeža. Tudi širše območje Brkinov je redko naseljeno, povprečna gostota poselitve znaša pod 5 ljudi/km². Pobočni in dolinski predeli porečja Padeža so skoraj popolnoma neposeljeni.



Slika 3.1: Porečje reke Reke (svetlomodra) in Padeža (temnomodra) na šifrantu padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije (vir: Šraj, 2000).

Figure 3.1: The Reka river watershed (light blue) and the Padež stream watershed (dark blue) on the Watershed Coding System of the Republic of Slovenia (source: Šraj, 2000).

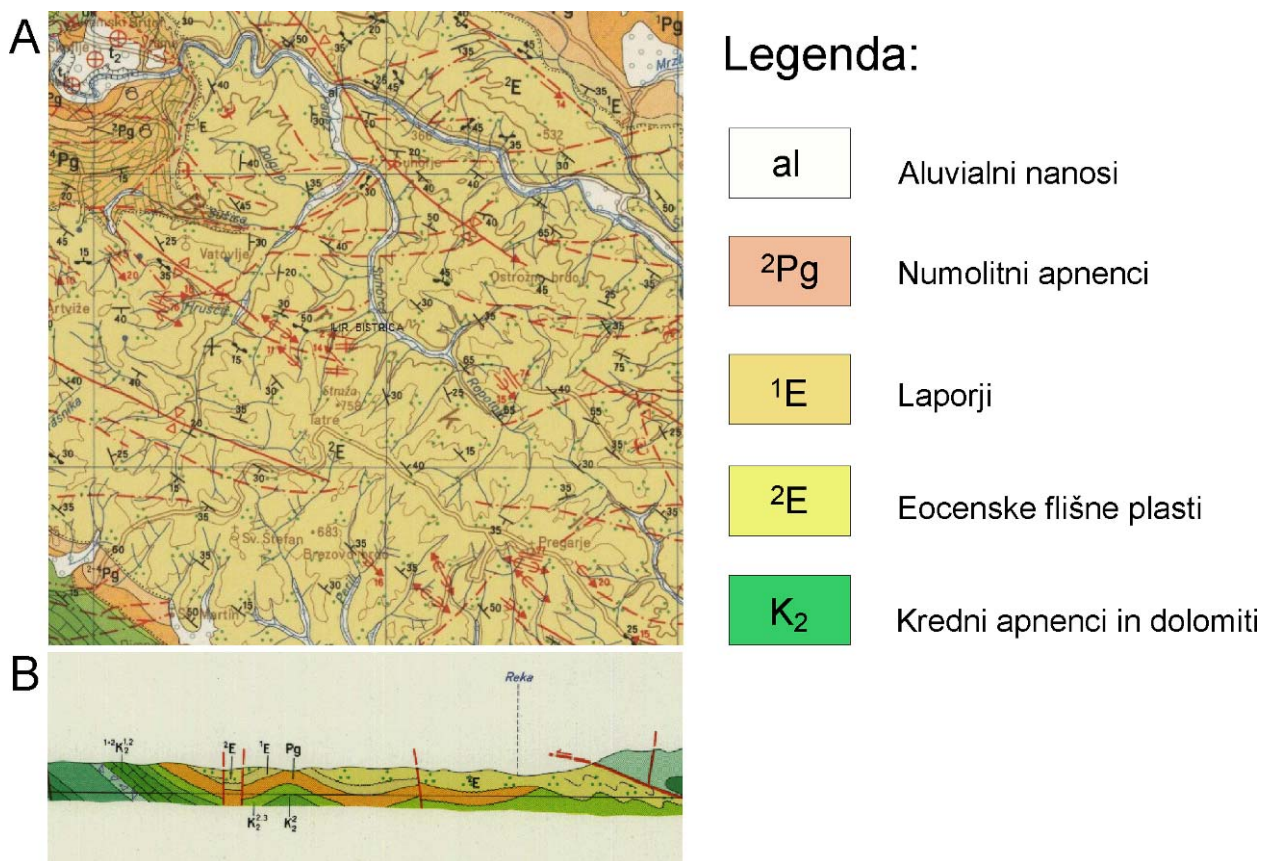
3.2 OPIS POREČJA PADEŽA

3.2.1 Geologija in geomorfologija

Glede na geološko sestavo širše območje sestavljata Komenska in Snežniška narivna gruda. Na komensko narivno grudo je narinjen Snežniški nariv. Med Ilirsko Bistrico in Vremskim Britofom leži Brkinski terciarni bazen (Buser et al., 1970, Jurkovšek et al., 1996).

Prispevno območje Padeža leži v hribovitem območju Brkinov z največjo nadmorsko višino 811 m. Širše področje se označuje v geološkem smislu kot Brkinski terciarni bazen, ki ga sestavljajo eocenske kamnine (fliš), slika 3.2. Eocenske kamnine na obravnavanem območju so v litološkem pogledu zmerno heterogene in povečini vodoneprepustne. Podlago terciarnim plastem gradijo kredne karbonatne kamnine, to so predvsem kredni apnenci in delno dolomiti, le v manjši meri paleogenski apnenci. Te plasti obdajajo z vseh strani brkinski terciarni bazen (Geoinženiring, 2004). Območje ima sinklinalno zgradbo in je sorazmerno zelo nagubano, kar je posledica sekundarnih gravitacijskih gibanj. V njem je jasno izražena dinarska in prečno dinarska orientacija geomorfoloških strukturnih elementov. Obliko reliefa na splošno narekujejo tipi posameznih kamnin in izraziti tektonski elementi. Območja, kjer prevladujejo mehkejšje lapornate plasti, so blago zaobljena z blagimi vzpetinami in debelejšim deluvialnim pokrovom. Na območjih, kjer prevladujejo trše plasti peščenjaka, so pobočja strma, izrazitejši so grebeni, opazni so izdanki trših kamnin na površju (Jurkovšek et al., 1996).

Območje prečka več manjših in večjih prelomov, ki potekajo prečno na dolino in vzporedno z njo ter delijo kamnine v večje in manjše grude. Višja območja sestavlja fliš, v dolinskem delu pa deluvialne in proluvialne odkladnine z ostanki starih teras. Flišni sedimenti so glede na litološki sestav porazdeljeni v naslednje litološke enote: flišni lapor, bazalni cementni laporji in flišni peščenjaki. Glede na mesto nastanka v sedimentacijskem bazenu prevladujejo na posameznih območjih lapornate plasti, peščene in hitro izmenjujoče se od nekaj centimetrov do 2 m debele plasti laporja in peščenjaka. Sveže flišne plasti so sive, sivomodre ali sivozelene barve (Drobne, 1976; Geoinženiring, 2004). Preperele plasti so zaradi železovih oksidov rjavordeče barve in na splošno manj odporne.



Slika 3.2 (A): Pregledna geološka karta hribovitega območja Brkinov (vir: Osnovna geološka karta SFRJ, 1972).

Slika 3.2 (B): Geološki profil območja v smeri SV–JZ (vir: Osnovna geološka karta SFRJ, 1972).

Figure 3.2 (A): Geological map of the Brkini hilly area (source: Geological map of SFRJ, 1972).

Figure 3.2 (B): Geological profile of the area in the NE–SW direction (source: Geological map of SFRJ, 1972).

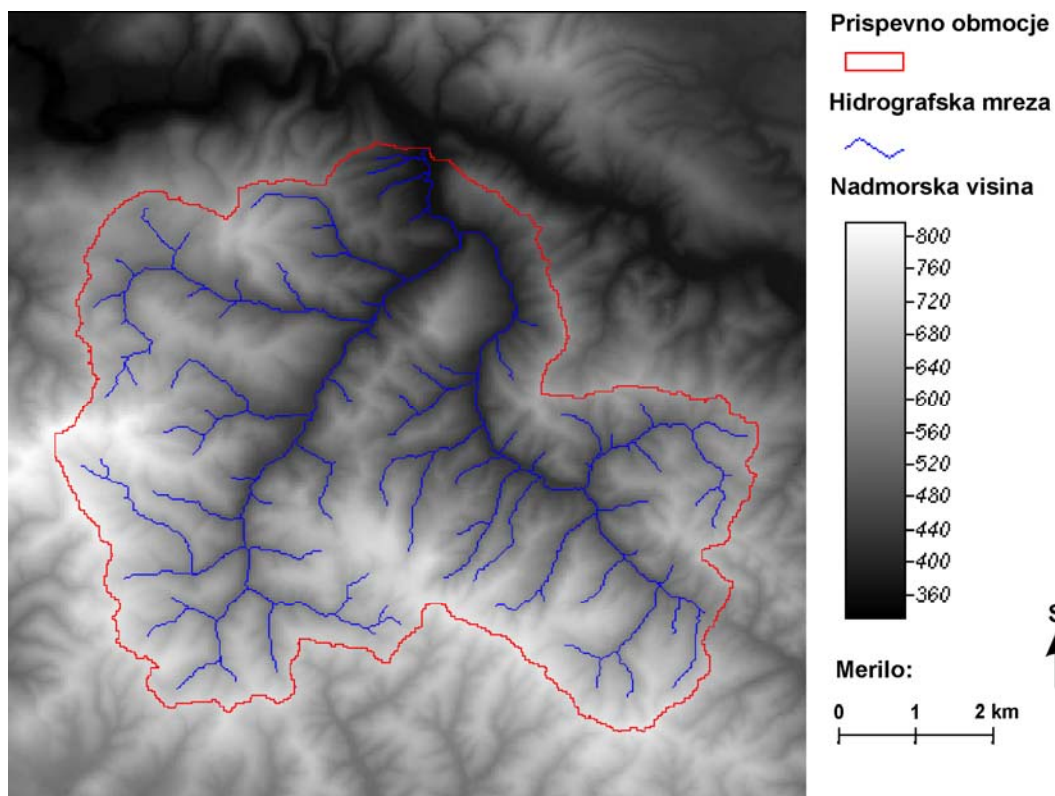
Eocenski fliš je heterogene sestave, opazno je hitro menjavanje različnih plasti peščenjaka z glinastimi in lapornatimi plastmi. Debelina flišnih sedimentov je v brkinskem terciarnem bazenu ocenjena na 400 do 600 m (Jurkovšek et al., 1996). Zgornji del flišnih plasti je običajno razpokan in močno preperel. Na prispevnem območju se mestoma pojavlja tudi deluvialna glina. Svetlorjava pusta ali meljna glina vsebuje koščke in drobce flišnih kamnin. Nahaja se na položnih vznožnih predelih s prevladujočimi plastmi laporja. Najmlajše sedimente predstavljajo aluvialni nanosi potokov, ki so odloženi v osrednjih dolinah Padeža in Suhorke. V manjših količinah in debelinah se mestoma pojavljajo tudi v dolinah manjših pritokov. Glede na zrnavostno sestavo se med aluvialnimi plavinami najpogosteje nahajajo prodi, peski in v manjši meri glineni delci. Prevladujejo grobozrnati sedimenti, debelina plasti aluvialnih sedimentov v dolini Padeža dolvodno od sotočja s Suhorko je okoli 4 m (Geoinženiring, 2004).

S hidrogeološkega vidika sodijo flišne plasti v skupino nepropustnih oz. slabo propustnih kamnin, zato so na flišnih sedimentih pogostni površinski vodni tokovi. Na prispevnem območju Padeža z osrednjima vodotokoma Padež in njegovim pretokom Suhorko je hidrografska mreža zelo dobro razvita, s pobočja dolin obeh potokov pritečejo številni stranski potoki, ki predstavljajo večinoma nestalne površinske vodotoke. Gostota hidrografske mreže znaša $1,94 \text{ km/km}^2$. Lokalno, kjer se pojavljajo peščenjaki, je lahko vodoprepustnost podlage večja, prav tako pa so vodoprepustnejši tudi zgornji deli flišnih plasti, ki so običajno razpokani in močno prepereli. Na splošno so vodoprepustnejše plasti aluvialnih sedimentov v dolinskem predelu in predstavljajo akumulacijo podzemne vode. Vrednosti koeficienta prepustnosti flišnih plasti se gibljejo med 10^{-5} in 10^{-6} m/s, z naraščanjem globine se vodoprepustnost flišnih plasti manjša (Geoinženiring, 2004).

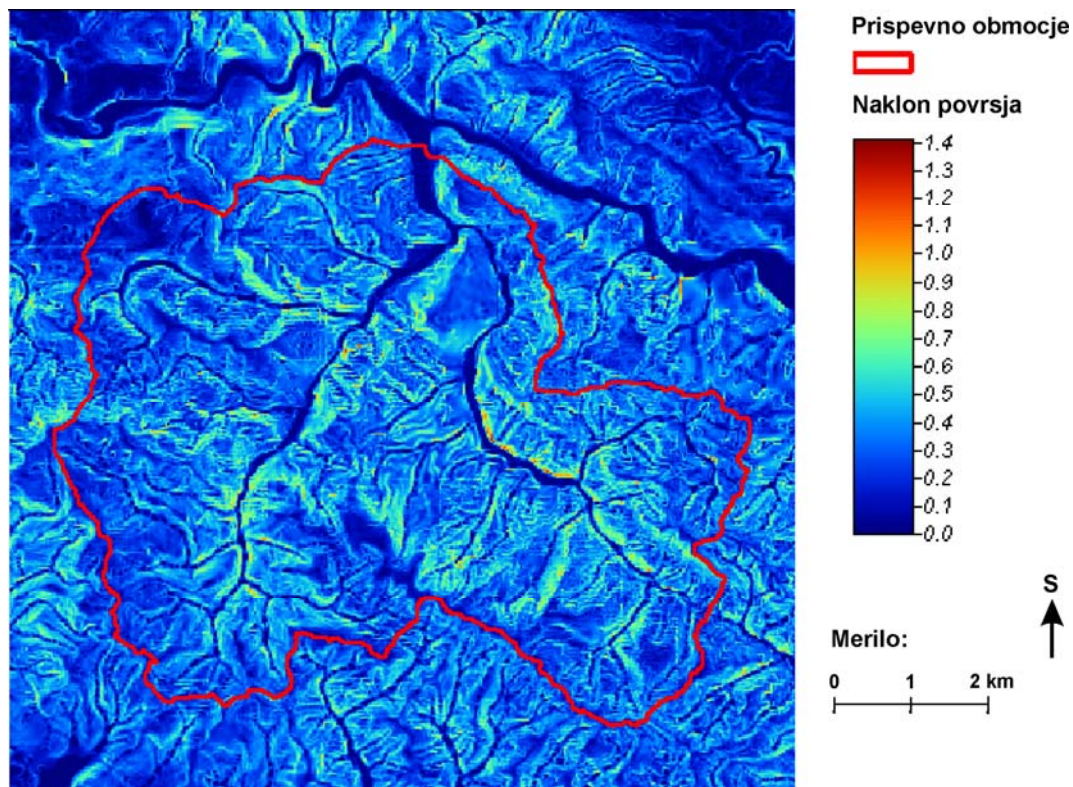
Prispevno območje Padeža na digitalnem modelu reliefa z generirano mrežo vodotokov je prikazano na sliki 3.3. Za analizo geomorfoloških in hidromorfoloških značilnosti je bil uporabljen digitalni model reliefa obravnavanega območja, katerega prostorska natančnost znaša 25 m (GURS, 2002). Analiza digitalnega modela reliefa je bila izvedena z GIS-orodjema (geografski informacijski sistem) MapWindow GIS in SAGA GIS.

Osrednji del ozemlja zaznamujeta dolini Padeža in Suhorke. Sotočje Padeža in Suhorke je na nadmorski višini 376 m. Sotočje Padeža z reko Reko je na nadmorski višini 358 m. Povprečna nadmorska višina površja na porečju Padeža znaša 585 m. Smeri Padeža in Suhorke sta tektonsko pogojeni. Dolina Suhorke leži v dinarski smeri z izjemo nekaj krajših odsekov z odklonom prečno na dinarsko smer. Dolina Padeža poteka v prečno dinarski smeri SV–JZ.

Potoka Padež in Suhorka ter njuni pritoki so v erodibilno osnovno hribino vrezali globoke doline. Na sliki 3.4 je iz prostorske razporeditve naklona površja (kot razmerja med višinsko razliko terena na horizontalni razdalji) razviden povečan naklon površja na območjih, ki se nahajajo v neposredni bližini vodotokov, kar je indikator vrezanosti vodotokov v hribinsko osnovo.

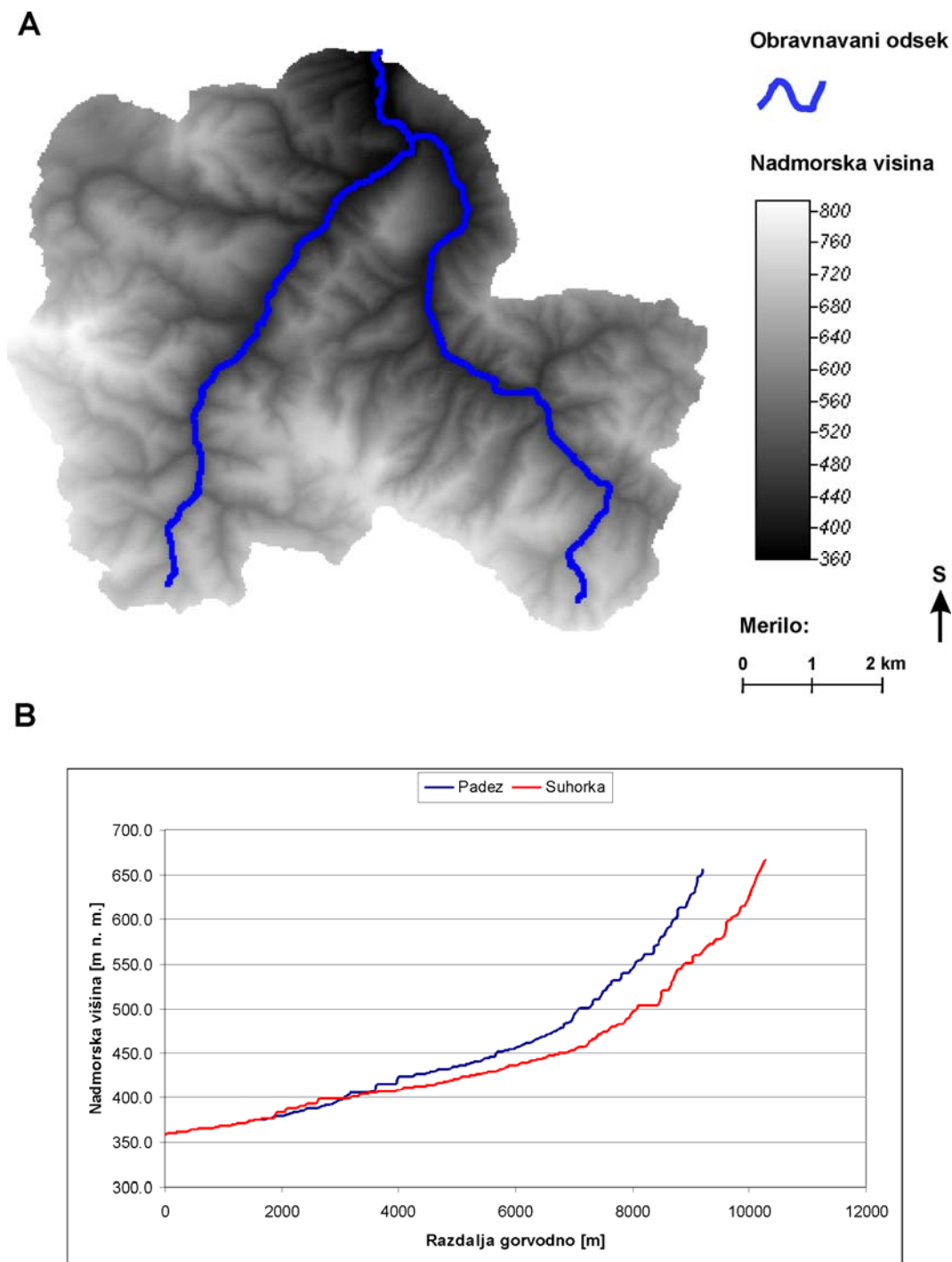


Slika 3.3: Prispevno območje Padeža in hidrografska mreža vodotokov na digitalnem modelu reliefa.
Figure 3.3: The Padež stream watershed and the stream network on the digital elevation model.



Slika 3.4: Nakloni površja na območju porečja Padeža.
Figure 3.4: Hillslope inclinations on the Padež stream watershed.

Na sliki 3.5 sta prikazana vzdolžna prereza Padeža in Suhorke od povirnih predelov do iztoka v reko Reko.



Slika 3.5 (A): Obravnavana odseka Padeža in Suhorke.

Slika 3.5 (B): Vzdolžna prereza Padeža in Suhorke.

Figure 3.5 (A): Padež and Suhorka stream reaches.

Figure 3.5 (B): Longitudinal cross sections of the Padež and Suhorka stream reaches.

Dolžina obravnavanega odseka Padeža znaša 9210 m, odsek Suhorke pa je dolg 10.290 m. Povprečen padec potoka Padež na obravnavanem odseku znaša 3,2 %, Suhorke pa 3,0 %.

3.2.2 Pedologija

Tla na območju Brkinov so kislega pH, razvila so se humusna silikatna tla, prisotni so tanki humusni sloji na flišni podlagi. Z naraščanjem strmine se debelina tal tanjša, tla postanejo bolj skeletna. V razširjenih in mokrotnih dolinah so tla oglejena ilovnata in debela. Glede na obstoječo slovensko klasifikacijo tal (JKT) so tla na območju Brkinov klasificirana kot distrična rjava tla, tipična na flišu, globoka (Pedološka karta Slovenije v merilu 1 : 25.000, 2002). Podrobnejši opis talnega profila po posameznih horizontih, ki je bil opravljen v okviru naloge, je podan v preglednici 3.1. Talni horizonti so klasificirani po obstoječi slovenski klasifikaciji tal (JKT) in novi mednarodni klasifikaciji tal WRB 2006 (World Reference Base for Soil Resources) Organizacije Združenih narodov za prehrano in kmetijstvo (FAO). Po klasifikaciji tal WRB 2006 so tla na območju Padeža klasificirana kot Haplic Cambisol (Humic, Hyperdystric, Endoskeletalic).

Preglednica 3.1: Podrobnejši opis talnega profila na območju Padeža po posameznih talnih horizontih (nadaljevanje na naslednji strani).

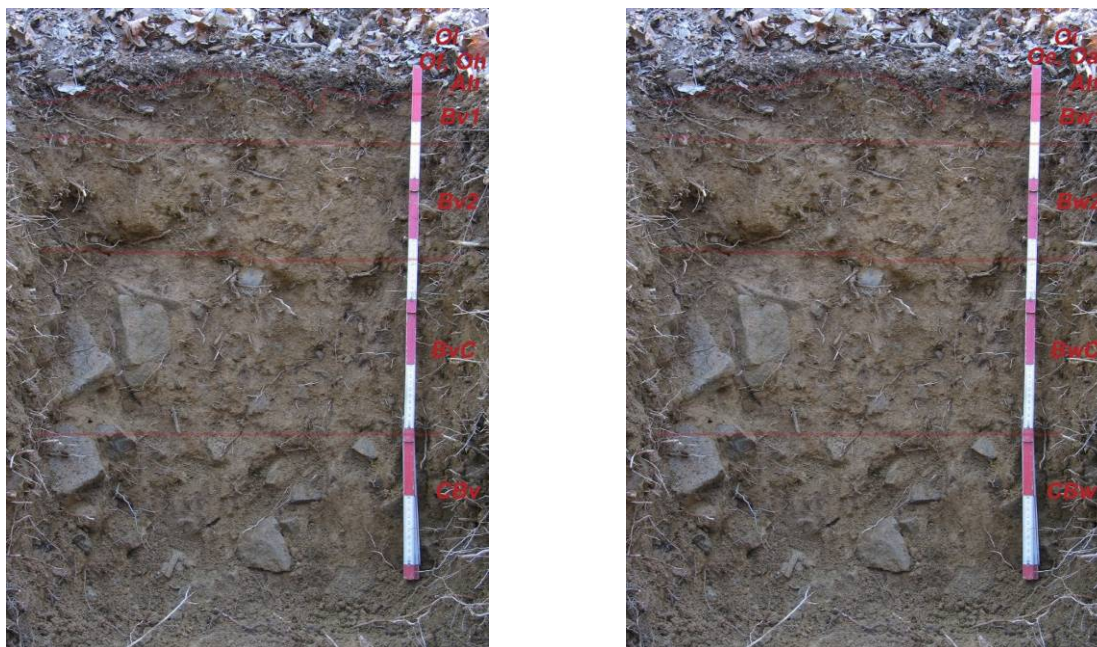
Table 3.1: Detailed description of the soil profile on the Padež stream watershed through soil horizons (continued on the next page).

Št.	Oznaka po JKT	Oznaka po WRB 2006	Globina [cm]	Opis talnega horizonta
H1	Oi	Oi	5–3	Nerazgrajena /zelo slabo razgrajena organska snov. Opad listja, iglic, vejic in ostalih rastlinskih ostankov. Ostro prehaja v spodnji H. Valovita meja. Suh. Miceliji gliv niso opazni. Favna: redki razpršeni organizmi.
H2	Of	Oe	3–2,5	Slabo razgrajena organska snov. Ostro prehaja v spodnji H. Valovita meja. Suh. Malo slabo vidnih micelijev gliv, razpršenih na širši površini. Favna: organizmi pogosti.
H3	Oh	Oa	2,5–0	Humificirana organska snov. Ostro prehaja v spodnji H. Valovita meja. Nekoliko vlažen. Barva: 7,5 YR3/1. Močno izražena mrvičasta struktura, velikosti pod 1 mm. Rahla konsistenca. Malo slabo vidnih micelijev gliv, razpršenih na širši površini. Favna: redki razpršeni organizmi. Korenine: mnogo. Organska snov: organski.

H4	Ah	Ah	0–1	Humusno akumulativni H. Ostro prehaja v spodnji H. Valovita meja. *Tekstura – prstni preizkus: MI. 5 % toporobih, rahlo preperelih, skeletnih delcev velikosti povprečno 1,5 cm. Nekoliko vlažen. Barva: 10 YR3/4. Zmerno izražena grudičasta struktura, velikosti povprečno in maks. 1 mm. Konsistenca: zelo drobljiv. Malo slabo vidnih micelijev gliv, razpršenih na širši površini. Favna: organizmi niso opazni. Korenine: mnogo. Organska snov: močno humozen.
H5	Bv1	Bw1	1–11	Humusno akumulativni H. Ostro prehaja v spodnji H. Valovita meja. *Tekstura – prstni preizkus: MGI. 5 % toporobih, rahlo preperelih, skeletnih delcev velikosti povprečno 1,5 cm. Vlažen. Barva: 10 YR5/4. Zmerno izražena oreškasta struktura, velikosti povprečno 5 mm in maks. 15 mm. Konsistenca: drobljiv. Miceliji gliv: niso opazni. Favna: organizmi niso opazni. Korenine: srednje. Organska snov: po rovih korenin.
H6	Bv2	Bw2	11–30	Humusno akumulativni H. Jasno prehaja v spodnji H. Valovita meja. *Tekstura – prstni preizkus: MGI. 5 % toporobih, rahlo preperelih, skeletnih delcev velikosti povprečno 1,5 cm. Vlažen/moker. Barva: 10 YR5/4. Zmerno izražena oreškasta struktura, velikosti povprečno 10 mm in maks. 25 mm. Konsistenca: drobljiv. Miceliji gliv: niso opazni. Favna: organizmi niso opazni. Korenine: malo. Organska snov: po rovih korenin.
H7	BvC	BwC	30–60	Humusno akumulativni H. Jasno prehaja v spodnji H. Valovita meja. *Tekstura – prstni preizkus: MGI. 20 % toporobih, rahlo preperelih, skeletnih delcev velikosti povprečno 5 cm. Vlažen/moker. Barva: 10 YR5/6. Zmerno izražena oreškasta struktura, velikosti povprečno 15 mm in maks. 40 mm. Konsistenca: drobljiv. Miceliji gliv: niso opazni. Favna: organizmi niso opazni. Korenine: malo. Organska snov: po rovih korenin.
H8	CBv	CBw	60–90+	Humusno akumulativni H. *Tekstura – prstni preizkus: GI. 60 % toporobih, rahlo preperelih, skeletnih delcev velikosti povprečno 7 cm. Vlažen/moker. Barva: 10 YR5/6. Zmerno izražena oreškasta struktura, velikosti povprečno 10 mm in maks. 20 mm. Konsistenca: drobljiv. Miceliji gliv: niso opazni. Favna: organizmi niso opazni. Korenine: malo. Organska snov: po rovih korenin.

Na sliki 3.6 je prikazan talni profil z oznako talnih horizontov po klasifikaciji JKT (slika 3.6 levo) in klasifikaciji WRB 2006 (slika 3.6 desno). Rezultati laboratorijske analize talnih

vzorcev, odvzetih na različnih globinah talnega profila aprila leta 2007, so podani v preglednici 3.2.



Slika 3.6: Talni profil na Padežu z oznako talnih horizontov po klasifikaciji JKT (levo) in klasifikaciji WRB 2006 (desno); (foto: T. Kralj, 11. 4. 2007).

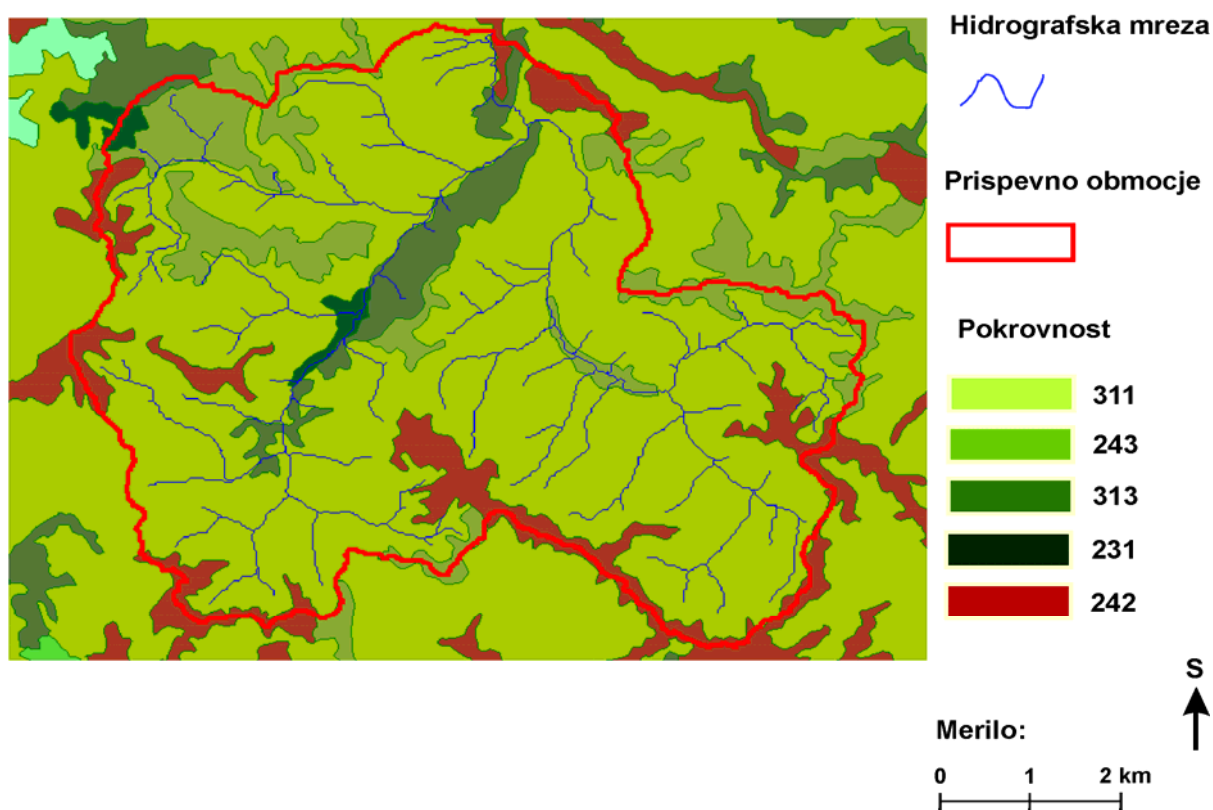
Figure 3.6: Soil profile on the Padež watershed with soil horizons labeled according to JTK classification (left) and WRB 2006 classification (right); (photo: T. Kralj, 11/4/2007).

Preglednica 3.2: Rezultati laboratorijske analize talnih vzorcev odvzetih na različnih globinah talnega profila.
Table 3.2: Results of the laboratory analysis of the soil samples taken at different soil profile depths.

Oznaka JKT	Globina [cm]	pH	Org. snov [%]	C [%]	N skup. [%]	Razmerje C/N	NH ₄ -N [mg/100g]	NO ₃ -N [mg/100g]	Tekstura [%]				
									Pesek	Melj grobi	Melj fini	Glina	
Ol	5-3			44,9	1,15	39,0							
Of	3-2,5			33,6	1,07	31,4							
Oh-Ah	2,5-1	3,6	19,3	11,2	0,61	18,4	0,33	0,23	35,3	23,0	23,5	18,2	
Bv1	1-11	3,9	5,2	3,0	0,19	15,8	0,29	0,20	35,7	17,3	29,6	17,4	
Bv2	11-30	4,0	3,5	2,0	0,14	14,3	<0,20	0,20	35,3	15,9	30,2	18,6	
BvC	30-60	4,0	3,3	1,9	0,12	15,8	<0,20	0,23	33,8	16,3	29,6	20,3	
CBv	60-90	4,1	0,8	0,5	0,05	10	<0,20	0,20	34,3	15,3	27,9	22,5	

3.2.3 Pokrovnost tal

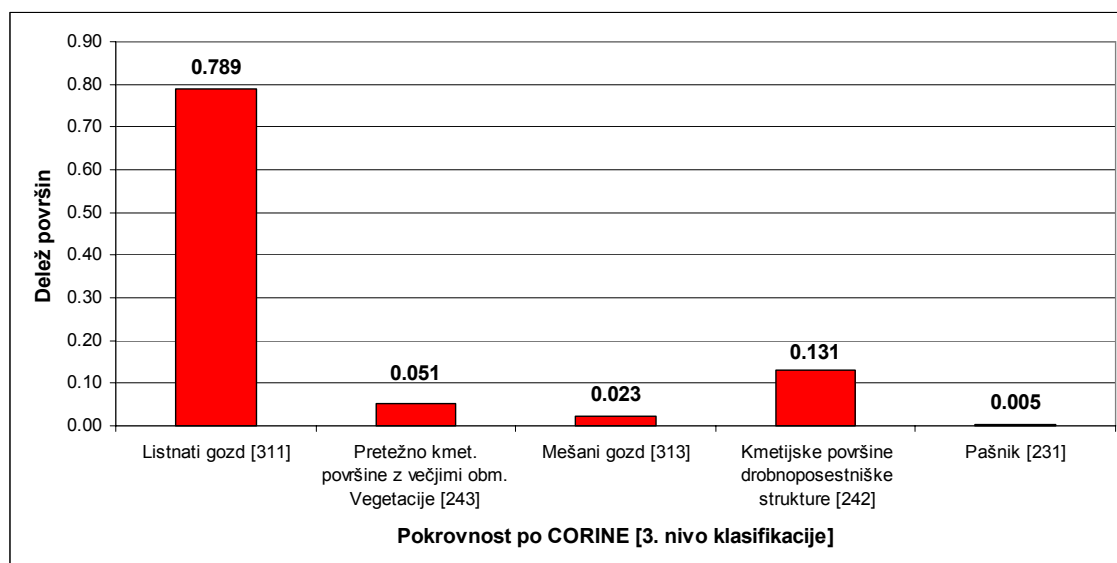
Prvotni gozd na območju Brkinov se je ohranil le v globokih, ozkih in težko dostopnih grapah, med katere lahko uvrščamo tudi dolini Suhorke in Padeža. Pokrovnost tal je povzeta po klasifikaciji pokrovnosti tal CORINE (CORINE, 2000). Prostorska razporeditev pokrovnosti tal je prikazana na sliki 3.7, deleži posamezne vrste pokrovnosti so prikazani na sliki 3.8, kjer je podana tudi obrazložitev številskih oznak pokrovnosti.



Slika 3.7: Prostorska razporeditev pokrovnosti tal na prispevnem območju Padeža glede na klasifikacijo pokrovnosti tal CORINE (razlaga številске oznake pokrovnosti je podana na sliki 3.8).

Figure 3.7: Spatial distribution of the land cover on the Padež watershed according to the CORINE land cover (an explanation of the numerical labels of the land cover is given in Figure 3.8).

Površine, ki so namenjene izrazito ekstenzivni kmetijski rabi, so razporejene po obronkih najvišjih predelov Brkinov, kjer se nahajajo manjša naselja. Večino dolinskih in pobočnih predelov porečja prekriva listnati gozd. Skupno gozd (listnati in mešani) pokriva 81 % prispevnega območja Padeža. Površine, ki so klasificirane v razred kmetijskih površin drobnoposestniške strukture ter pretežne kmetijske površine z večjimi območji vegetacije, se zaradi manjšanja števila prebivalcev ter posledičnega opuščanja ekstenzivne kmetijske rabe izredno intenzivno zaraščajo.



Slika 3.8: Deleži razredov pokrovnosti prispevnega območja Padeža na 3. nivoju klasifikacije CORINE.
Figure 3.8: Proportions of the land cover classes on the Padež stream watershed according to the 3rd level of the CORINE classification.

Glede na podatke o strukturi gozda so najbolj razširjene drevesne vrste glede na delež hrast graden (*Quercus petraea*) – 31 % delež, črna jelša (*Alnus glutinosa*) – 25 % delež, bukev (*Fagus sylvatica* L.) – 15 % delež, beli gaber (*Carpinus betulus*) – 6 %, cer (*Quercus cerris*) – 6 % in breza (*Betula*) – 4%, (Zavod za gozdove Slovenije, 2000).

3.2.4 Klimatske razmere

Klimatske razmere na območju Brkinov so pogojene z značilno lego, ki predstavlja klimatsko prehodno območje med primorsko in celinsko Slovenijo. Klimatska prehodnost se kaže v spremenljivosti podnebnih razmer na kratkih razdaljah, k pestrosti klimatskih razmer pa dodatno prispeva tudi heterogenost izoblikovanosti površja. Nižje ležeči predeli širšega območja okoli Brkinov tako izkazujejo bolj mediteranske, višje ležeči predeli pa bolj celinske podnebne značilnosti. Meja med temi območji ni ostra, Ogrin (1993) jo je postavil na severni rob doline reke Reke, meja v Brkinih naj bi bila na nadmorskih višinah okoli 500 m. Prehodnost podnebja se najbolj odraža v temperaturah in značilni vetrovnosti (Šebenik, 1996). S celine piha burja, z morske strani pa toplejši vetrovi (jugo). Na žalost pa je podatkov o klimatskih razmerah na območju Brkinov zelo malo. Tudi v preteklosti, ko je bila mreža klimatoloških postaj v Sloveniji gostejša, je bilo področje Brkinov zelo slabo pokrito ali povsem nepokrito (ARSO, 2001). Najbližja meteorološka postaja, ki je od prispevnega

območja Padeža oddaljena približno 20 km, se nahaja v Ilirski Bistrici; v zadnjem času je v okviru mreže avtomatskih meteoroloških postaj začela delovati tudi postaja v neposredni bližini Škocjanskih jam.

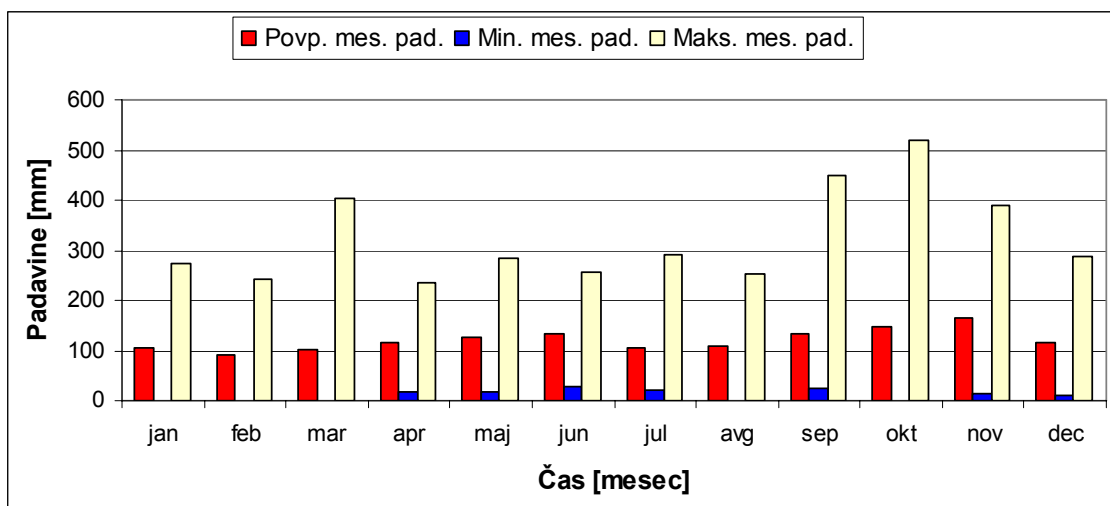
3.2.4.1 Temperature

Podatki o temperaturi za Ilirsko Bistrico so naslednji: povprečna letna temperatura zraka v Ilirski Bistrici znaša 9,6 °C, srednja januarska temperatura 0,8 °C, srednja julijska temperatura zraka pa 18,7 °C (Uljan, 2000). V obdobju od novembra do februarja prihaja ob mirnih tipih vremena v depresijskih območjih Brkinov do močne temperaturne inverzije, ki jo pogosto spremlja megla. Ob takih razmerah so dnevne temperaturne amplitude manjše, ob jasnem vremenu pa so dnevna temperaturna nihanja precejšnja. V Ilirski Bistrici znašajo povprečna minimalna letna/januarska/julijska temperatura zraka 4,4 °C/−3,4 °C/12,1 °C, povprečna maksimalna letna/januarska/julijska pa 15,5 °C/5,3 °C/25,5 °C (Klimatografija Slovenije, Temperature 1961–1990, 1995). V Brkinih nad 500 m n. m. znaša povprečna letna temperatura zraka 8 do 9 °C, srednja januarska temperatura je okrog 0 °C, izpostavljene grebene v Brkinih skoraj vedno hladi veter (Šebenik, 1996). V Ilirski Bistrici traja vegetacijska doba pri pragu 5 °C od 14. 3. do 20. 11., kar znese 251 dni, medtem ko pri pragu 10 °C traja od 23. 4. do 18. 10. oziroma 178 dni (Meteorološki letopis, 1999).

3.2.4.2 Padavine

Za območje Brkinov je značilno, da zaradi prevladujočega gibanja vlažnih zračnih mas v smeri JZ–SV južna pobočja Brkinov dobijo nekoliko večjo letno količino padavin kot severni predeli (Klimatografija Slovenije, Padavine 1961–1990, 1995). Tako je dolgoletna povprečna količina padavin (obdobje 1961–2004) na padavinski postaji Podgrad, ki se nahaja na vznožju južnih pobočij Brkinov, 1545 mm padavin, na padavinski postaji Tatre, ki se nahaja na samem obronku Brkinov, pa je dolgoletno povprečje padavin 1447 mm padavin (KSH, 2006). Tatre so obenem najbolj reprezentativna padavinska postaja z dolgoletnim nizom padavinskih podatkov za prispevno območje Padeža. S posameznimi vmesnimi prekinitvami obstajajo podatki o padavinah za obdobje 1930 do 1983, ko je bila padavinska postaja opuščena. Maksimalne letne padavine v omenjenem merskem obdobju znašajo 2428 mm, minimalne pa 846 mm. Viški padavin se pojavljajo predvsem v jesenskem času v obdobju september–

december. Povprečne, minimalne in maksimalne mesečne količine padavin za padavinsko postajo Tatre so prikazane na sliki 3.9.



Slika 3.9: Povprečne, minimalne in maksimalne mesečne padavine na padavinski postaji Tatre.
Figure 3.9: Average, minimum and maximum monthly precipitation for rain gauge station Tatre.

V najnižjih delih Brkinov (predeli z n. m. v. pod 500 m) povprečna letna maksimalna debelina snežne odeje ne preseže 20 cm. V posameznih letih sneg sploh ne pade, medtem ko je dni v letu s snežno odejo v povprečju pod 20. V višjih predelih Brkinov z nadmorsko višino med 500 m in 600 m (osojna pobočja, severni del) oz. 700 m (prisojna pobočja, južni del) je povprečno letno število dni s snežno odejo med 20 in 30, povprečna letna maksimalna debelina snežne odeje pa je 20 do 30 cm. V najvišjih delih Brkinov vrednosti znašata 30–50 dni (Klemenčič, 1959), obdobja s snežno odejo pa so v zadnjih letih vse krajša.

3.2.4.3 Sončno obsevanje

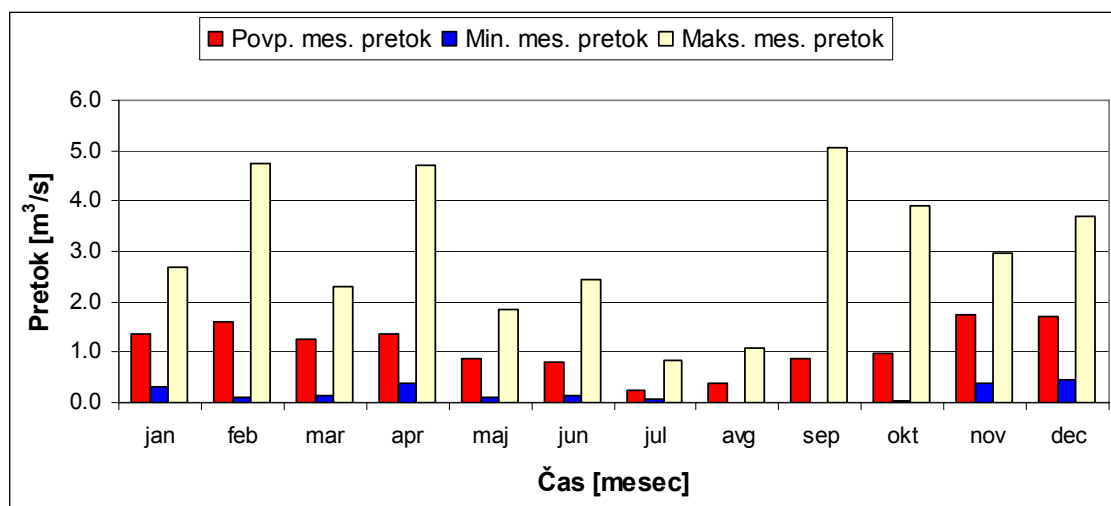
Količina sončnega obsevanja je zaradi razgibanosti reliefa v Brkinih zelo spremenljiva. Po Gabrovcu in Kastelčevi (1998) letno največ sončne energije, 4600–4800 MJ/m² prejmejo južna pobočja Brkinov. Brkini v nižjih in osojnih legah prejmejo 3400–4200 MJ/m².

3.2.5 Hidrološke lastnosti porečja

Nizka vodoprepustnost flišne podlage na prispevnem območju Padeža vpliva na veliko hidrološko odzivnost porečja Padeža na padavinske dogodke. Formacija padavinskega odtoka zaradi topografskih lastnosti površin ter posledično dobro razvite hidrografske mreže poteka

intenzivno. Povprečni naklon površin na območju porečja Padeža znaša 33 %, kar se odraža v skoraj hudourniškem značaju Padeža in Suhorke ter nekaterih večjih pritokov, ki se strmo spuščajo po pobočjih proti osrednjima dolinama.

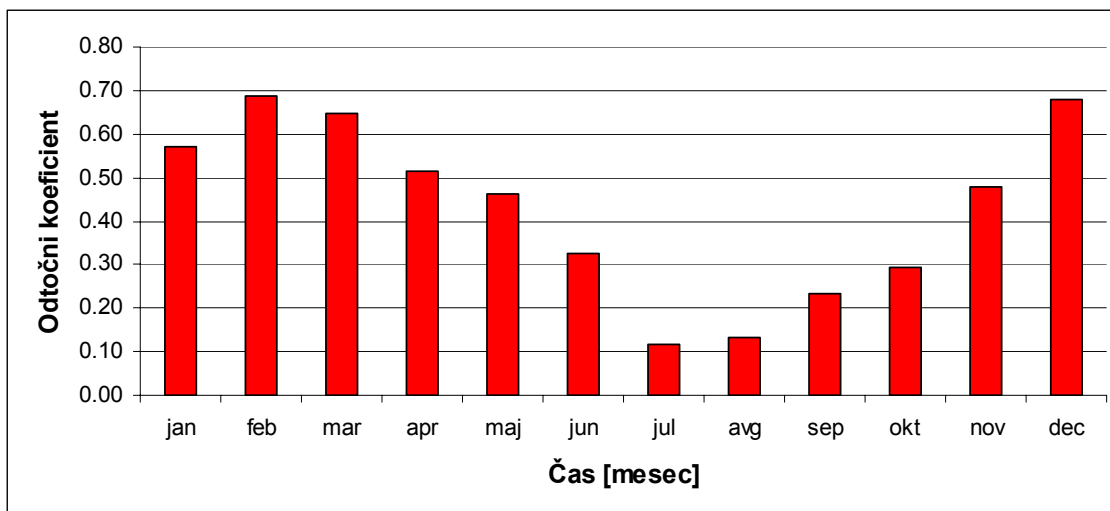
Vrednosti povprečnih, minimalnih in maksimalnih mesečnih pretokov na vodomerni postaji Suhorje na podlagi dnevni odčitkov vodomerne late med letoma 1958 in 1973 so prikazane na sliki 3.10. Vodomerna postaja Suhorje se je nahajala pribl. 150 m dolvodno od sotočja Padeža in Suhorke in sovpada z vodomerno postajo Padež03 (lokacija V. Padež (zg.)). Povprečni dnevni pretok v opazovanem obdobju znaša $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 3.10: Povprečni, minimalni in maksimalni mesečni pretoki na vodomerni postaji Suhorje.
Figure 3.10: Average, minimum and maximum monthly discharges at water station Suhorje.

Čeprav je prispevno območje Padeža ($24,4 \text{ km}^2$) večje od prispevnega območja Suhorke ($17,9 \text{ km}^2$), znaša dejanski prispevek Suhorke k skupni količini odtoka s celotnega prispevnega območja okoli 52 % (KSH, 2006). Razlike med velikostjo pretoka Suhorke in Padeža so izrazite zlasti v poletnem času, ko se zgodi, da Padež v spodnjem dolinskem delu, kjer je več aluvialnih naplavin, lahko presahne, Suhorka pa ne. Prav tako kmalu po nastopu padavinskih dogodkov zaradi hitrega padavinskega odtoka manjši pritoki Padeža in Suhorke, katerih število je zaradi goste hidrografske mreže precejšnje, presahnejo. Struge manjših potokov so večino časa suhe oz. se v njih nahajajo zelo majhne količine vode.

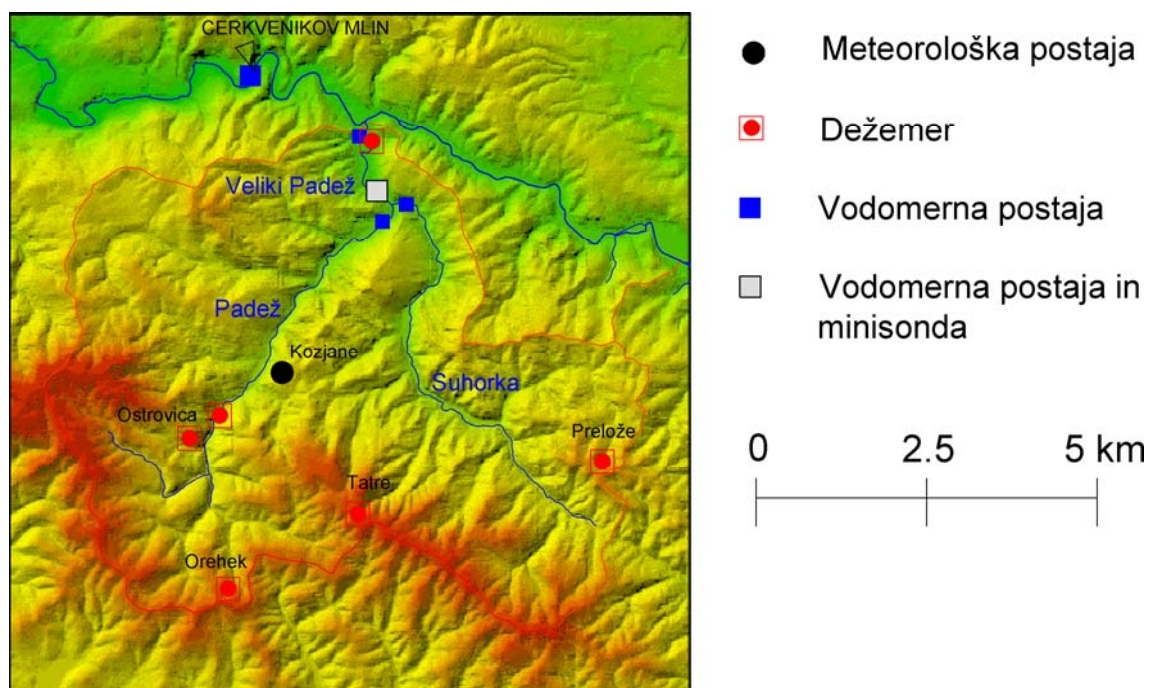
Zaradi velikega deleža gozda so v vegetacijskem obdobju padavinske izgube preko evapotranspiracije zelo velike. Na podlagi podatkov o mesečnih padavinah na padavinski postaji Tatre in dnevnikih odčitkih late na vodomerni postaji Suhorje v obdobju 1958 do 1973 so na sliki 3.11 podani povprečni mesečni odtočni koeficienti s porečja Padeža.



Slika 3.11: Povprečni mesečni koeficient odtoka s prispevnega območja Padeža.
Figure 3.11: Average monthly runoff coefficient for the Padež stream watershed.

3.3 MERSKE METODE

Večji del meritev v okviru doktorske disertacije je bil opravljen v sklopu dopolnilnih hidroloških in kemijskih raziskav za potrebe projekta »Ureditev oskrbe prebivalstva s pitno vodo slovenske Istre in zalednega kraškega območja«. Na obravnavanem območju je bil konec leta 2004 in v začetku leta 2005 vzpostavljen hidrološki monitoring, ki je zajemal meritve padavin, meteoroloških razmer, nivojev vode in pretokov. V okviru kemijskih raziskav so se v letih 2005 in 2006 1- do 2-krat mesečno jemali vzorci vode iz Padeža in Suhorka za laboratorijske analize, ki jih je izvajal Zavod za zdravstveno varstvo Maribor. V letu 2006 se je hidrološki monitoring dopolnil s kontinuiranimi meritvami kemizma vode. Na sliki 3.12 je prikazana razporeditev merske opreme na prispevnem območju Padeža, podatki o merski opreми so podani v preglednici 3.3.



Slika 3.12: Merska oprema na prispevnem območju Padeža.
Figure 3.12: Measuring equipment on the Padež stream watershed.

Preglednica 3.3: Karakteristike merske opreme na prispevnem območju Padeža. Delež površine prispevnega območja (*), ki ga pokriva posamezen dežemer, je določen s Thiessenovimi poligoni.

Table 3.3: Characteristics of the measuring equipment on the Padež stream watershed. Proportion of the watershed area (*) covered by a rain gauge is defined by Thiessen polygons.

Vrsta merske opreme	Lokacija	Y [m]	X [m]	Z [m]	Delež površine (*)
Dežemer	Prelože	5432498	5051263	662	0,21
Dežemer	Tatre	5429129	5050661	748	0,19
Dežemer	Orehek	5427146	5049392	735	0,07
Dežemer	Ostrovica	5426283	5052222	691	0,19
Dežemer	dolina Padez (sp.)	5429364	5056162	368	0,17
Dežemer	dolina Padez (zg.)	5426983	5052032	518	0,17
Meteorološka postaja	Kozjane	5428109	5052731	605	-
Merilec nivoja gladine	Padež	5429558	5054994	395	-
Merilec nivoja gladine	Suhorka	5429800	5055223	386	-
Merilec nivoja gladine	V. Padež (zg.)	5429574	5055303	379	-
Merilec nivoja gladine	V. Padež (sp.)	5429234	5056289	365	-
Minisonda	V. Padež (zg.)	5429574	5055303	379	-

3.3.1 Meritve padavin

Padavine smo merili z avtomatskimi dežemeri ONSET RG2-M, lokacije dežemerov so podane v preglednici 3.3 in razvidne iz slike 3.12. Dežemer deluje na principu zvratnega sistema (angl. »tipping bucket«), vsak zvrat predstavlja 0,2 mm padavin. Zvratni mehanizem je povezan s HOBO pomnilnikom, ki beleži čas vsakega zvrata. Podatki se pobirajo enostavno, s pomočjo majhnega prenosnega spomina (HOBO shuttle).

3.3.2 Meritve ostalih meteoroloških dejavnikov

Meteorološke razmere smo spremljali s prenosno avtomatsko meteorološko postajo Vaisala MAWS201, ki je postavljena na Kozjanah (slika 3.12). Avtomatska meteorološka postaja je opremljena z dežemerom, merilcem vetra, senzorji za merjenje temperature, relativne vlažnosti zraka in sončnega obsevanja. Potrebno energijo za delovanje postaja pridobi s pomočjo sončnih celic. Preko GSM-modema je meteorološka postaja povezana z GSM-

omrežjem, kar omogoča prenos podatkov s postaje neposredno na računalnik, ki se nahaja v stavbi fakultete v Ljubljani.

3.3.3 Meritve nivoja gladine in pretokov

Za zvezno spremljanje nivojev gladin vode smo uporabili ultrazvočni merilec Starflow Unidata Model 6526-51, ki meri pretočne hitrosti, višino vode in temperaturo. Merilec Starflow vsebuje avtomatski zapisovalec podatkov, ki lahko povpreči podatke v izbranem časovnem intervalu. Za merjenje pretokov smo uporabili dva inštrumenta. Srednje in višje pretoke smo merili z merilcem pretočnih hitrosti Flowtracker Handheld ADV, ki deluje na principu Dopplerjevega pojava. Merilec pretočnih hitrosti Flowtracker Handheld ADV ima vgrajen poseben algoritem, ki omogoča neposredni izračun pretoka na podlagi merjenih pretočnih hitrosti. Za meritev nizkih pretokov, ko je uporaba ostalih merilcev pretoka praktično nemogoča, smo uporabili prenosni merilec pretoka Flo-Tracer. Merilec Flo-Tracer na podlagi časovne spremembe koncentracije sledila v vodotoku (v našem primeru določene koncentracije raztopine kuhinjske soli) določi pretok. Meritve pretokov vode so se izvajale v profilih struge, kjer se nahajajo merilci Starflow, kar nam je omogočilo določitev pretočnih krivulj.

3.3.4 Meritve kemizma vode

Minisonda Hydrolab DataSonder 4, ki smo jo uporabili za zvezno spremljanje kemizma vode, je multiparameterska sonda, s katero je možno meriti več parametrov kemizma vode hkrati. Zasnovana je kot prenosna aparatura za analizo površinskih voda in omogoča hitro pridobivanje podatkov o fizikalno-kemijskih karakteristikah vode. Multiparameterska sonda, ki je na voljo na Katedri za splošno hidrotehniko, je opremljena s senzorji za spremljanje temperature vode, pH-vrednosti, koncentracije raztopljenega kisika, elektroprevodnosti, koncentracije skupnih raztopljenih snovi, redoks potenciala, višine vode ter koncentracije nitratnega dušika. Delo s sondo zahteva dobro poznavanje upravljanja s sondo in postopkov za njeno vzdrževanje in umerjanje. V sklop vzdrževanja in umerjanja sonde sodi redno čiščenje senzorjev in skrb za njihovo stalno primerno hidratacijo, nabava svežih kalibracijskih raztopin, zamenjava elektrolitov znotraj senzorjev ter izrabljenega nitratnega ionsko-selektivnega senzorja, katerega predvidena življenjska doba je okoli 6 mesecev. Umerjanje

multiparametrške sonde je precej zamudno in mora biti prilagojeno razponu fizikalnih razmer (temperature, elektroprevodnosti, pH-vrednosti), znotraj katerih potekajo meritve na terenu. Umerjanje sonde smo izvajali v povprečju 2-krat mesečno na fakulteti v Ljubljani. Natančnost nitratnega ionsko-selektivnega senzorja znaša ± 5 % odčitka. Celotno aparaturu poleg same sonde sestavljajo še prenosni spominski modul, kabel za prenos pridobljenih podatkov iz sonde na ročni upravljalnik ter komunikacijski kabel za neposredno povezavo ročnega upravljalnika in osebnega računalnika. Sonda omogoča poljubno nastavitve časovnega koraka zajema podatkov; v našem primeru se je zajem podatkov izvajal s 15-, 30-minutnim in urnim časovnim korakom. Avtonomnost sonde je odvisna od časovne frekvence zajema podatkov ter števila parametrov, ki jih merimo; v primeru 15-minutnega intervala zajema znaša avtonomija ob napajanju z baterijo kapacitete 7,2 Ah in ob normalnih temperaturnih razmerah okoli 3 tedne. Kontinuirane meritve kemizma vode v vodotoku so se izvajale na vodomerni postaji Padež03 (lokacija V. Padež (zg.)). Meritve kemizma padavinske vode se niso izvajale zvezno, analiziral se je skupni vzorec padavin posameznega padavinskega dogodka z dežemera. Laboratorijske analize vode Velikega Padeža in Suhorke, ki jih je v letih 2005 in 2006 izvajal Zavod za zdravstveno varstvo Maribor, so nam služile za kontrolo delovanja multiparametrške sonde.

Natančnost terenskih meritev koncentracij specifičnih ionov s prenosnimi ionsko-selektivnimi senzorji je sicer manjša od laboratorijskih analiz in verjetno nikoli ne bo povsem dosegla njihove natančnosti, omogoča pa sledenje časovni dinamiki, ki je z občasnim jemanjem laboratorijskih vzorcev ni mogoče zaznati (CUAHSI, 2006; Kirchner et al., 2004).

Slike 3.13a–3.13d prikazujejo mersko opremo, ki smo jo uporabili za spremljanje hidroloških, meteoroloških in biogeokemijskih razmer na prispevnem območju Padeža.



Slika 3.13a: Dežemer na Tatrah (foto: S. Rusjan, 12. 7. 2006).

Figure 3.13a: Rain gauge in Tatre (photo: S. Rusjan, 12/7/2006).



Slika 3.13b: Avtomatska meteorološka postaja na Kozjanah (foto: S. Petan, 19. 12. 2007).

Figure 3.13b: Automatic meteorological station in Kozjane (photo: S. Petan, 19/12/2007).



Slika 3.13c: Merilec višine vode (levo) in multiparametrška sonda (desno) v profilu vodomerne postaje Padež03 (foto: S. Rusjan, 6. 6. 2006).

Figure 3.13c: Limnigraph (left) and multi-parameter sonde (right) at the water station Padež03 (photo: S. Rusjan, 6/6/2006).



Slika 3.13d: Spominski modul multiparametrške sonde z baterijo (foto: S. Rusjan, 14. 4. 2006).

Figure 3.13d: Data logger of the multi-parameter sonde with the battery (photo: S. Rusjan, 14/4/2006).

3.4 MODELIRANJE SPIRANJA NITRATNEGA DUŠIKA

Celoten nabor meritev, opravljenih v letih 2006 in 2007, predstavlja obsežno podatkovno bazo. Da bi ugotovili, ali je znotraj te obsežne podatkovne baze možno najti dodatne nove, doslej neznane ali spregledane vzorce in zakonitosti, ki bi omogočili ekstrapolacijo spoznanj, prikazanih v 4. in 5. poglavju, na različna časovna merila, ter izboljšati naše razumevanje dogajanja, smo se odločili za izgradnjo modela spiranja nitratnega dušika z uporabo metode strojnega učenja oz. rudarjenja podatkov. Izbrana metoda, ki je podrobneje predstavljena v nadaljevanju, omogoča generiranje modelov v obliki odločitvenih oz. regresijskih dreves in klasifikacijskih pravil.

3.4.1 Strojno učenje in rudarjenje podatkov

Odkrivanje znanja iz podatkov (angl. KDD – Knowledge Discovery from Database) pomeni netrivialen proces odkrivanja implicitnega, doslej neznanega in potencialno uporabnega znanja iz podatkov. Ob tem je rudarjenje podatkov (angl. DM – Data Mining) faza v KDD, v kateri pride do dejanskega odkritja znanja (Džeroski, 2001a, Džeroski, 2001b). Rudarjenje podatkov se je razvilo zaradi naraščajočih potreb po avtomatiziranem upravljanju enormnih količin podatkov na praktično vseh znanstvenih ter ostalih, izključno aplikativnih področjih (Mitchell, 1997). V procesu odkrivanja novega znanja iz podatkov ločimo naslednje faze (Fayyad, 1997):

- 1) Skladiščenje podatkov.
- 2) Selekcija podatkov in vzorčenje.
- 3) Čiščenje in preprocesiranje podatkov.
- 4) Transformacija in dimenzijska redukcija podatkov.
- 5) Rudarjenje podatkov.
- 6) Izbira modela ali kombiniranje različnih modelov.
- 7) Ovrednotenje in interpretacija rezultatov modelov.
- 8) Konsolidacija in uporaba novega znanja.

Osnova praktične uporabe metod rudarjenja po podatkih je izgradnja računalniških programov, ki se avtomatizirano presajajo skozi podatkovno bazo in pri tem iščejo zakonitosti in vzorce. V primeru, da so močne zakonitosti in vzorci najdeni, se te uporabi za napovedi na

ostalnih podatkih. Seveda pa so mnogokrat inducirani vzorci nerazumljivi in banalni ter z vidika domenskega znanja obravnavanega problema neuporabni in zavajajoči. Računalniški programi morajo zato biti dovolj prilagodljivi v smislu robustnosti, da omogočajo iskanje potencialno netočnih, vendar uporabnih zakonitosti po sicer v osnovi nepopolnih podatkih (Han in Kamber, 2001).

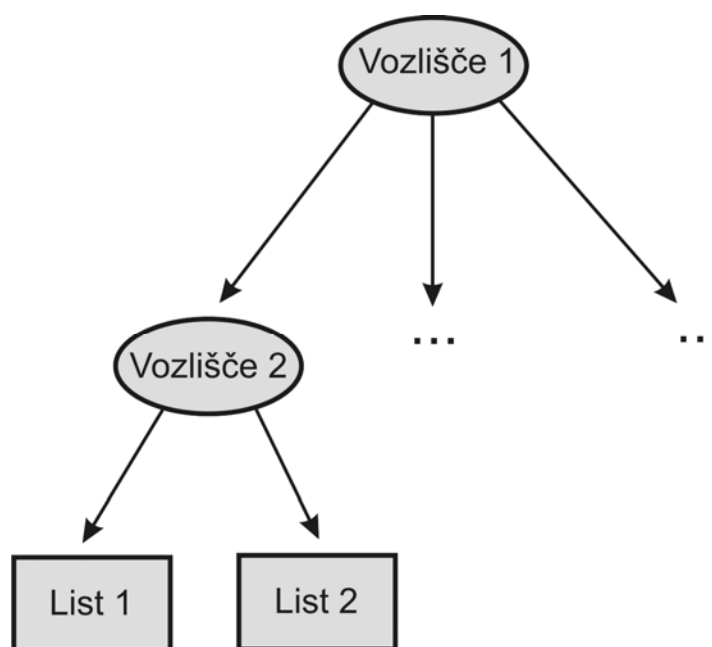
Strojno učenje (angl. ML – Machine Learning) zagotavlja tehnično osnovo za rudarjenje podatkov. Uporabljeno je za pridobivanje informacij iz surovih podatkov, ki so izražene na razumljiv način in so lahko nadalje uporabljene za različne namene (Witten in Frank, 2005). Uporabnost večine metod strojnega učenja je v smislu pridobivanja novega znanja aplikativno praktična in ne teoretična. V primerjavi z običajnimi statističnimi metodami, s katerimi lahko preučimo preprostejše relacije med podatki, omogočajo metode strojnega učenja obdelavo in odkrivanje kompleksnejših relacij med različnimi spremenljivkami. Metode strojnega učenja po eni strani omogočajo pridobitev bolj uporabnih informacij iz samih podatkov, kot je to mogoče z uporabo klasičnih statističnih metod, po drugi strani izbrane metode strojnega učenja nudijo ekspertu vpogled v proces odkrivanja relacij med spremenljivkami ter prilagoditev glede na predhodno, domensko znanje o procesu (Kompare et al., 1997; Atanasova et al., 2006).

Kakor je širok spekter uporabe metod strojnega učenja, so številne tudi uporabljene metode strojnega učenja. Med najbolj razširjene metode strojnega učenja uvrščamo umetne nevronske mreže (ANN – Artificial Neural Networks), genetske algoritme (GA – Genetic Algorithms) ter odločitvena drevesa (DT – Decision Trees), čeprav se prvi dve navedeni metodi pogosto ne uvrščata neposredno v metode strojnega učenja (Michalski et al., 1998). Število metod strojnega učenja še vedno zelo hitro narašča predvsem s kombiniranjem različnih obstoječih statističnih metod in metod strojnega učenja.

3.4.2 Odločitvena drevesa

Odločitvena drevesa predstavljajo eno od metod strojnega učenja za klasifikacijo podatkov, ki celoten nabor podatkov v podatkovni bazi na podlagi ugotovljenih soodvisnosti med podatki, z upoštevanjem postavljenih kriterijev, klasificira v posamezne razrede. Ime odločitvena

drevesa izvira iz specifične predstavitve poteka klasifikacije, kjer listi drevesa predstavljajo končne razrede klasificiranih podatkov, ki so rezultat testiranja postavljenih kriterijev v vozliščih odločitvenega drevesa. Shematsko je preprosto odločitveno drevo prikazano na sliki 6.1. Prvo (zgornje) vozlišče odločitvenega drevesa se imenuje korensko vozlišče. Postopek generiranja odločitvenega drevesa najbolje opiše običajno uporabljeno ime za pristop k problemu klasificiranja podatkov z odločitvenimi drevesi »razdeli in osvoji« (angl. divide-and-conquer), (Witten in Frank, 2005). V posameznem vozlišču se na podlagi postavljenih kriterijev vrši delitev nabora podatkov, rezultat delitve je pridobitev (osvojitev) razredov, znotraj katerih se nahajajo podatki z ugotovljenimi skupnimi karakteristikami.



Slika 3.14: Shematska predstavitev odločitvenega drevesa.
Figure 3.14: Schematic representation of a decision tree.

Podatkovna baza, ki jo analiziramo z odločitvenimi drevesi, je sestavljena iz nabora primerov, na katerih se klasifikacija dejansko vrši. Znotraj vsakega primera je podan nabor atributov, ki so, glede na uporabo v procesu klasifikacije, odvisni ali neodvisni. Na podlagi analize neodvisnih atributov se postavi kriterije znotraj vozlišč odločitvenega drevesa, ki določeno vrednost odvisnega atributa klasificira v specifični list odločitvenega drevesa. Podatkovni niz se pri izgradnji odločitvenih dreves razdeli na t. i. učni podatkovni niz, na katerem se odločitveno drevo gradi, ter t. i. testni podatkovni niz, na katerem se preverja, kako uspešno je

drevo pri odkrivanju povezav med primeri oz. pri napovedovanju vrednosti odvisnega atributa.

Pod pojmom odločitveno drevo običajno združujemo tako drevesa, ki so rezultat klasificiranja nominalnih podatkov, kjer list drevesa predstavlja določeno kategorijo nominalnih podatkov, kot tudi drevesa, ki so generirana na podlagi analize numeričnih podatkov. Pri analizi numeričnih podatkov podrobneje ločimo t. i. regresijska drevesa, pri katerih v listih najdemo specifično vrednost obravnavanega atributa, ki najpogosteje predstavlja srednjo vrednost atributa v primerih, klasificiranih v posamezni list. Modelna drevesa predstavljajo kombinacijo regresijskih dreves in linearnih regresijskih enačb. Pri modelnem drevesu v osnovi poteka izgradnja drevesa podobno kot pri regresijskem drevesu. V listu modelnega drevesa pa ne najdemo posameznih vrednosti odvisnega atributa kot pri regresijskem drevesu, ampak linearno regresijsko enačbo, na podlagi katere se določi vrednosti odvisnega atributa za vse tiste primere, ki so klasificirani v posamezen list. Pogosto se tudi modelna drevesa poimenuje kar regresijska drevesa. V našem primeru uporabe odločitvenih dreves smo v podatkovni niz vključili zgolj numerične attribute. V nadaljevanju tako predstavljamo osnovne pristope k generiranju regresijskih oz. modelnih dreves.

Odločitvena drevesa so atraktivna metoda rudarjenja podatkov, saj omogočajo intuitivno predstavitev rezultatov rudarjenja podatkov, nastali model je razumljiv in enostavno asimiliran v znanje ljudi (Breiman, 1984). Odločitvena drevesa so neparametrski modeli, ki ne zahtevajo posebnih posegov v proces rudarjenja podatkov, obenem pa je njihova učinkovitost ter napovedna verodostojnost pogosto superiorna v primerjavi z ostalimi metodami rudarjenja podatkov (Witten in Frank, 2005). V hidroloških raziskavah se kot metoda rudarjenja podatkov za napovedovanje hidroloških razmer najpogosteje uporabljajo umetne nevronske mreže, katerih rezultat so v osnovi modeli črne skrinjice, ki ne omogoča vpogleda v proces rudarjenja podatkov. Po drugi strani regresijska drevesa omogočajo strukturni vpogled v obravnavani hidrološki problem (Štravs in Brilly, 2007).

3.4.2.1 Generiranje regresijskih dreves

Osnovni princip analize numeričnih atributov s pomočjo regresijskih dreves je, da algoritem, ki omogoča generiranje odločitvenih dreves, izbere izmed vseh neodvisnih atributov tistega, ki ob postavitvi kriterija delitve celotnega nabora primerov znotraj vozlišča najbolj prispeva k zmanjšanju variabilnosti znotraj nastalih razredov. Pri tem je prav izbira kriterija, ki vpliva na določitev specifičnih vrednosti atributov, pri katerih se vrši delitev nabora primerov v vozliščih regresijskega oz. modelnega drevesa, ena glavnih komponent izgradnje regresijskega drevesa. Kvaliteta izbire kriterija delitve ima velik vpliv na učinkovitost regresijskega drevesa v smislu generalizacije, interpretacije in napovedne uspešnosti (White in Lui, 1994).

Konstrukcija regresijskega drevesa se začne rekurzivno na celotnem naboru primerov. V vsakem koraku generacije odločitvenega drevesa je določen najbolj opisni atribut, ki je postavljen v korenko vozlišče (pod)drevesa in nabor primerov je razdeljen glede na opredeljeno vrednost izbranega delitvenega atributa. Izbrani delitveni kriterij maksimizira homogenost razredov primerov, ki so definirani z delitvijo. Kot merilo homogenosti razredov se lahko uporabljajo različne statistične metode (npr. maksimizacija medrazredne vsote kvadratov pri analizi ANOVA), (Prasad et al., 2006). Kot delitveni kriterij se pogosto uporablja tudi redukcija standardne deviacije (RSD) izbranega odvisnega atributa, (Witten in Frank, 2005), ki je definirana kot:

$$RSD = sd(T) - \sum \frac{T_i}{T} \cdot sd(T_i), \quad (3.1)$$

kjer je T del nabora primerov, ki se testira v določenem vozlišču, T_i so primeri v razredih, ki jih določena delitev opredeli.

Podatkovni nizi običajno vsebujejo veliko primerov, ki dejansko ne prispevajo k odkrivanju zakonitosti med podatki, ampak povzročajo šum, ki je lahko posledica napak pri pripravi podatkov, nepravilnega delovanja merske opreme, nepredvidenih pogojev, v katerih so se meritve izvajale, itd. Če se odločimo, da bomo z regresijskim drevesom striktno klasificirali

vse primere vključene v podatkovni nabor, poizkuša algoritem za generiranje regresijskih dreves upoštevati tudi šum v podatki, končni rezultat pa so velika, komplicirana in nerazumljiva regresijska drevesa (Witten in Frank, 2005). Z drugimi besedami, nastala regresijska drevesa so preveč prilagojena učni množici podatkov, na podlagi katere so pridobljena, posledično pa je lahko napovedna učinkovitost regresijskega drevesa na testnem naboru podatkov slabša. Z namenom, da se šum v podatkih pri izgradnji regresijskih dreves ne upošteva ali vsaj delno izloči ter se s tem izogne problemu »pretréniranja«
regresijskih dreves na podane podatke, so uvedene številne metode rezanja (angl. pruning) regresijskih dreves. Najbolj splošna delitev metod rezanja regresijskih dreves je na »rezanje vnaprej«
(angl. prepruning) in »rezanje nazaj«
(angl. postpruning). Pri rezanju naprej se razraščanje drevesa ustavi, preden to postane preveliko, pri rezanju nazaj se regresijskemu drevesu dopusti razraščanje, naknadno pa se posamezne liste drevesa odstrani (s t. i. zamenjavo (pod)drevesa ali dvigom (pod)drevesa). Algoritmi za generiranje regresijskih dreves, ki izvajajo rezanje naprej, so hitrejši, saj ne izvajajo nepotrebnih širitev regresijskega drevesa, po drugi strani pa so se algoritmi, ki upoštevajo rezanje nazaj, v nekaterih primerih izkazali za bolj zanesljive, čeprav dovoljujejo prvotno »nepotrebno«
razraščanje regresijskega drevesa (Witten in Frank, 2005).

S statističnega vidika se razraščanje drevesa ustavi, ko ni več statistično pomembnih povezav med posameznimi atributi in razredom, določenim znotraj vozlišča, ki bi zahtevale njihovo nadaljnjo klasifikacijo. Za testiranje učinkovitosti oz. statistične pomembnosti delitve posameznih podrazredov atributov se pogosto uporablja χ^2 test (Quinlan, 1992). Določena vrednost χ^2 je uporabljena kot kriterij za rezanje regresijskega drevesa. Če je vrednost χ^2 , izračunana za določen razred ter podrazreda, ki sta rezultat njegove delitve, manjša od določene mejne vrednosti, se delitev razreda ne izvede in razraščanje regresijskega drevesa po določeni veji se zaključi.

Regresijska drevesa se lahko preoblikuje v niz klasifikacijskih pravil, saj je vsak list drevesa v osnovi rezultat niza klasifikacijskih pravil. Da bi bila klasifikacijska pravila čim bolj učinkovita, pretvorba regresijskih dreves v niz klasifikacijskih pravil ni trivialna (Witten in Frank, 2005). Za pridobitev učinkovitega nabora klasifikacijskih pravil na podlagi regresijskih dreves, ki naj bo obenem tudi čim manjši, se uporablja posebne algoritme. V osnovi so

algoritmi za generiranje regresijskih dreves in klasifikacijskih pravil podobni. Razlike se pojavijo zaradi zmožnosti, da regresijska pravila delujejo simetrično. Medtem, ko ima regresijsko drevo v posameznem vozlišču opredeljen le en klasifikacijski kriterij, lahko klasifikacijsko pravilo hkrati upošteva več klasifikacijskih kriterijev, to pa pomeni, da je ob enakem kriteriju rezanja število klasifikacijskih pravil manjše od števila listov regresijskega drevesa (Witten in Frank, 2005). Zaradi možnosti hkratnega upoštevanja več klasifikacijskih kriterijev je niz klasifikacijskih pravil strukturno manj pregleden in razumljiv.

3.4.2.2 Vrednotenje kredibilnosti regresijskih dreves

Ocena kredibilnosti ugotovljenih zakonitosti in vzorcev med različnimi atributi je eden ključnih korakov v procesu rudarjenja podatkov (Han in Kamber, 2001). Vrednotenje kredibilnosti metod strojnega učenja poteka tako, da se celotni podatkovni niz razdeli na že omenjena učni in testni podatkovni niz. Običajni načini opredelitve učnega in testnega podatkovnega niza so naslednji:

- 1) V primeru, da ima uporabnik na voljo veliko podatkov, se lahko sam odloči, katere podatke bo uporabil kot učni podatkovni niz in katere kot neodvisen testni podatkovni set.
 - 2) Ker običajno glavni problem predstavlja prav količina razpoložljivih podatkov, se lahko določen omejen podatkovni niz razdeli na učni in testni podatkovni set. Običajno se za učenje uporabi 2/3 podatkovnega niza, preostala 1/3 predstavlja testni podatkovni niz.
 - 3) Navzkrižno preverjanje (angl. cross-validation). Pri navzkrižno preverjanje se podatkovni niz naključno razdeli na določeno število delov približno enake velikosti (običajno 10 delov). V primeru razdelitve podatkovnega niza na 10 delov se ob aplikaciji algoritmov za gradnjo regresijskih dreves izvede 10 generiranj regresijskih dreves, pri čemer se vsakič uporabi kot testni set eden izmed desetih delov podatkovnega niza, učenje pa poteka na preostalih 9 delih podatkovnega niza. Končni rezultat vrednotenja kredibilnosti je povprečje vseh 10 testiranj regresijskih dreves (Kohavi, 1995).
-

Kriteriji, ki se običajno uporabljajo za opredelitev kredibilnosti regresijskih dreves oz. njihove napovedne uspešnosti pri analizi numeričnih atributov, so naslednji (Witten in Frank, 2005):

1) Napaka RMSE (angl. Root Mean Square Error):

$$\sqrt{\frac{(p_1 - a_1)^2 + \dots + (p_n - a_n)^2}{n}} \quad (3.2)$$

2) Koeficient korelacije (r): $\frac{S_{PA}}{\sqrt{S_P S_A}}$; (3.3)

$$S_{PA} = \frac{\sum (p_i - \bar{p}) \cdot (a_i - \bar{a})}{n-1}; \quad S_P = \frac{\sum (p_i - \bar{p})^2}{n-1}; \quad S_A = \frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{n-1}$$

3) Srednja absolutna napaka (angl. mean absolute error):

$$\frac{|p_1 - a_1| + \dots + |p_n - a_n|}{n} \quad (3.4)$$

4) Relativna absolutna napaka (angl. relative absolute error):

$$\frac{|p_1 - a_1| + \dots + |p_n - a_n|}{|a_1 - \bar{a}| + \dots + |a_n - \bar{a}|} \quad (3.5)$$

5) Napaka RRSE (angl. root relative squared error):

$$\sqrt{\frac{(p_1 - a_1)^2 + \dots + (p_n - a_n)^2}{(a_1 - \bar{a})^2 + \dots + (a_n - \bar{a})^2}}, \quad (3.6)$$

kje so a dejanska vrednost atributa, p napovedane vrednost atributa, \bar{a} srednja vrednost a in \bar{p} srednja vrednost p .

3.4.2.3 Algoritem za generiranje regresijskih dreves M5

Pri analizi hidrološko in sezonsko biogeokemijsko pogojene dinamike koncentracije nitratnega dušika v vodotoku smo uporabili algoritem za izgradnjo regresijskih oz. modelnih dreves M5 (Quinlan, 1992) ter algoritem, ki omogoča iz modelnih dreves pridobiti nize

klasifikacijskih pravil. Algoritma sta vgrajena v programsko orodje WEKA (Hall et al., 1999; Wang in Witten, 1997; Witten in Frank, 2005). WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) je zastoj programsko orodje, napisano v programskem jeziku Java, v katerem so vgrajene številne metode, ki omogočajo rudarjenje podatkov. Orodje je bilo razvito na Univerzi Waikato na Novi Zelandiji in se ga lahko pridobi preko spleta¹. Pred analizo podatkovnega nabora je treba podatke pripraviti v formatu ARFF (Attribute-Relation File Format). Program ima uporabniški grafični vmesnik, omogoča shematski in grafični prikaz rezultatov analiz ter izvažanje teh v ostala programska orodja.

Pri praktični aplikaciji algoritmov za generiranje regresijskih oz. modelnih dreves je zelo pomembna opredelitev primerne kriterija za rezanje regresijskega drevesa. Ta ni definirana vnaprej, ampak je določitev prepuščena strokovni presoji uporabnika. Pri tem pa naj se upošteva predvsem priporočilo, naj nastalo regresijsko drevo ne bo preveč komplicirano, kar v večini primerov pomeni pretreniranost algoritma na učni set podatkov, oz. naj bo zgradbo regresijskega drevesa mogoče interpretirati v smislu predhodnega poznavanja obravnavanega problema. V primeru verzije algoritma M5, ki smo jo uporabili v programskem orodju WEKA, se kot kriterij za rezanje regresijskega drevesa uporablja minimalno število primerov, ki so klasificirani v posamezen list regresijskega oz. modelnega drevesa. Primeri, ki so klasificirani v določen list, se nadalje napovedujejo z linearno regresijsko enačbo.

¹ <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>

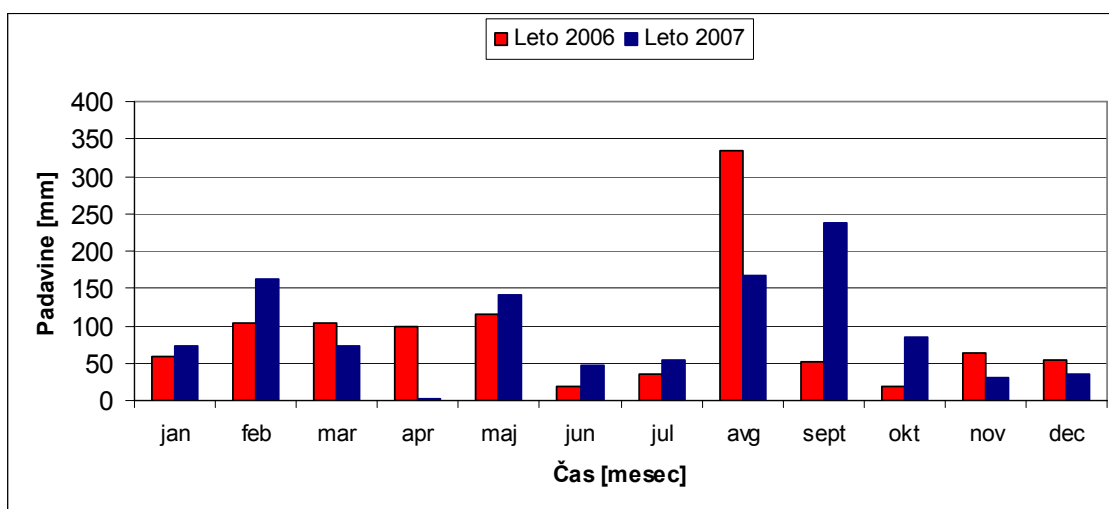
4 REZULTATI

4.1 UVOD

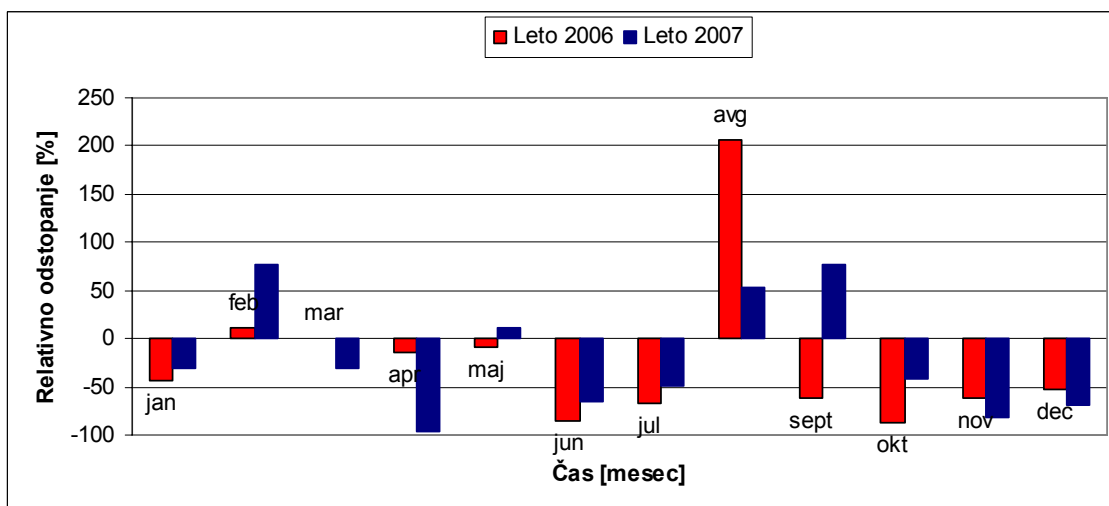
Meritve v okviru doktorske naloge so se najintenzivneje izvajale v letu 2006, ko smo uspeli izvesti zvezne meritve hidroloških karakteristik padavinskih dogodkov in kemizma vode v vseh letnih časih razen v zimskem obdobju. Časovni interval zveznih meritev kemizma vode v letu 2006 je bil 15 minut, znotraj 8 padavinskih dogodkov smo zabeležili 17 poplavnih valov. Kot je razvidno iz rezultatov meritev, predstavljenih v nadaljevanju, je bilo leto 2006 s hidrometeorološkega vidika precej specifično, kar je imelo velik vpliv na opazovano intenziteto spiranja nitratnega dušika med posameznimi padavinskimi dogodki. V letu 2007 so bile meritve zaradi težav z mersko opremo manj intenzivne, zabeleženih je bilo 5 padavinskih dogodkov v obdobju od maja do oktobra. Časovni interval zveznih meritev kemizma vode v letu 2007 je bil 30 minut oz. 1 ura. Razlaga hidroloških kontrol spiranja nitratnega dušika s prispevnega območja Padeža tako sloni predvsem na meritvah v letu 2006, ki omogočajo celosten vpogled v vzajemno sezonsko biogeokemijsko in hidrološko dinamiko spiranja nitratnega dušika. Poleg tega se v letu 2007 niso več izvajale periodične laboratorijske analize kemizma vode, ki so nam v letu 2006 služile za kontrolo zveznih meritev z multiparametrsko sondo. Zvezne meritve koncentracije nitratnega dušika v letu 2007, ki se s hidrološkega in sezonskega vidika razlikuje od leta 2006, so nam služile predvsem za ugotavljanje vpliva drugačnih sezonskih biogeokemijskih in hidroloških okvirjev na dinamiko sproščanja nitratnega dušika.

4.2 PADAVINE IN PRETOKI VODE

Meritve padavin in pretokov na Padežu, Suhorki in Velikem Padežu so se v letih 2006 in 2007 izvajale nepretrgoma skozi celotno obdobje. Mesečne količine padavin za leto 2006 in 2007, zabeleženih na padavinski postaji Tatre, so prikazane na sliki 4.1. Relativno odstopanje mesečnih količin padavin v letu 2006 in 2007 napram dolgoletnim povprečnim mesečnim količinam padavin na padavinski postaji Tatre je prikazano na sliki 4.2.



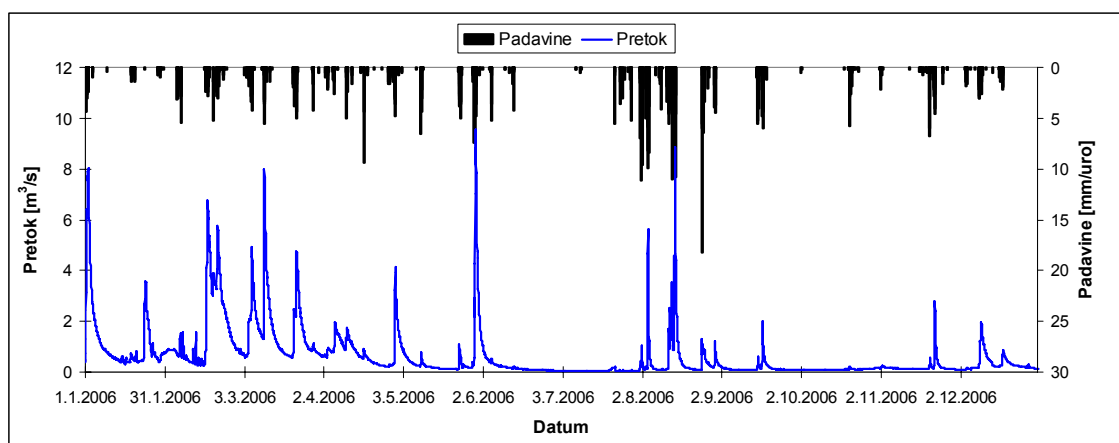
Slika 4.1: Mesečne količine padavin na prispevnem območju Padeža v letih 2006 in 2007.
 Figure 4.1: Monthly rainfall on the Padež stream watershed in 2006 and 2007.



Slika 4.2: Relativna odstopanja mesečnih količin padavin v letih 2006–2007 napram dolgoletnim povprečnim mesečnim količinam padavin za padavinsko postajo Tatre.
 Figure 4.2: Relative difference in the monthly rainfall during 2006–2007 and average monthly rainfall at rain gauge Tatre.

Glede na skupno letno količino padavin 1055 mm v letu 2006 in 1106 mm v letu 2007 lahko opazovano obdobje v primerjavi z dolgoletno povprečno količino padavin na padavinski postaji Tatre označimo kot sušno. Če mesečne količine padavin v letih 2006 in 2007 primerjamo z dolgoletnimi povprečnimi mesečnimi padavinami (slika 4.2), vidimo, da so količine padavin v mesecih marec in maj blizu dolgoletnim povprečnim vrednostim, medtem ko je za ostale mesece, z izjemo avgusta, februarja ter septembra 2007, opazen precejšen primanjkljaj padavin. V juniju in juliju je bila količina padavin precej pod dolgoletnimi povprečnimi mesečnimi vrednostmi. Največji odklon od dolgoletnega povprečja predstavljajo padavine v avgustu 2006, katerih skupna količina znaša 333 mm, medtem ko povprečna mesečna količina padavin za mesec avgust znaša 109 mm. Znatno primanjkljaj padavin je opazen v obdobju oktober–december, ko so bile mesečne količine padavin izrazito manjše kot znašajo povprečne mesečne količine padavin za obravnavano obdobje. V letih 2006 in 2007 tako lahko govorimo o popolnem izpadu jesenskega deževnega obdobja. V mesecu avgustu je bilo padavin v letu 2007 precej manj kot v letu 2006, medtem ko je septembra 2007 padavin izrazito več kot v letu 2006.

Na sliki 4.3 so prikazane urne intenzitete padavin v letu 2006 in pripadajoče urne vrednosti pretoka na vodomerni postaji Padež03 (lokacija V. Padež (zg.)), ki se nahaja dolvodno od sotočja Padeža in Suhorke.

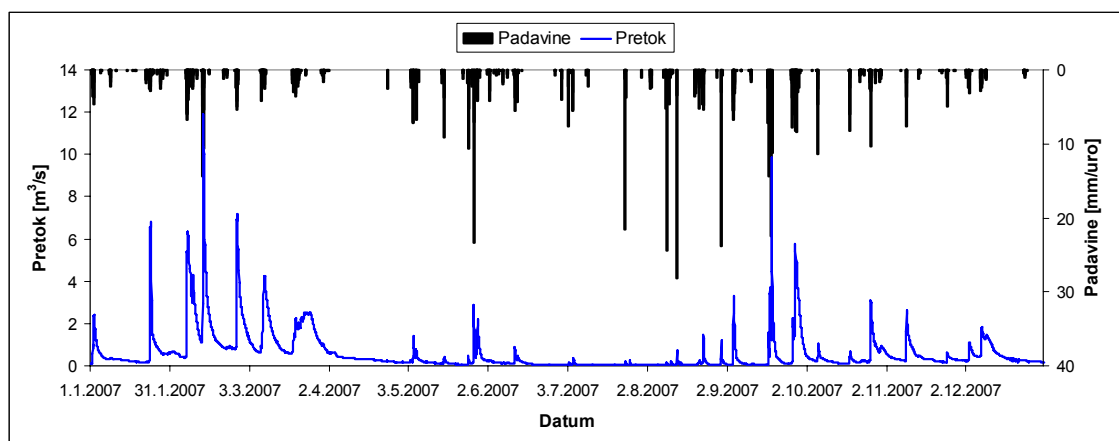


Slika 4.3: Urne intenzitete padavin in vrednosti pretoka v letu 2006.
Figure 4.3: Hourly rainfall and discharges in 2006.

Srednji letni pretok v letu 2006 je znašal $0,67 \text{ m}^3/\text{s}$, kar predstavlja zgolj 61 % dolgoletnega povprečnega dnevnega pretoka, ki znaša $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Maksimalni zabeležen pretok je znašal

9,705 m³/s (konica poplavnega vala konec maja), minimalni pretoki so bili zabeleženi v poletnem sušnem obdobju (junij–julij) in so znašali 0,03 m³/s.

Na sliki 4.4 so prikazane urne intenzitete padavin in urne vrednosti pretoka na vodomerni postaji Padež03 v letu 2007. Maksimalni pretok v letu 2007 je znašal 11,91 m³/s, srednji letni pretok pa 0,61 m³/s.



Slika 4.4: Urne intenzitete padavin in vrednosti pretoka v letu 2007.

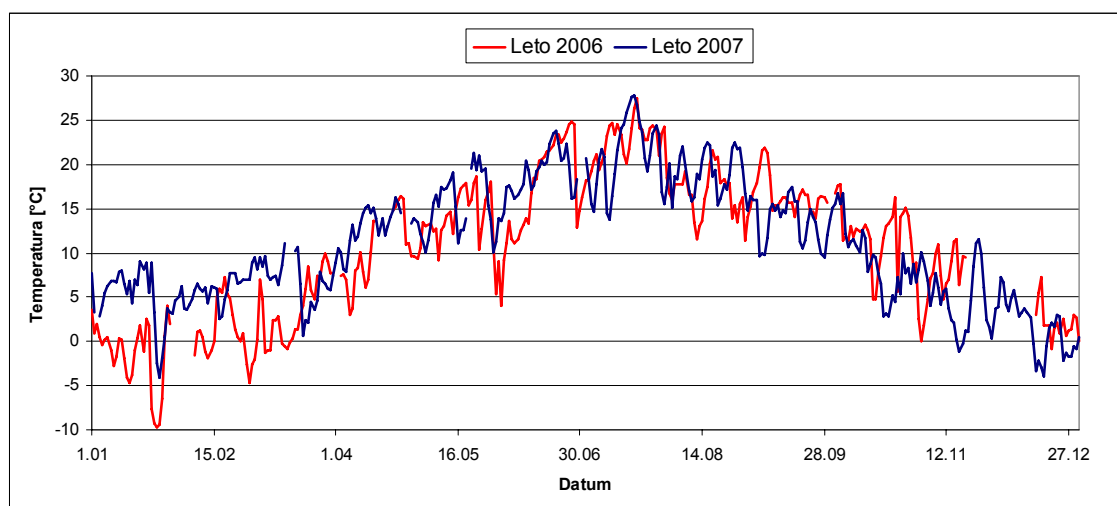
Figure 4.4: Hourly rainfall and discharges in 2007.

Čeprav je bila izmerjena količina padavin v letu 2006 nekoliko manjša kot v letu 2007, je povprečni letni pretok v letu 2006 večji kot v letu 2007, kar je posledica višjih povprečnih pretokov v letu 2006 napram pretokom v letu 2007, predvsem v obdobju od januarja do aprila zaradi precej izdatnih snežnih padavin v letu 2006. Ob tem pa snežne padavine na padavinskih postajah niso bile primerno zabeležene.

4.3 METEOROLOŠKI DEJAVNIKI

Meteorološke razmere smo spremljali zvezno s pomočjo avtomatske meteorološke postaje, ki se nahaja na Kozjanah. Zaradi problemov z delovanjem meteorološke postaje in prenosom podatkov preko GSM-omrežja je prišlo do posameznih kratkotrajnih prekinitev v podatkovnem nizu predvsem v letu 2006; do dolgotrajnejšega izpada podatkov je prišlo konec novembra. Manjši izpadi podatkov so bili tudi v letu 2007.

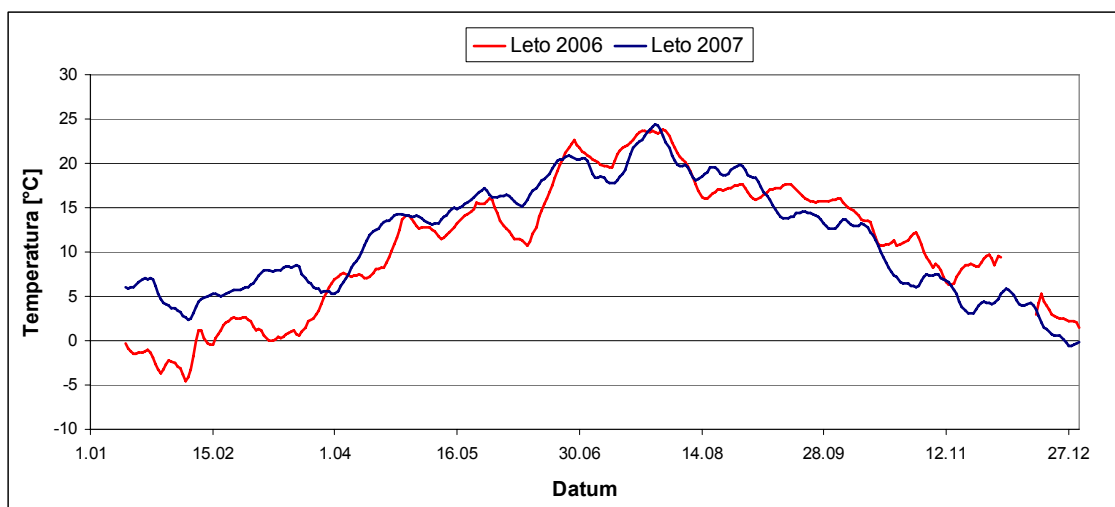
Na sliki 4.5 so prikazane povprečne dnevne temperature v letu 2006 in 2007. V obeh letih je bila maksimalna povprečna dnevna temperatura nad 25 °C v juliju, minimalna povprečna dnevna temperatura je bila blizu -10 °C konec januarja 2006. Povprečna dnevna temperatura v letu 2006 je bila 10,8 °C, v letu 2007 pa 11,2 °C.



Slika 4.5: Povprečne dnevne temperature v letih 2006 in 2007.

Figure 4.5: Average daily temperatures in 2006 and 2007.

Na sliki 4.6 je prikazana primerjava drsečega povprečja povprečnih dnevni temperatur za obdobja 14 dni za leti 2006 in 2007. Iz slike je razvidno, da je bilo obdobje januar–april v letu 2007 precej toplejše kot v letu 2006. V letu 2006 je bilo poletno obdobje v juliju toplejše kot v letu 2007 z izjemo kratkega obdobja konec julija, temperaturne razlike v poletnem obdobju so manjše kot v spomladanskem obdobju. Jesensko obdobje v letu 2006 je bilo toplejše kot v letu 2007.

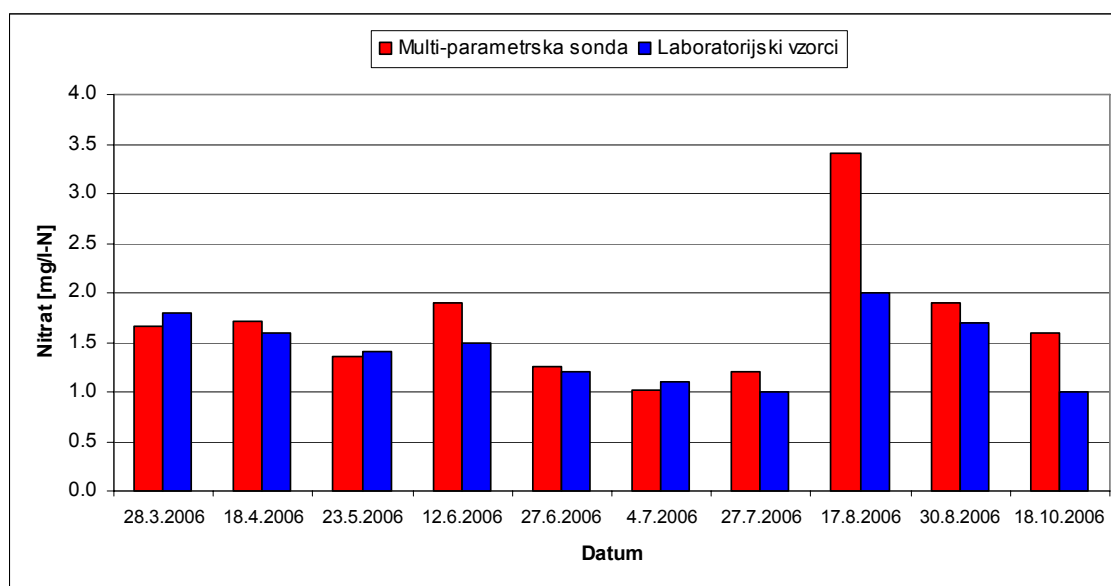


Slika 4.6: Drseče povprečje povprečnih dnevni temperatur za obdobja 14 dni za leti 2006 in 2007.
Figure 4.6: Moving average of daily temperatures for the periods of 14 days for 2006 and 2007.

4.4 KEMIZEM VODE

Zvezne meritve kemizma vode z multiparametrsko sondo smo izvajali v profilu vodomerne postaje Padež03 (lokacija V. Padež (zg.)); slika 3.11; preglednica 3.3. Površina prispevnega območja Velikega Padeža gorvodno od vodomerne postaje Padež03 je 42,1 km². Meritve z multiparametrsko sondo smo v letu 2006 izvajali periodično v obdobju od marca do novembra, v letu 2007 pa od maja do oktobra. Na začetku leta 2006 (zimsko obdobje januar–marec) kontinuirane meritve z multiparametrsko sondo niso potekale zaradi izredno nizkih temperatur (sliki 4.5 in 4.6), saj ob zamrznitvi vode v vodotoku lahko pride do poškodovanja oz. uničenja sonde. Običajen nepretrgan podatkovni niz, pridobljen z multiparametrsko sondo, je dolg do 14 dni, tedensko se je na terenu izvajalo čiščenje senzorjev, umerjanje sonde je potekalo na fakulteti v Ljubljani v povprečju 2-krat mesečno.

Laboratorijski vzorci vode na Velikem Padežu in Suhorki, katerih odvzem in analizo je opravljal Zavod za zdravstveno varstvo Maribor, so se odzemale od novembra 2005 do oktobra 2006. Vzorci so bili odvzeti pretežno v času baznega odtoka. Časovna uskladitev odvzema laboratorijskih vzorcev z višjimi pretoki je zahtevna, saj je hidrološka odzivnost porečja Velikega Padeža (v nadaljevanju Padeža) zelo hitra, čas koncentracije padavinskega odtoka s porečja je zelo kratek in znaša v primeru padavinskih pojavov z višjimi intenzitetami padavin zgolj 2 do 3 ure, temu primerna pa je tudi hitrost upada padavinskega odtoka. Povprečna koncentracija nitratnega dušika v Padežu, določena na podlagi laboratorijskih vzorcev, znaša 1,5 mg/l-N. Statistična primerjava vrednosti koncentracij nitratnega dušika, izmerjenih z multiparametrsko sondo in laboratorijsko analizo s t-testom (interval zaupanja 0,95), ne kaže signifikantnih razlik med obema serijama meritev ($p = 0,12$). Opozoriti velja na razliko v koncentracijah dne 17. 8. 2006, ko je bila na podlagi laboratorijske analize določena koncentracija 2,0 mg/l-N, s sondo pa 3,4 mg/l-N. Najverjetnejši vzrok za razliko v izmerjenih koncentracijah gre iskati v predhodnem, kot bo razvidno iz rezultatov, predstavljenih v nadaljevanju, hidrološko najbolj burnem obdobju v avgustu 2006, ki je verjetno privedlo do potencialne zmanjšane natančnosti meritev koncentracije nitratnega dušika z multiparametrsko sondo.



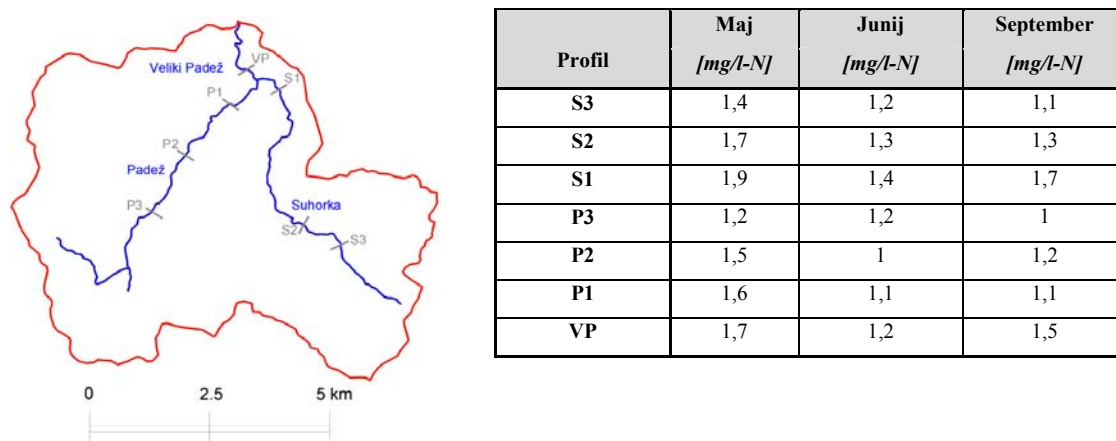
Slika 4.7: Primerjava koncentracij nitratnega dušika, določenih z multiparametrsko sondo in laboratorijsko analizo.

Figure 4.7: Comparison of streamwater nitrate concentrations measured by the multi-parameter sonde and laboratory analysis.

4.4.1 Prostorska spremenljivost koncentracije nitratnega dušika

V nalogi obravnavamo prispevno območje Padeža kot hidrološko in biogeokemijsko enovito, katerega specifičnost opazovanih, hidrološko pogojenih odzivov kemizma vode skušamo opredeliti s časovno variabilnostjo vzajemnih hidroloških in sezonskih biogeokemijskih razmer. S hidrološkega stališča je pogoj za obravnavo porečja Padeža hidrogeološka enovitost, na podlagi katere lahko sklepamo, da je dejanska prostorska variabilnost mehanizmov tvorbe padavinskega odtoka majhna. Z biogeokemijskega stališča sta ključna dejavnika, ki omogočata prostorsko enovito obravnavo porečja, pokrovnost tal (več kot 80 % porečja pokriva gozd) in majhna spremenljivost pedoloških značilnosti tal. Z namenom opredelitve prostorske variabilnosti biogeokemijskih razmer smo v letu 2006 izvedli tri serije meritve koncentracije nitratnega dušika z multiparametrsko sondo v več profilih v strugi Suhorke in Padeža, in sicer v maju, juniju in septembru v času nizkih pretokov. Povprečne koncentracije nitratnega dušika v posameznih serijah meritev so bile: 1,6 mg/l-N (maj); 1,2 mg/l-N (junij); 1,3 mg/l-N (september). Med posameznimi serijami meritev so bile na podlagi enofaktorskega ANOVA-testa (interval zaupanja 0,95) razlike statistično značilne ($p = 0,009$), znotraj posameznih serij pa je bila prostorska spremenljivost v koncentraciji nitratnega dušika majhna (velikost standardnega odklona od povprečne vrednosti se giblje med 0,13 in 0,25

mg/l-N). Na sliki 4.8 je prikazana prostorska razporeditev merskih profilov na porečju Padeža s koncentracijami nitratnega dušika. Opazen pa je porast koncentracije nitratnega dušika dolvodno, in sicer za 20 do 30 %. Kot potencialni vir nitratnega dušika v vodotoku bi lahko šteli tudi nekatere redke zaselke na obronkih prispevnega območja ter samotno, na pol opuščeno kmetijo v povirnem delu doline Padeža, vendar domnevamo, da je možen vnos nitratnega dušika v vodotok močno omejen z obsežnimi vmesnimi baferskimi območji gozda.



Slika 4.8: Razporeditev merskih profilov na porečju Padeža (levo) in merjene koncentracije nitratnega dušika v posamezni seriji (desno).

Figure 4.8: Distribution of measurement sections on the Padež stream watershed (left) and measured concentrations of streamwater nitrate in the series (right).

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati spremljanja časovne dinamike hidroloških in biogeokemijskih razmer v profilu vodomerne postaje Padež03, ki sovпада z oznako merskega profila VP na sliki 4.8.

4.4.2 Padavinski dogodki in časovna spremenljivost koncentracije nitratnega dušika v letu 2006

Obravnavane padavinske dogodke lahko glede na letni čas razvrstimo na:

1. Padavinske dogodke zgodaj spomladi: padavinski dogodek v marcu (21. 3. 2006 do 28. 3. 2006); padavinski dogodek v aprilu (9. 4. 2006 do 14. 4. 2006).

2. Padavinske dogodki pozno spomladi: padavinski dogodek v maju (23. 5. 2006 do 28. 5. 2006); padavinski dogodek maj–junij (29. 5. 2006 do 10. 6. 2006).
3. Padavinske dogodke v poletnem času: 1. padavinski dogodek v avgustu – avgust I (1. 8. 2006 do 10. 8. 2006); 2. padavinski dogodek v avgustu – avgust II (12. 8. 2006 do 20. 8. 2006); 3. padavinski dogodek v avgustu – avgust III (27. 8. 2006 do 2. 9. 2006).
4. Padavinski dogodek v jesenskem obdobju: padavinski dogodek novembra (18. 11. 2006 do 1. 12. 2006).

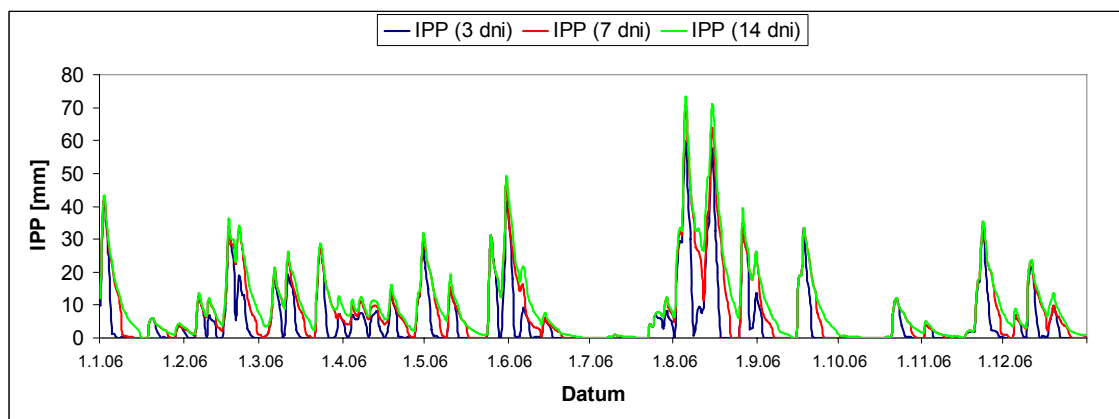
Pri večini obravnavanih dogodkov ne gre za enovite, ampak sestavljene padavinske dogodke, katerih sestava se preko velike hidrološke odzivnosti prispevnega območja Padeža odraža v hitri spremenljivosti pretočnih razmer v strugi Padeža. Da bi padavinske dogodke spravili na enovito hidrološko merilo v smislu predhodne vlažnosti oz. izsušenosti v odvisnosti od časa, ki je potekel od predhodnih padavin pred nastopom posameznega padavinskega dogodka, smo uvedli indeks predhodnih padavin (IPP). Dnevne vrednosti IPP smo določili po metodi Linsleyja et al. (1982), ki ima obliko:

$$IPP_i = \sum_{t=-1}^{-i} P_t \cdot k^{-t}, \quad (4.1)$$

kjer je $IPP(i)$ dnevna vrednost indeksa predhodnih padavin za i predhodnih dni (v mm), P_t so dnevne padavine v dnevu t (v mm), k je recesijska konstanta predhodnih dnevnih padavin. Vrednost empirične recesijske konstante se za praktične namene giblje med 0,8 in 0,95 v odvisnosti od hidroloških pogojev na porečju, sezonskih in klimatskih razmer (Heggen, 2001). Za območje Padeža, kjer padavinska voda odteka hitro, smo izbrali vrednost recesijske konstante 0,8.

Dnevne vrednosti indeksa predhodnih padavin v letu 2006 za obdobje 3 (IPP_3), 7 (IPP_7) in 14 (IPP_{14}) predhodnih dni so prikazane na sliki 4.9. Daljša sušna obdobja z izrazito nizkimi vrednostmi indeksa predhodne vlažnosti so opazna zlasti junija, julija in oktobra, ko so

vrednosti IPP_3 , IPP_7 in celo IPP_{14} zelo nizke oz. enake 0. Najvišje vrednosti IPP se pojavijo v avgustu.



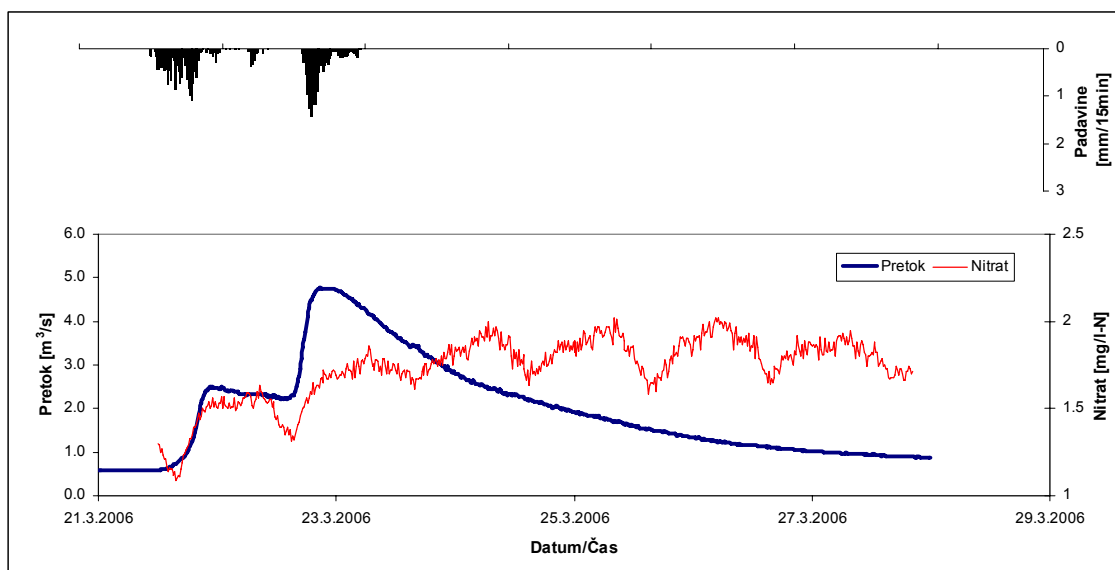
Slika 4.9: Dnevne vrednosti indeksa predhodnih padavin za obdobje 3 (IPP_3), 7 (IPP_7) in 14 (IPP_{14}) predhodnih dni.

Figure 4.9: Daily values of antecedent precipitation index (API) for the periods of 3 ($API_3=IPP_3$), 7 ($API_7=IPP_7$) and 14 ($API_{14}=IPP_{14}$) days.

Opazovani padavinski dogodki v letu 2006 so podrobneje predstavljeni v nadaljevanju, časovni interval prikaza je 15 minut.

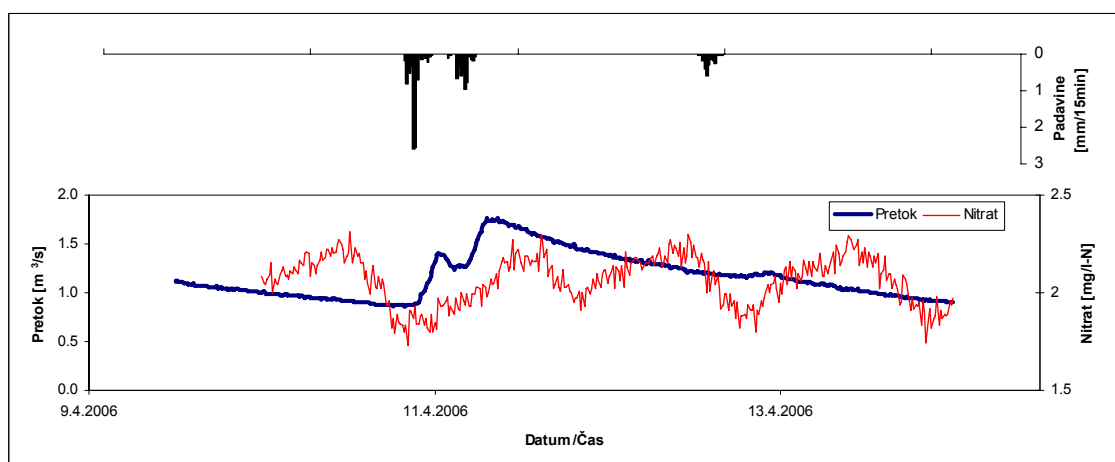
4.4.2.1 Padavinski dogodki zgodaj spomladi

V marcu in aprilu smo zvezno spremljali koncentracijo nitrata v času dveh padavinskih dogodkov. Hidrogram 23. 3. 2006 je imel konico pretoka $4,78 \text{ m}^3/\text{s}$, v celotnem padavinskem dogodku pa je padlo $34,5 \text{ mm}$ padavin (slika 4.10). Predhodno obdobje pred nastopom poplavnega vala je bilo sušno, vrednosti indeksa predhodnih padavin so bile: $IPP_3 = 0 \text{ mm}$; $IPP_7 = 0 \text{ mm}$; $IPP_{14} = 2,6 \text{ mm}$. Zvezne meritve koncentracije nitratnega dušika v času padavinskega dogodka ne odražajo spodbujenega spiranja s povečanim odtokom s porečja. Padavinski dogodek ne predstavlja večje motnje niti za dnevno dinamiko koncentracije nitratnega dušika. V opaženem dnevnem ciklusu koncentracije nitratnega dušika se povečane koncentracije pojavljajo v dopoldanskem času, nižje koncentracije pa v popoldanskem ali večernem času. Povprečna koncentracija nitratnega dušika v času poplavnega vala v marcu je bila $1,7 \text{ mg/l-N}$.



Slika 4.10: Padavinski dogodek v marcu.
Figure 4.10: Rainfall event in March.

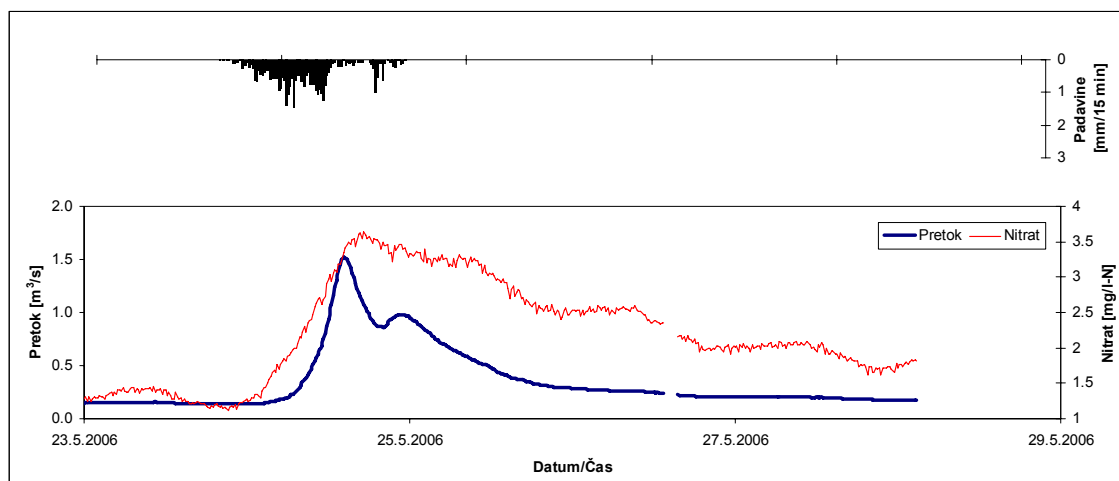
Padavinski dogodek v aprilu je v primerjavi s padavinskim dogodkom v marcu precej manjši, konica pretoka je znašala $1,76 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 4.11). Skupna količina padavin v dogodku je znašala 15,1 mm, predhodno obdobje je bilo bolj namočeno ($\text{IPP}_3 = 0,2 \text{ mm}$; $\text{IPP}_7 = 5,6 \text{ mm}$; $\text{IPP}_{14} = 6,6 \text{ mm}$). Podobno kot v primeru padavinskega dogodka v marcu povečani odtoki ne predstavljajo motnje v dnevni dinamiki koncentracije nitratnega dušika. Povprečna koncentracija nitratnega dušika v času padavinskega dogodka v aprilu je $2,0 \text{ mg/l-N}$.



Slika 4.11: Padavinski dogodek v aprilu.
Figure 4.11: Rainfall event in April.

4.4.2.2 Padavinski dogodki pozno spomladi

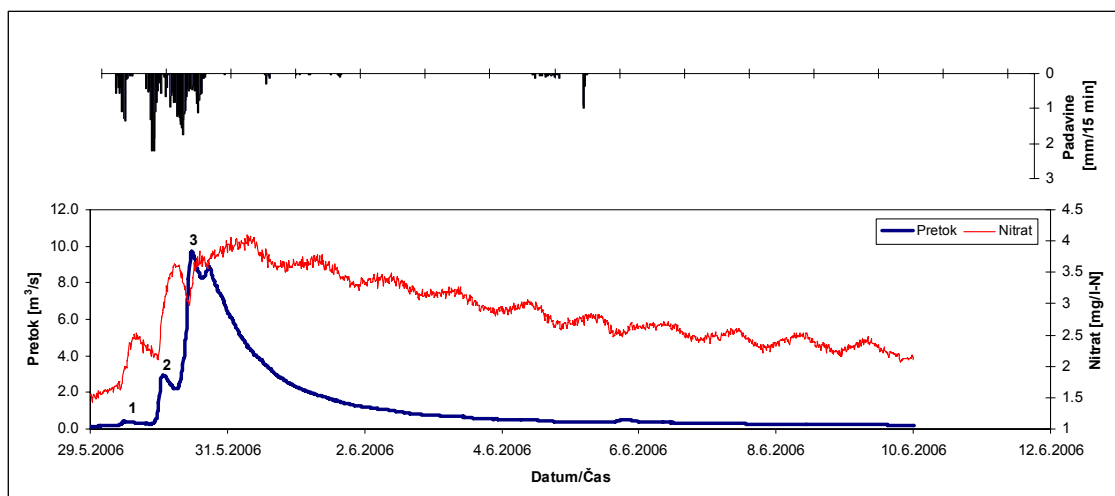
Konec maja in v začetku junija smo zabeležili dva padavinska dogodka. V času prvega padavinskega dogodka 24. 5. 2006 je padlo 35,3 mm padavin, konica hidrograma odtoka je znašala 1,52 m³/s (slika 4.12). Obdobje pred prvim padavinskim dogodkom v maju je bilo sušno (IPP₃ = 0 mm; IPP₇ = 0 mm; IPP₁₄ = 0,8 mm), koncentracija nitratnega dušika v vodotoku se je gibala med 1,1 in 1,5 mg/l-N. V času padavinskega dogodka se je koncentracija nitratnega dušika dvignila na 3,6 mg/l-N. Po 3 do 4 dneh se je koncentracija nitratnega dušika znova spustila na vrednosti, kakršne so bile zabeležene v času pred padavinskim dogodkom.



Slika 4.12: Padavinski dogodek v maju.

Figure 4.12: Rainfall event in May.

Na sliki 4.13 je prikazan drugi padavinski dogodek konec maja (maj–junij), katerega skupna količina padavin je znašala 64,6 mm. Predhodno hidrološko obdobje je bilo pogojeno s pojavnostjo prvega padavinskega dogodka v maju (IPP₃ = 0 mm; IPP₇ = 12,6 mm; IPP₁₄ = 12,6 mm). Dogodek maj–junij je sestavljen; glede na specifičen odziv nitratnega dušika v času padavinskega dogodka smo ločili 3 konice hidrogramov (slika 4.13). Konični pretok v času prvega hidrograma je bil zgolj 0,42 m³/s; koncentracija nitratnega dušika se je v času prvega hidrograma dvignila z 1,4 mg/l-N na 2,5 mg/l-N. Drugi hidrogram s konico pretoka 2,95 m³/s je koncentracijo nitratnega dušika dvignil na 3,6 mg/l-N, tretji hidrogram s konico pretoka 9,71 m³/s, ki je bil obenem tudi najvišji zabeležen pretok v letu 2006, je povzročil dvig koncentracije nitratnega dušika na 4,0 mg/l-N.



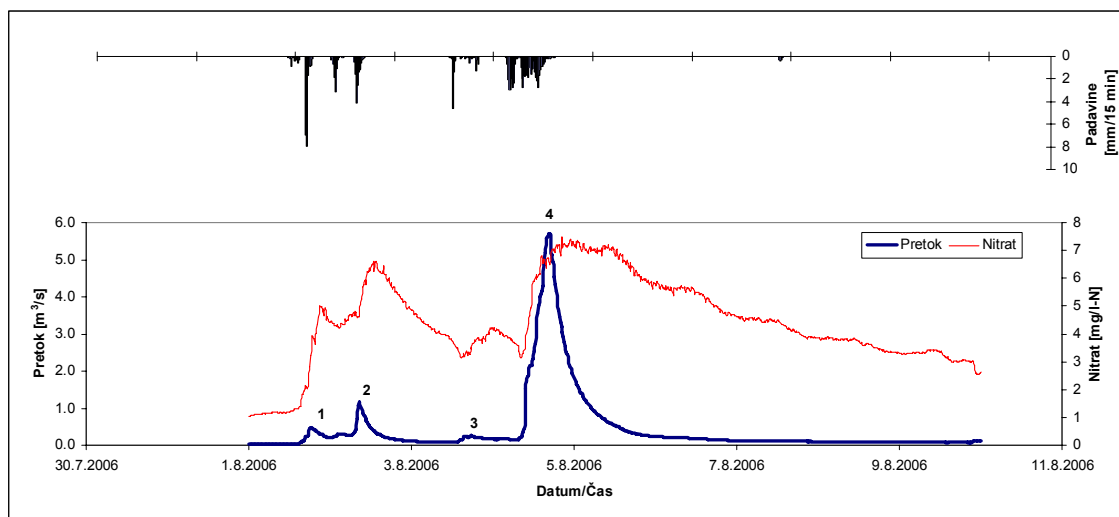
Slika 4.13: Padavinski dogodek maj–junij.
Figure 4.13: Rainfall event May–June.

4.4.2.3 Padavinski dogodki poleti

Meseca junij in julij sta bila v letu 2006 izrazito sušna, količina padavin v avgustu pa je znašala skoraj tretjino skupne količine padavin v letu 2006 (sliki 4.1 in 4.2). Skladno s spremenljivostjo hidroloških razmer na prispevnem območju Padeža je bila tudi variabilnost koncentracije nitratnega dušika v vodotoku izjemno velika. V avgustu smo zvezne meritve kemizma vode izvajali v času treh padavinskih dogodkov označenih kot avgust I, avgust II in avgust III. Predhodno obdobje pred padavinskim dogodkom avgust I je bilo sušno ($IPP_3 = 0,2$ mm; $IPP_7 = 5,1$ mm; $IPP_{14} = 6,5$ mm), vrednost IPP_7 in IPP_{14} okoli 5 mm je posledica kratkotrajnih lokalnih nalivov, ki niso povzročili občutnejšega povečanja odtoka s prispevnega območja, kar je razvidno iz izrazito nizkih pretokov Padeža v predhodnem sušnem obdobju (slika 4.3).

Na sliki 4.14 je prikazan prvi padavinski dogodek v avgustu (avgust I), ki je obenem prvi izdatnejši padavinski dogodek po padavinskem dogodku maj–junij. Padavinski dogodek avgust I je izrazito sestavljen, z vidika spremenljivosti koncentracije nitratnega dušika smo znotraj padavinskega dogodka opredelili 4 hidrograme (slika 4.14). V celotnem padavinskem dogodku je padlo 123,2 mm padavin. V času prvega hidrograma s konico pretoka $0,49$ m³/s je koncentracija nitratnega dušika narasla z 1 mg/l-N na $4,9$ mg/l-N, v času drugega hidrograma s konico $1,16$ m³/s je koncentracija nitratnega dušika dosegla vrednost $6,6$ mg/l-N. Sledil je manjši hidrogram s koničnim pretokom $0,26$ m³/s, ki je povzročil ponoven rahel dvig

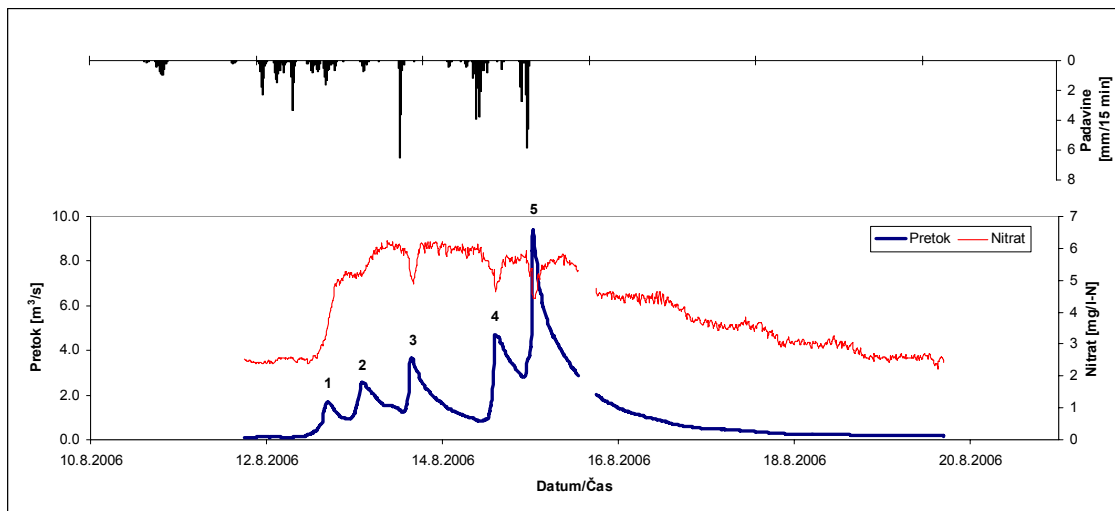
koncentracije nitratnega dušika na 4,2 mg/l-N. Zadnji hidrogram, ki je precej večji od predhodnih (maksimalni pretok $Q = 5,69 \text{ m}^3/\text{s}$), je koncentracijo nitratnega dušika dvignil na 7,4 mg/l-N. Po prehodu zadnjega hidrograma se je koncentracija nitratnega dušika zmanjševala sorazmerno počasi glede na intenzivnost upada pretoka v poletnem času.



Slika 4.14: Padavinski dogodek avgust I.
Figure 4.14: Rainfall event August I.

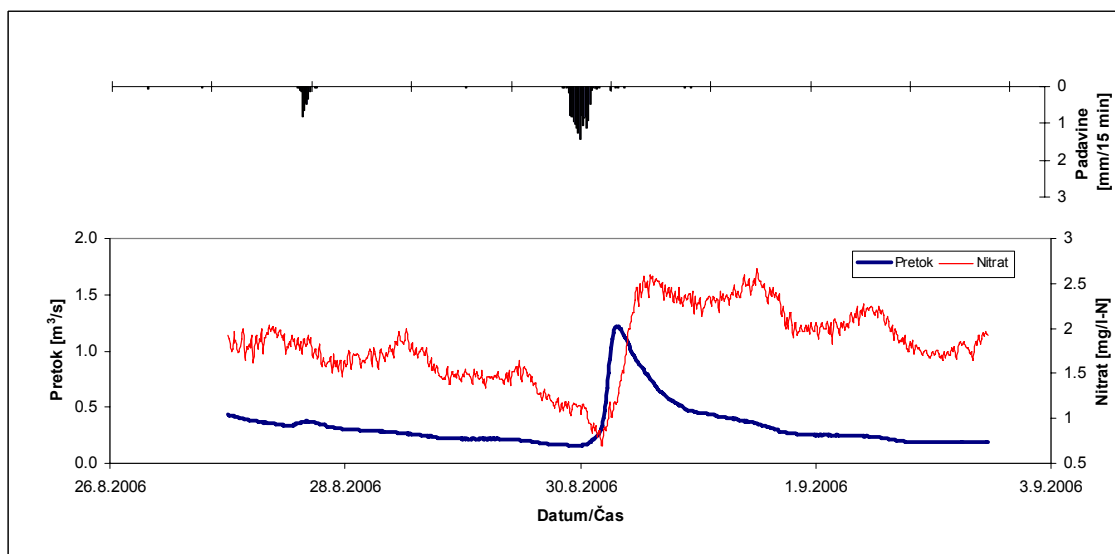
Za padavinski dogodek avgust II (slika 4.15) je značilna visoka predhodna namočenost prispevnega območja Padeža ($IPP_3 = 10,2 \text{ mm}$; $IPP_7 = 11,7 \text{ mm}$; $IPP_{14} = 26,5 \text{ mm}$), ki je ob visokih intenzitetah padavin (več kot $6 \text{ mm}/15 \text{ min}$) prispevala k zelo hitri tvorbi hidrogramov odtoka. Skupna količina padavin v padavinskem dogodku je bila $87,3 \text{ mm}$. Podobno kot v primeru padavinskega dogodka avgust I gre za sestavljen padavinski dogodek, znotraj katerega smo glede na spremenljivost koncentracije nitratnega dušika v vodotoku opredelili 5 hidrogramov odtoka. Prvi hidrogram s konico pretoka $1,70 \text{ m}^3/\text{s}$ je povzročil dvig koncentracije nitratnega dušika z $2,6 \text{ mg}/\text{l-N}$ na $5,3 \text{ mg}/\text{l-N}$. Koncentracija nitratnega dušika se je v času drugega hidrograma s konico $2,57 \text{ m}^3/\text{s}$ dvignila na $6,3 \text{ mg}/\text{l-N}$. V obdobju preostalih treh hidrogramov se je koncentracija nitratnega dušika gibala okoli $6 \text{ mg}/\text{l-N}$, opazno pa je znižanje koncentracije v času konic zadnjih treh hidrogramov za okoli $1,5 \text{ mg}/\text{l-N}$ (številke 3, 4 in 5). Še enkrat velja opozoriti na razliko med koncentracijo nitratnega dušika, določeno na podlagi laboratorijske analize ($2 \text{ mg}/\text{l-N}$), in koncentracijo, določeno z multiparametrsko sondo ($3,4 \text{ mg}/\text{l-N}$). V predhodnem merskem obdobju je bil zabeležen niz kar 5 večjih poplavnih valov. Zelo hitre spremembe pretočnih razmer in pripadajoča velika

nihanja kemizma vode so verjetno privedli do zmanjšane natančnosti meritev nitratnega dušika z multiparametrsko sondo.



Slika 4.15: Padavinski dogodek avgust II.
Figure 4.15: Rainfall event August II.

Zadnji zabeležen padavinski dogodek v avgustu (avgust III) je prikazan na sliki 4.16. Predhodno obdobje v mesecu avgustu lahko označimo kot zelo namočeno, čeprav količina padavin v predhodnih 14 dneh pred padavinskim dogodkom avgust III ni bila ekstremno velika ($IPP_3 = 3$ mm; $IPP_7 = 17,9$ mm; $IPP_{14} = 17,9$ mm), v samem padavinskem dogodku je padlo 19 mm padavin.

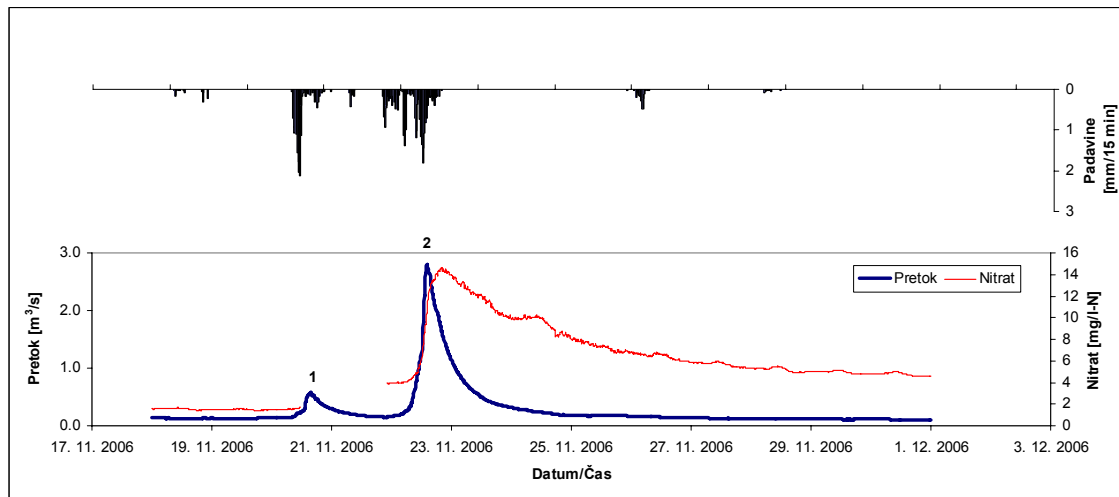


Slika 4.16: Padavinski dogodek avgust III.
Figure 4.16: Rainfall event August III.

V obdobju pred padavinskim dogodkom avgust III je koncentracija nitratnega dušika upadala z 2 mg/l-N na 1 mg/l-N. V času padavinskega dogodka katerega konica pretoka je dosegla vrednost 1,22 m³/s se je koncentracija nitratnega dušika povečala na 2,6 mg/l-N.

4.4.2.4 Padavinski dogodek jeseni

Najvišje koncentracije nitratnega dušika smo zabeležili v času padavinskega dogodka v novembru. Predhodno obdobje (oktober in prva polovica novembra) je bilo za ta del leta nenavadno sušno (sliki 4.1 in 4.2), skupna količina padavin je bila zgolj 28,6 mm. Sestavljeni padavinski dogodek v novembru je prikazan na sliki 4.17. V padavinskem dogodku je padlo 50 mm padavin, vrednosti indeksa predhodnih padavin so naslednje: IPP₃ = 1,8 mm, IPP₇ = 2,3 mm in IPP₁₄ = 2,4 mm. Zaradi težav z delovanjem multiparametrskе sonde nismo uspeli zabeležiti koncentracije nitratnega dušika v času prvega, manjšega hidrograma. V obdobju pred padavinskim dogodkom se je koncentracija nitratnega dušika gibala med 1,4 mg/l-N in 1,5 mg/l-N; v času drugega hidrograma s konico pretoka 2,80 m³/s je vrednost koncentracije nitratnega dušika narasla na 14,2 mg/l-N.



Slika 4.17: Padavinski dogodek v novembru.

Figure 4.17: Rainfall event in November.

Hidrološke značilnosti hidrogramov znotraj zabeleženih padavinskih dogodkov v letu 2006, spremljajoče maksimalne zabeležene koncentracije nitratnega dušika v vodotoku ter temperature zraka v obdobjih pred nastopom padavinskih dogodkov so podane v preglednici 4.1.

Preglednica 4.1: Karakteristike hidrogramov odtoka znotraj opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006.
Table 4.1: Characteristics of hydrographs observed inside the rainfall events in year 2006.

Padavinski dogodek	Št.	Padavine [mm]	^a IPP ₃ [mm]	^a IPP ₇ [mm]	^a IPP ₁₄ [mm]	^b T ₇ [°C]	^b T ₁₄ [°C]	^c Q [m ³ /s]	^d NV [%]	^e NO ₃ [mg/l-N]	^f Tk [h]
Marec	*	34,5	0	0	2,6	1,0	1,0	4,78	40	2,0	7
April	*	15,1	0,2	5,6	6,6	6,4	7,5	1,76	12	2,3	4
Maj	*	35,3	0	0	0,8	16,9	14,9	1,52	26	3,6	9
Maj-junij	*	8,5	0	12,6	12,6	15,5	16,1	0,42	16	2,5	3
	2	17,7	17,8	27,8	27,8	14,8	15,8	2,95	34	3,6	5
	3	38,4	17,8	27,8	27,8	14,8	15,8	9,71	57	4,0	5
Avгust I	*	22,5	0,2	5,1	6,5	23,4	23,9	0,48	34	4,9	3
	2	21,3	20,6	24,2	25,9	22,8	23,1	1,16	30	6,6	3
	3	11,2	29,5	32,1	33,6	21,8	23,1	0,26	32	4,2	4
	4	68,1	29,2	31,2	32,5	20,6	22,4	5,69	54	7,4	9
Avгust II	1	21,2	10,2	11,7	26,5	17,0	18,4	1,70	28	5,3	6
	2	15,1	30,9	35,8	47,6	16,1	17,7	2,57	33	6,3	5
	3	11,9	30,9	35,8	47,6	16,1	17,7	3,65	43	6,2	2
	4	20,9	36,3	40,5	49,9	15,5	16,9	4,70	47	5,8	2
	5	18,2	57,6	63,5	71,2	14,4	16,0	9,40	61	6,1	2
Avгust III	*	19,0	3,0	17,9	17,9	18,1	17,2	1,22	18	2,6	7
November	2	30,5	17,3	18,3	18,3	9,3	8,7	2,80	36	14,2	9

^aIPPx: Indeks predhodnih padavin določen za x predhodnih dni.

^bTx: Povprečna urna temperatura v obdobju x predhodnih dni.

^cQ: Konica hidrograma odtoka.

^dNV: Delež nove vode v odtoku.

^eNO₃: Maksimalna koncentracija nitratnega dušika v hidrogramu.

^fTk: Čas od začetka dvigajočega dela hidrograma do konice hidrograma.

4.4.3 Padavinski dogodki in časovna spremenljivost koncentracije nitratnega dušika v letu 2007

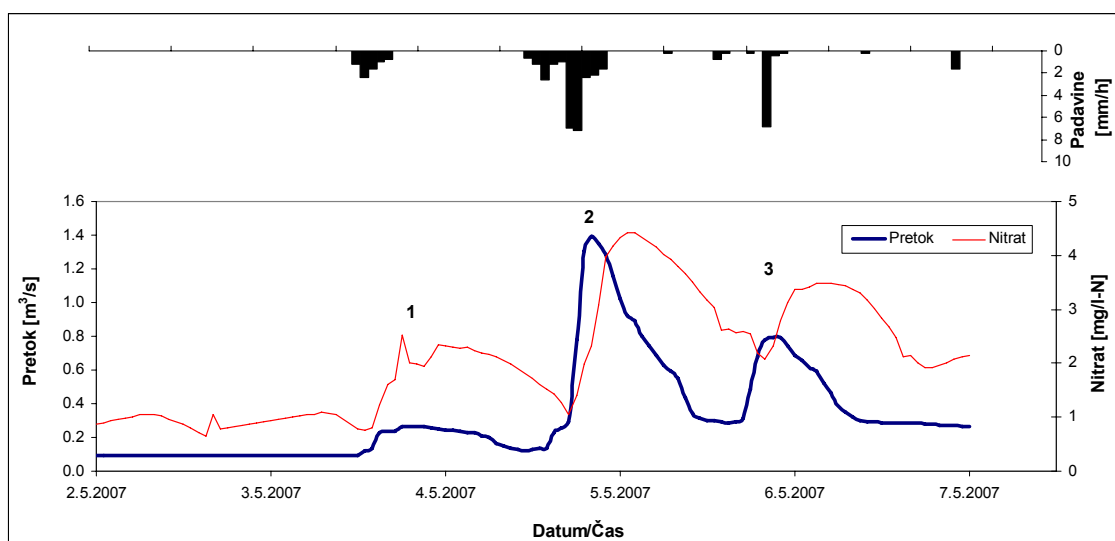
Kot smo omenili že v na začetku poglavja so se zvezne meritve koncentracije nitratnega dušika v letu 2007 izvajale manj intenzivno kot v letu 2006. Zabeleženi padavinski dogodki v letu 2007 so naslednji:

1. Padavinski dogodek v začetku maja (2. 5. 2007 do 7. 5. 2007) z oznako maj I.
2. Padavinski dogodek konec maja (23. 5. 2007 do 3. 6. 2007) z oznako maj II.
3. Padavinski dogodek v juniju (12. 6. 2007 do 15. 6. 2007).
4. Padavinski dogodek v avgustu (21. 8. 2007 do 29. 8. 2007).
5. Padavinski dogodek konec septembra (26. 9. 2007 do 10. 10. 2007).

Kot pri padavinskih dogodkih v letu 2006 so tudi v letu 2007 nekateri padavinski dogodki sestavljeni, večinoma pa v letu 2007 meritve niso potekale v hidrološko tako burnih obdobjih kot v letu 2006. Podrobneje so padavinski dogodki v letu 2007 predstavljeni v nadaljevanju, časovni interval prikaza je 1 ura.

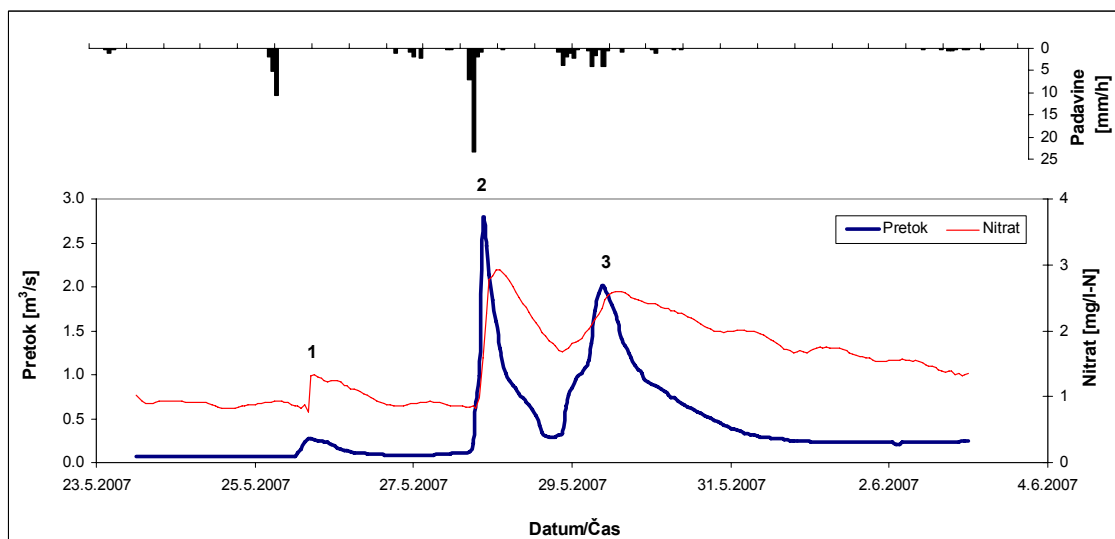
4.4.3.1 Padavinska dogodka v maju

V maju 2007 sta bila zabeležena dva padavinska dogodka. Padavinski dogodek maj I je prikazan na sliki 4.18. Znotraj padavinskega dogodka smo zabeležili 3 manjše hidrograme. Skupna količina padavin v padavinskem dogodku je bila 42,6 mm. Predhodno obdobje je bilo izrazito sušno ($IPP_3 = 0$ mm, $IPP_7 = 0$ mm in $IPP_{14} = 0,4$ mm), saj v aprilu praktično ni bilo padavin (slika 4.1). Konica pretoka v prvem hidrogramu je bila $0,27$ m³/s, koncentracija nitratnega dušika se je v času prvega hidrograma dvignila z 1 mg/l-N na $2,5$ mg/l-N. Konica drugega hidrograma je dosegla vrednost $1,39$ m³/s, koncentracija nitratnega dušika pa se je povzpela na vrednost $4,4$ mg/l-N. Zadnji hidrogram s konico pretoka $0,79$ m³/s je povzročil ponoven dvig koncentracije nitratnega dušika z $2,1$ mg/l-N na $3,5$ mg/l-N.



Slika 4.18: Padavinski dogodek maj I.
Figure 4.18: Rainfall event May I.

Na sliki 4.19 je prikazan drugi padavinski dogodek v maju (maj II). Tudi ta padavinski dogodek je sestavljen, skupna količina padavin je bila 72,4 mm. Vrednosti indeksa predhodnih padavin so naslednje: $IPP_3 = 1,3$ mm, $IPP_7 = 1,3$ mm in $IPP_{14} = 3,4$ mm.



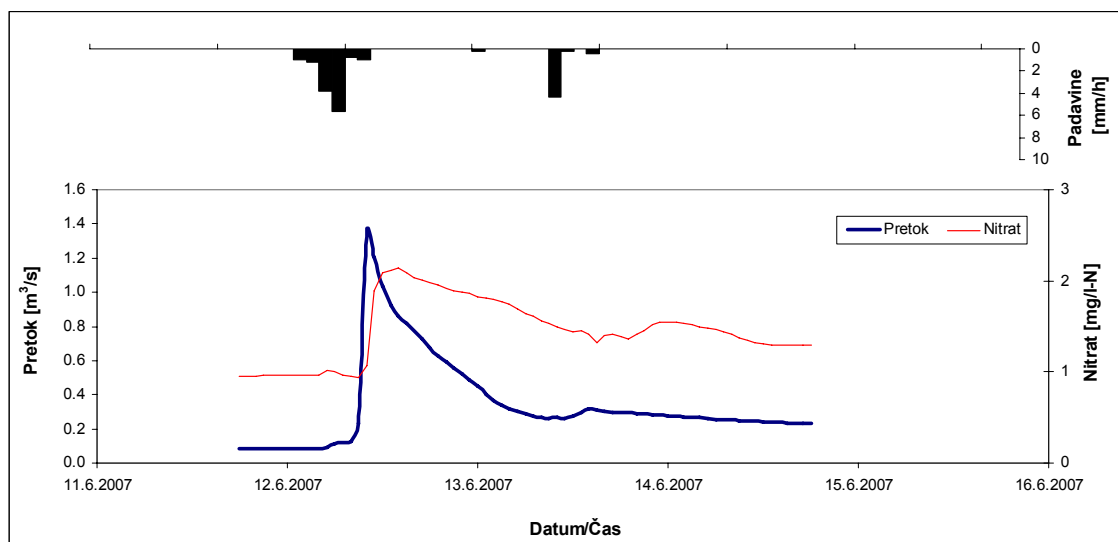
Slika 4.19: Padavinski dogodek maj II.
Figure 4.19: Rainfall event May II.

Konica prvega hidrograma je bila $0,27$ m³/s, koncentracija nitratnega dušika pa se je pod vplivom naraščanja pretoka v prvem hidrogramu minimalno spremenila (z $0,9$ mg/l-N na $1,3$ mg/l-N). Drugi hidrogram odtoka je dosegel vrednost $2,76$ m³/s, koncentracija nitratnega

dušika se je zvišala z 0,9 mg/l-N na 2,9 mg/l-N. Tretji hidrogram odtoka s konico 2,01 m³/s je povzročil vnovičen dvig koncentracije nitratnega dušika na 2,6 mg/l-N.

4.4.3.2 Padavinski dogodek v juniju

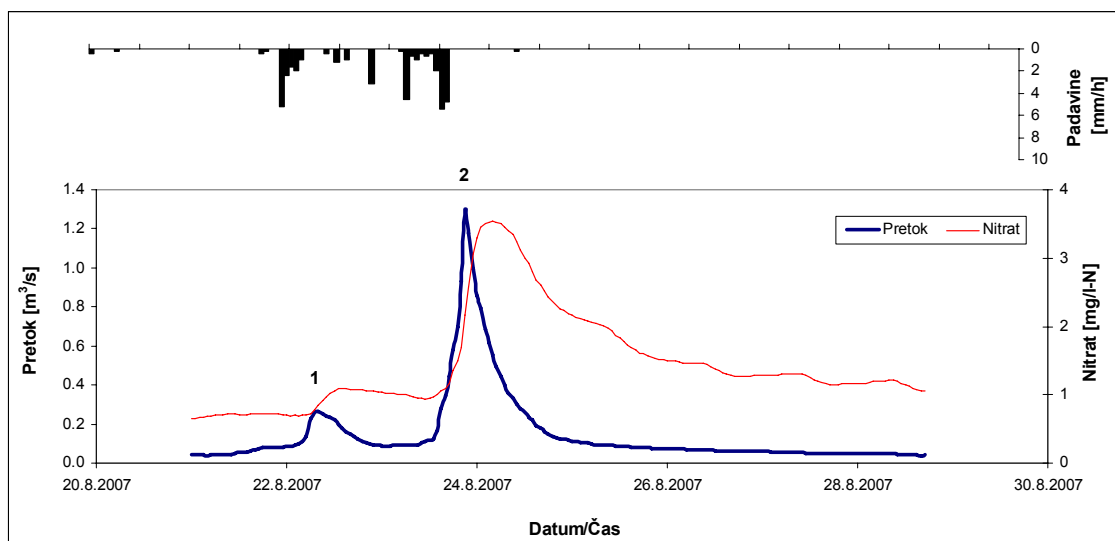
V primeru padavinskega dogodka zabeleženega v juniju (slika 4.20) je bilo predhodno obdobje manj sušno kot v primeru obeh padavinskih dogodkov v maju (IPP₃ = 1,5 mm, IPP₇ = 3,8 mm in IPP₁₄ = 5,8 mm). Junjski padavinski dogodek je bil majhen, skupna količina padavin je bila 12,4 mm. Konica hidrograma odtoka je dosegla vrednost 1,36 m³/s, koncentracija nitratnega dušika se je zvišala z 1 mg/l-N na 2,2 mg/l-N.



Slika 4.20: Padavinski dogodek v juniju.
Figure 4.20: Rainfall event in June.

4.4.3.3 Padavinski dogodek v avgustu

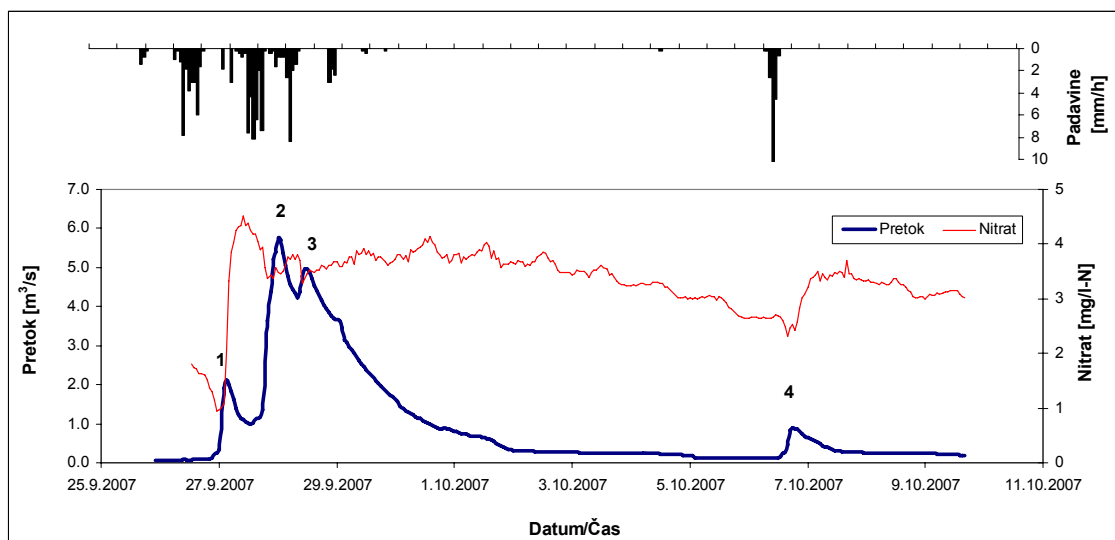
Na sliki 4.21 je prikazan padavinski dogodek zabeležen konec avgusta. Predhodno obdobje je bilo precej namočeno (IPP₃ = 17 mm, IPP₇ = 17 mm in IPP₁₄ = 23,6 mm). V padavinskem dogodku je padlo 36 mm padavin. Zabeležena sta bila dva hidrograma odtoka. Prvi, manjši, katerega konica je dosegla vrednost 0,27 m³/s, je povzročil rahlo spremembo v koncentraciji nitratnega dušika, ki se je dvignila z 0,8 mg/l-N na 1,1 mg/l-N. V drugem hidrogramu s konico odtoka 1,29 m³/s se je koncentracija nitratnega dušika povzpela na 3,5 mg/l-N.



Slika 4.21: Padavinski dogodek v avgustu.
Figure 4.21: Rainfall event in August.

4.4.3.4 Padavinski dogodek v septembru

Zadnji padavinski dogodek v letu 2007 je bil zabeležen konec septembra oz. v začetku oktobra (slika 4.22). Vrednosti indeksa predhodnih padavin so naslednje: $IPP_3 = 0$ mm; $IPP_7 = 0$ mm; $IPP_{14} = 13,3$ mm.



Slika 4.22: Padavinski dogodek v septembru.
Figure 4.22: Rainfall event in September.

Skupna količina padavin v septembrskem padavinskem dogodku je bila 111,2 mm. Znotraj padavinskega dogodka smo ločili 4 hidrograme odtoka. Prvi hidrogram odtoka s konico 2,12

m^3/s je povzročil hiter dvig koncentracije nitratnega dušika z $1,3 \text{ mg/l-N}$ na $4,5 \text{ mg/l-N}$. V času drugega in tretjega hidrograma odtoka s konicama $5,78 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. $4,98 \text{ m}^3/\text{s}$ se je koncentracija nitratnega dušika gibala okoli $3,8 \text{ mg/l-N}$. Opazno je bilo manjše znižanje koncentracije nitratnega dušika v obdobjih konic 2. in 3. hidrograma, v primeru konice drugega hidrograma za približno 1 mg/l-N in v primeru konice tretjega hidrograma za okoli $0,5 \text{ mg/l-N}$. V času med 3. in 4. hidrogramom so koncentracije nitratnega dušika ob počasnem upadanju pretoka ostale večinoma nad 3 mg/l-N . Zadnji, 4. hidrogram, je imel konico odtoka $0,88 \text{ m}^3/\text{s}$ in je povzročil vnovičen rahel dvig koncentracije nitratnega dušika z $2,5 \text{ mg/l-N}$ na $3,5 \text{ mg/l-N}$.

Hidrološke karakteristike hidrogramov znotraj zabeleženih padavinskih dogodkov v letu 2007, spremljajoče maksimalne koncentracije nitratnega dušika v vodotoku ter temperature zraka v obdobjih pred nastopom padavinskih dogodkov so podane v preglednici 4.2.

Preglednica 4.2: Karakteristike hidrogramov odtoka znotraj opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2007.
Table 4.2: Characteristics of hydrographs observed inside the rainfall events in year 2007.

Padavinski dogodek	Št.	Padavine [mm]	^a IPP ₃ [mm]	^a IPP ₇ [mm]	^a IPP ₁₄ [mm]	^b T ₇ [°C]	^b T ₁₄ [°C]	^c Q [m ³ /s]	^d NV [%]	^e NO ₃ [mg/l-N]	^f TK [h]
Maj I	*	7,0	0	0	0,4	13,5	14,2	0,27	13	2,5	7
	2	27,0	5,6	5,6	5,9	12,6	13,9	1,39	25	4,4	6
	3	8,6	26,1	26,1	26,3	12,2	13,8	0,79	21	3,5	6
Maj II	*	17,6	1,3	1,3	3,4	18,6	17,0	0,27	20	1,3	4
	2	33,6	12,1	12,9	14,2	19,4	16,9	2,76	36	2,9	3
	3	21,2	33,2	41,0	41,8	18,0	16,3	2,01	29	2,6	11
Junij	*	12,4	1,5	3,8	5,8	17,8	16,3	1,36	28	2,2	5
	*	12,8	17,0	17,0	23,6	19,3	18,2	0,27	15	1,1	5
Avgust	2	23,2	18,1	18,1	23,3	18,7	18,6	1,29	24	3,5	8
	*	29,6	0	0	13,3	12,8	14,0	2,12	32	4,5	6
	2	42,8	55,0	55,0	63,5	12,7	13,6	5,78	56	3,8	8
	3	19,2	55,0	55,0	63,5	12,7	13,5	4,98	55	3,9	3
September	4	19,6	0,5	1,1	14,4	15,1	13,7	0,88	27	3,5	7

^aIPP_x: Indeks predhodnih padavin določen za x predhodnih dni.

^bT_x: Povprečna urna temperatura v obdobju x predhodnih dni.

^cQ: Konica hidrograma odtoka.

^dNV: Delež nove vode v odtoku.

^eNO₃: Maksimalna koncentracija nitratnega dušika v hidrogramu.

^fTK: Čas od začetka dvigajočega dela hidrograma do konice hidrograma.

4.5 HIDROLOŠKE KONTROLE MOBILIZACIJE NITRATNEGA DUŠIKA

4.5.1 Sezonska spremenljivost hidrološke mobilizacije nitratnega dušika

V literaturi najdemo kar nekaj raziskav, ki so se ukvarjale s hidrološko pogojeno mobilizacijo in spiranjem nitratnega dušika s porečij (če omenimo samo nekatere novejše: npr. Band et al., 2001; McHale et al., 2002; Inamdar et al. 2004). Dejanski hidrološki kontrolni mehanizmi mobilizacije nitratnega dušika v času posameznih padavinskih dogodkov ostajajo še vedno precej nejasni (Weiler in McDonnell, 2006). Zahtevnost pri prepoznavanju poglavitnih dejavnikov, ki vplivajo na stopnjo sproščanja in spiranja nitratnega dušika, je pretežno posledica neenakosti opazovanih hidroloških enot, ki izhajajo iz prostorske heterogenosti hidroloških, pedoloških, biogeokemijskih ter ostalih značilnosti, in objektivne nezmožnosti opredelitve poti stekanja padavinskega odtoka.

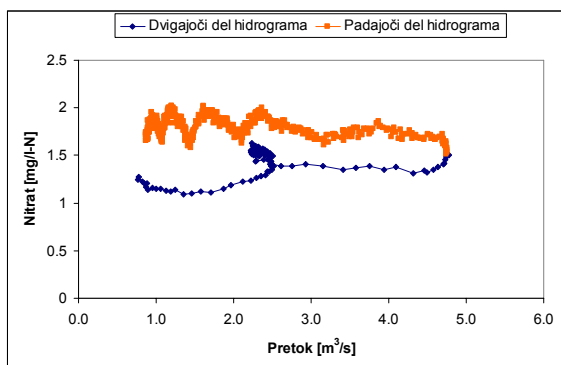
Na vlogo biogeokemijskega okolja, ki kontrolira proces nitrifikacije in mineralizacije organskih dušikovih spojin v gozdnih tleh, imata ključen vpliv predvsem dva dejavnika: vlažnostne razmere v tleh in temperatura tal (Aber et al., 1991; Vitousek et al., 2002; Bernhardt et al., 2002). Omenjena dejavnika smo skušali opredeliti z: (1) indeksom predhodnih padavin (IPP), ki odraža namočenost oz. izsušenost prispevnega območja ter ga lahko posredno povežemo z vlažnostnimi razmerami v tleh; (2) povprečnimi urnimi temperaturami zraka za obdobja 7 in 14 dni pred pojavom padavinskega dogodka, ki jih lahko posredno navežemo na temperaturne razmere v tleh.

Zvezne meritve koncentracije nitratnega dušika v času sestavljenih padavinskih dogodkov odražajo kompleksne vzorce hidrološko spodbujenega spiranja nitratnega dušika (slike 4.13 do 4.15). V primerjavi s koncentracijami nitratnega dušika v predhodnih sušnih obdobjih so opažene povišane koncentracije nitratnega dušika že v zgodnjih fazah izoblikovanja hidrogramov odtoka, ki sledijo prvemu hidrogramu v nizu hidrogramov znotraj sestavljenih padavinskih dogodkov. Mobilizacija nitratnega dušika v posameznem sledečem hidrogramu v sosledju poplavnih valov je pogojena z predhodno mobilizacijo v času prvega oz. predhodnih poplavnih valov. S tem je dejanska povezava med hidrološkimi kontrolami in biogeokemijskem okoljem zbrisana oz. slabo razvidna. Za analizo hidrološke mobilizacije

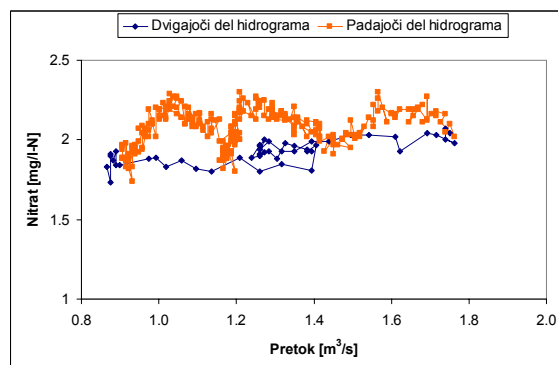
nitratnega dušika, ki se je akumuliral v biogeokemijskem okolju gozdnih tal v predhodnem sušnem obdobju, smo se odločili ločeno analizirati t. i. »prve hidrograme oz. prve poplavne valove« v padavinskih dogodkih, zabeleženih v letu 2006 (v preglednici 4.1 so ti hidrogrami označeni z *). S hidrološkega stališča lahko te poplavne valove označimo z nizkim indeksom predhodnih padavin in nizkim baznim odtokom v predhodnem obdobju, omejeno hidrološko mobilizacijo nitratnega dušika v predhodnem obdobju, posledično nizko koncentracijo nitratnega dušika v vodotoku in potencialno akumulacijo le-tega v hidrološko izoliranih, plitvih talnih horizontih.

4.5.1.1 Prvi hidrogrami

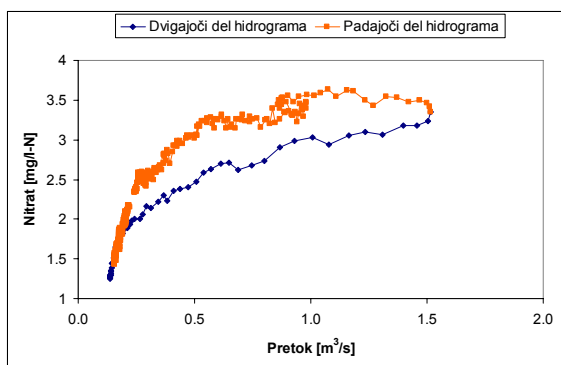
Spremembe v koncentraciji nitratnega dušika v vodotoku ob prehodu prvih hidrogramov v padavinskih dogodkih odražajo neposreden vpliv spremenjenih hidroloških razmer na intenziteto spiranja nitratnega dušika iz biogeokemijskega okolja gozdnih tal. Za lažjo predstavljenost vpliva spremembe pretočnih razmer na spremembo koncentracije nitratnega dušika so na slikah 4.23a do 4.23f prikazane histerezne zanke izbranih prvih poplavnih valov. V vseh primerih gre za zanke, ki potekajo v nasprotni smeri urinega kazalca, kjer so koncentracije ob istem pretoku v dvigajočem delu hidrograma nižje kot koncentracije v padajočem delu hidrograma. Izjemi sta hidrograma marca in aprila. V primeru poplavnega vala marca znašajo razlike med koncentracijo nitratnega dušika v dvigajočem in padajočem delu hidrograma le okoli 0,5 mg/l-N (slika 4.23a). Neizrazit je tudi vpliv spremenjenih hidroloških pogojev na koncentracijo nitratnega dušika v primeru aprilskega hidrograma (slika 4.23b), kjer so razlike v koncentraciji v času dvigajočega in padajočega dela hidrograma zanemarljive. Histerezne zanke za hidrograme maj (Slika 4.23c), maj–junij (slika 4.23d), avgust I (slika 4.23e) in avgust III (slika 4.23f) odražajo velik vpliv spremenjenih pretočnih razmer na spremembo v koncentraciji nitratnega dušika.



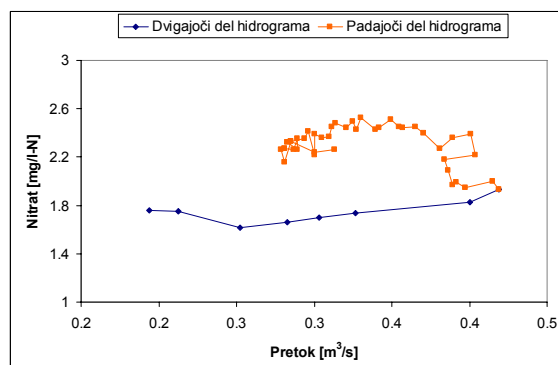
Slika 4.23a: Marec.
Figure 4.23a: March.



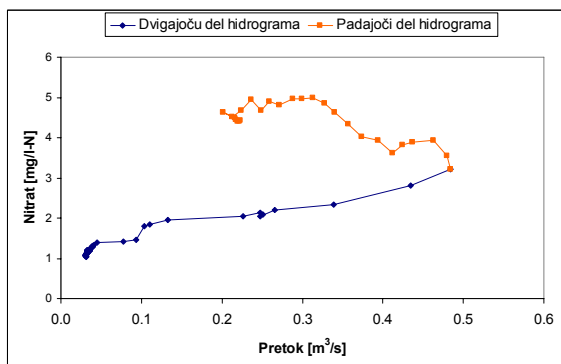
Slika 4.23b: April.
Figure 4.23b: April.



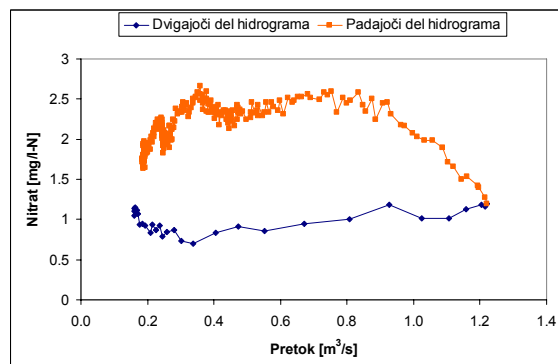
Slika 4.23c: Maj.
Figure 4.23c: May.



Slika 4.23d: Maj–junij.
Figure 4.23d: May–June.



Slika 4.23e: Avgust I.
Figure 4.23e: August I.

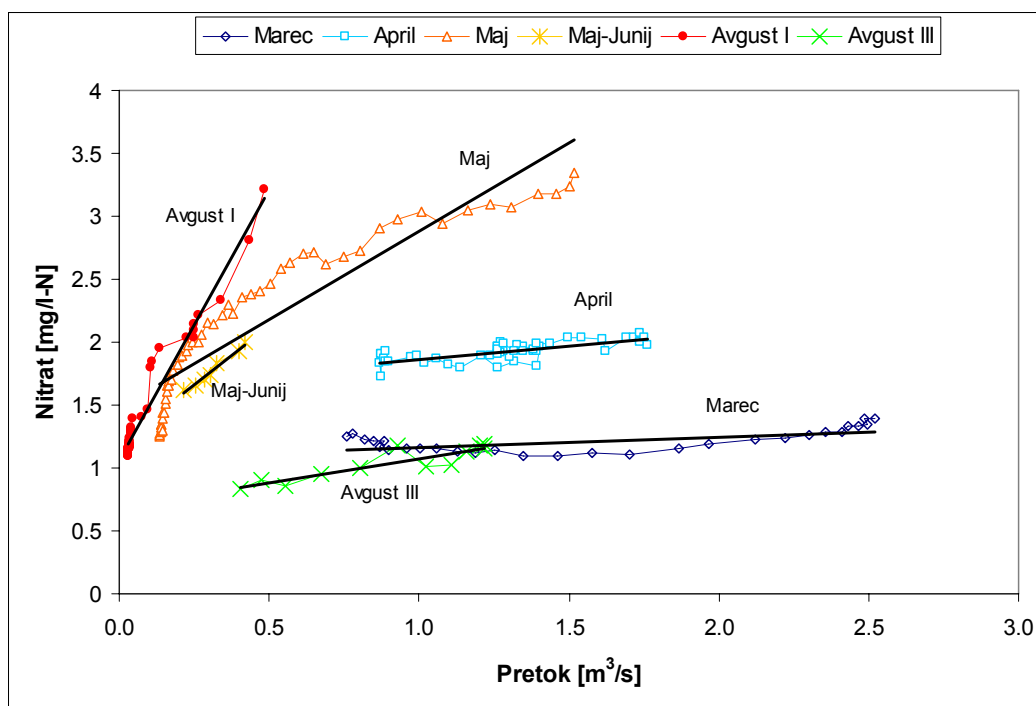


Slika 4.23f: Avgust III.
Figure 4.23f: August III.

Slika 4.23 (a–f): Histerezne zanke izbranih prvih poplavnih valov padavinskih dogodkov v letu 2006.
Figure 4.23 (a–f): Hysteresis loops of selected first flood waves of the rainfall events in year 2006.

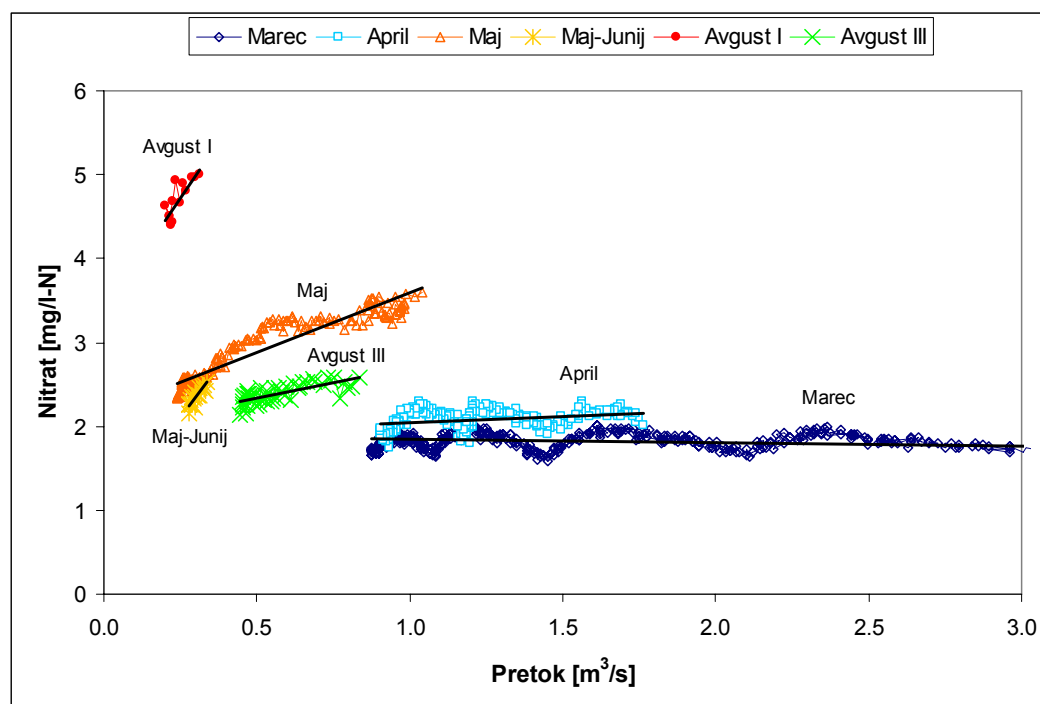
Izbrani prvi hidrogrami se ne razlikujejo samo v hidroloških značilnostih (konice pretokov se gibljejo od $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$ do $4,78 \text{ m}^3/\text{s}$), ampak še očitneje v sezonskem biogeokemijskem ozadju, ki vpliva na razpoložljivost produktov mineralizacije in nitrifikacije v talnih horizontih za spiranje s padavinskim odtokom. Pozitivna soodvisnost med naraščajočo intenzivnostjo

biogeokemijskih procesov (s sezonskim naraščanjem temperature zraka v predhodnih obdobjih) na intenziteto spiranja nitratnega dušika je razvidna iz primerjave sprememb koncentracije nitratnega dušika s spremenjenimi pretočnimi razmerami v vodotoku za dvigajoče (slika 4.24) in padajoče dele izbranih prvih hidrogramov (slika 4.25). Kot padajoči del hidrograma je upoštevan časovni del hidrograma od dosežene maksimalne koncentracije nitratnega dušika naprej, saj konice hidrograma odtoka in koncentracije nitratnega dušika časovno ne sovpadajo. Regresijske premice so podane zgolj za ponazoritev intenzivnosti odziva koncentracije na spremembo v pretoku. Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere se povečuje od poplavnih valov zgodaj spomladi (marca in aprila) proti padavinskim dogodkom pozno spomladi (maja in v začetku junija), najvišji porast v koncentraciji nitratnega dušika z zvišanjem pretoka v vodotoku je bil opažen v primeru prvega hidrograma padavinskega dogodka avgust I.



Slika 4.24: Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere v dvigajočem delu prvih hidrogramov.

Figure 4.24: Responsiveness of the nitrate concentration on changed discharge conditions in the periods of the rising limbs of the first hydrographs.



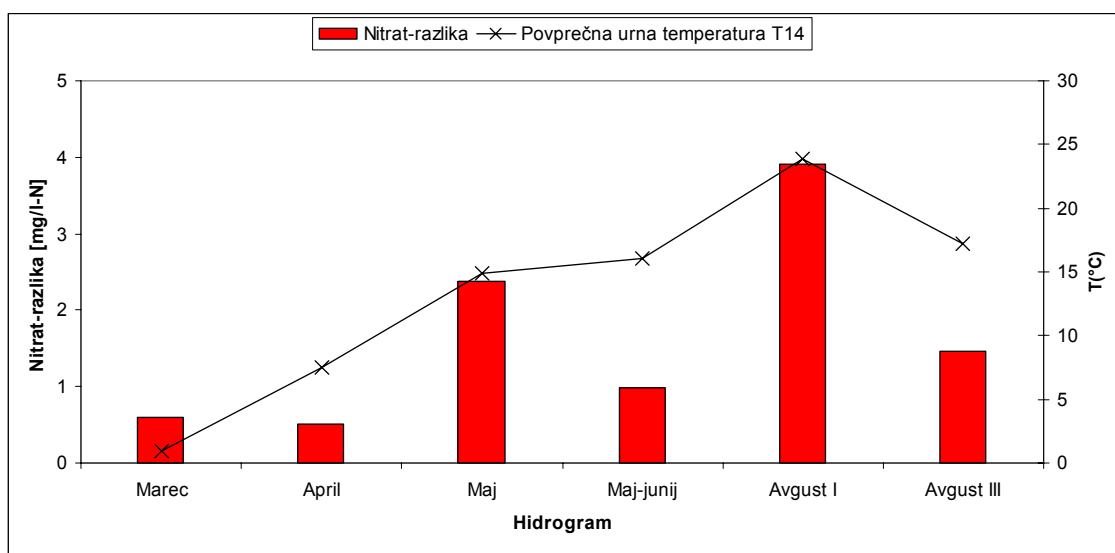
Slika 4.25: Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere v padajočem delu prvih hidrogramov.

Figure 4.25: Responsiveness of the nitrate concentration on changed discharge conditions in the periods of the falling limbs of the first hydrographs.

Upad odzivnosti koncentracije nitratnega dušika na dvig pretoka v primeru zadnjega padavinskega dogodka v avgustu (avgust III) je možno povezati s predhodnim, zelo namočenim obdobjem v avgustu (padavinska dogodka avgust I in avgust II), kar je najverjetneje vplivalo na zmanjšanje zaloge nitratnega dušika v gozdnih tleh. Sorazmerno s hitrostjo naraščanja odzivnosti koncentracije nitratnega dušika na pretočne razmere v času dvigajočih delov hidrogramov so se dogajale tudi spremembe v hitrosti upada koncentracije nitratnega dušika z upadajočim pretokom v padajočih delih hidrogramov odtoka (slika 4.25).

Sezonske spremembe v odzivnosti koncentracije nitratnega dušika na spremenjene hidrološke pogoje lahko povežemo s temperaturnimi in vlažnostnimi razmerami v obdobjih pred nastopom padavinskih dogodkov. Povprečne urne vrednosti temperature zraka za obdobje 14 predhodnih dni so podane v preglednici 4.1 in prikazane na sliki 4.26, skupaj z razlikami med začetno koncentracijo (v predhodnem sušnem obdobju) in maksimalno koncentracijo nitratnega dušika v času izbranih prvih hidrogramov. Sklepamo lahko, da količina nitratnega dušika, ki je na razpolago za mobilizacijo, narašča s temperaturo zraka. V primeru

padavinskih dogodkov marca in aprila sta bili povprečni urni vrednosti temperatur zraka v 14-dnevnem predhodnem obdobju zgolj 1 °C oz 7,5 °C, medtem ko je bila povprečna urna temperatura zraka za obdobje 14 dni pred padavinskim dogodkom avgust I blizu 25 °C. Ob tem velja poudariti, da je temperaturno območje tal 25 do 35 °C najprimernejše za mineralizacijo dušika v tleh, medtem ko je pri temperaturah pod 10 °C sposobnost mineralizacije dušika v tleh znatno zmanjšana (Nicolardot et al., 1994; Knoepp in Swank, 2002). Manjšo izjemo v trendu naraščanja razlik med začetnimi in koničnimi koncentracijami nitratnega dušika s temperaturo predstavlja prvi hidrogram v padavinskem dogodki maj–junij, vendar je ta hidrogram tudi najmanjši izmed vseh prvih obravnavanih hidrogramov, obenem pa se je pojavil manj kot en teden po prvem opazovanem padavinskem dogodku v maju.



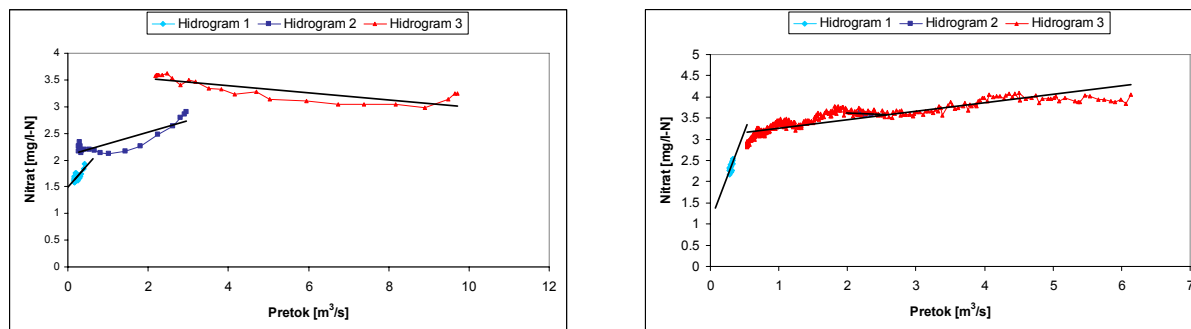
Slika 4.26: Razlike med začetnimi in maksimalnimi koncentracijami nitratnega dušika ter povprečne urne vrednosti temperatur zraka za predhodna obdobja 14 dni za izbrane prve hidrograme.

Figure 4.26: Differences between the initial and maximum nitrate concentrations and average hourly air temperatures for the periods of 14 preceding days before the occurrence of the selected first hydrographs.

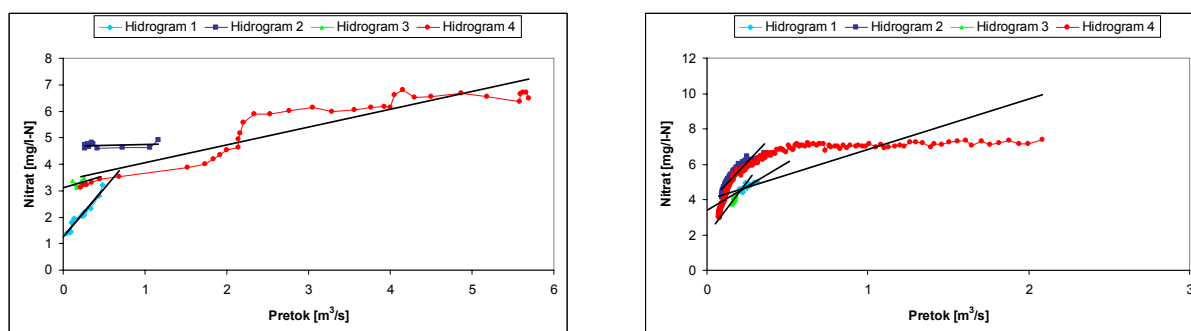
4.5.1.2 Nizi hidrogramov v sestavljenih padavinskih dogodkih

Spremenljivost v koncentraciji nitratnega dušika v sestavljenih padavinskih dogodkih (slike 4.13 do 4.15) je v prvi vrsti pokazatelj velikosti zaloge nitratnega dušika v gozdnih tleh, ki je na razpolago za hidrološko mobilizacijo. V primeru, da bi bila količina razpoložljivega nitratnega dušika v tleh majhna, bi bile povišane vrednosti koncentracije nitratnega dušika opažene predvsem v času prvih hidrogramov sestavljenih padavinskih dogodkov, prav tako pa bi bile tudi koncentracije nitratnega dušika v času padajočih delov hidrogramov nižje.

Na slikah 4.27 in 4.28 je prikazana spremenljivost odzivnosti koncentracije nitratnega dušika v naraščajočih in padajočih delih hidrogramov (od konice koncentracije nitratnega dušika naprej) znotraj dveh zabeleženih sestavljenih dogodkov, in sicer padavinskega dogodka maj–junij s tremi hidrogrami in padavinskega dogodka avgust I s štirimi hidrogrami odtoka.



Slika 4.27: Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere znotraj sestavljenega padavinskega dogodka maj–junij za naraščajoče (levo) in padajoče dele hidrogramov (desno).
Figure 4.27: Responsiveness of the nitrate concentration on changed discharge conditions inside the May–June rainfall event for rising (left) and falling (right) limbs of the hydrographs.

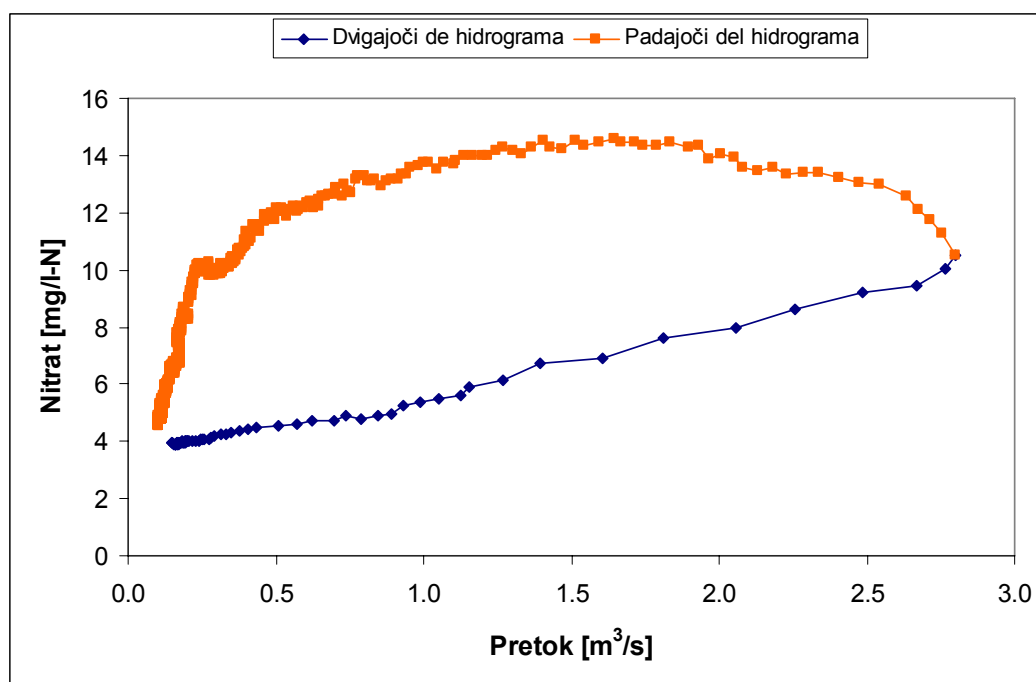


Slika 4.28: Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere znotraj sestavljenega padavinskega dogodka avgust I za naraščajoče (levo) in padajoče dele hidrogramov (desno).
Figure 4.28: Responsiveness of the nitrate concentration on changed discharge conditions inside the August I rainfall event for rising (left) and falling (right) limbs of the hydrographs.

V obeh primerih je opazen trend zmanjšanja odzivnosti koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere v vodotoku v sosledju hidrogramov. Znotraj obeh padavinskih dogodkov je sicer do najvišjih koncentracij nitratnega dušika prišlo v času zadnjih, najvišjih hidrogramov odtoka, obenem pa zadnji hidrogrami odtoka ob predhodno doseženih visokih koncentracijah nitratnega dušika v vodotoku odražajo zmanjšano odzivnost koncentracije nitratnega dušika na pretočne razmere.

V času drugega hidrograma znotraj novembrskega padavinskega dogodka so bile zabeležene najvišje koncentracije nitratnega dušika, ki so močno presegle najvišje izmerjene koncentracije v padavinskih dogodkih v pozno spomladanskem in poletnem času. Z vidika obravnave sezonske spremenljivosti hidrološke mobilizacije nitratnega dušika si novembrski padavinski dogodek zasluži posebno pozornost, saj so imeli hidrološki mobilizacijski mehanizmi ob danih biogeokemijskih razmerah na spiranje nitratnega dušika v vodotok izrazito velik vpliv. Slika 4.29 prikazuje histerezno zanko za drugi hidrogram v novembrskem padavinskem dogodku. Opazna je velika razlika med koncentracijo v dvigajočem in padajočem delu hidrograma ob istih pretočnih razmerah v vodotoku, kar je lahko indikator velike zaloge nitratnega dušika v tleh. Podobno kot v primeru padavinskih dogodkov pozno spomladi in poleti lahko odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene hidrološke pogoje navežemo na predhodno sušno obdobje v drugi polovici septembra, v oktobru in prvi polovici novembra (slika 4.2), ko se hidrološka mobilizacija ob zgolj manjših padavinah ni mogla vršiti. Z biogeokemijskega vidika so bili zaradi ekstremno visokih temperatur zraka v omenjenem predhodnem jesenskem obdobju (povprečni urni temperaturi zraka v mesecu septembru in oktobru sta bili 16,6 °C in 12,9 °C, povprečna urna temperatura zraka v 14-dnevnem predhodnem obdobju pred novembrskim padavinskim dogodkom pa je bila 8,7 °C) zagotovljeni še vedno ugodni temperaturni pogoji za mineralizacijo in nitrifikacijo dušikovih spojin v gozdnih tleh.

Dodaten dejavnik, ki bi lahko prispeval k visokim koncentracijam nitratnega dušika v vodotoku, je zmanjšana aktivnost vegetacije v jesenskem obdobju, manjša asimilacijska sposobnost vegetacije (Likens in Bormann, 1995) ter dodaten vir nitratnega dušika, ki se v jesenskem času aktivira ob razgrajevanju rastlinskih in drevesnih ostankov, predvsem opada listja (Currie in Aber, 1997; Lovett in Rueth, 1999; Goodale et al. 2002).



Slika 4.29: Histerezna zanka za drugi hidrogram v novembrskem padavinskem dogodku.
Figure 4.29: Hysteresis loop for the second hydrograph in the November rainfall event.

4.5.2 Sestava odtoka in dinamika spiranja nitratnega dušika

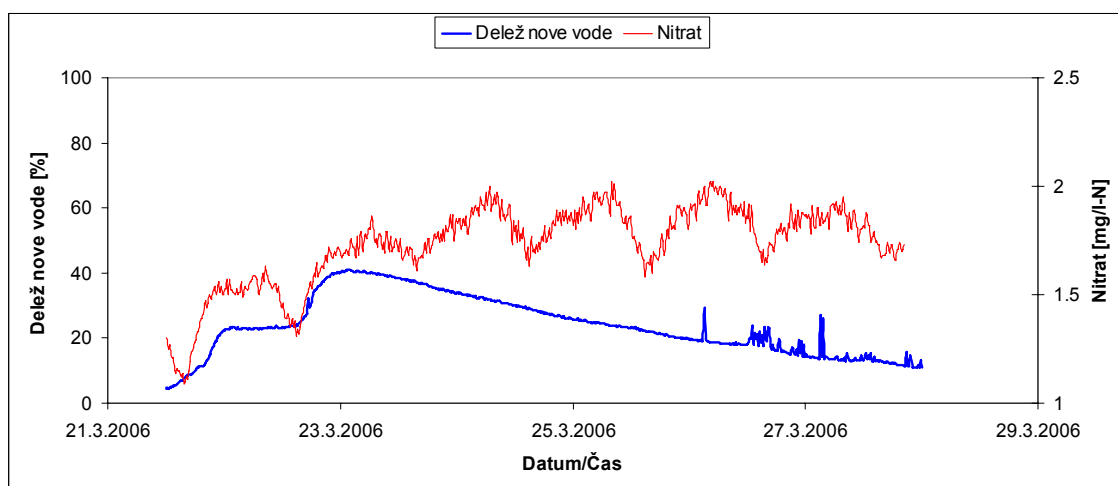
Določitev sestave odtoka z uporabo naravnih sledil je postala pogosta tehnika, s katero se poizkuša opisati hidrološke poti stekanja padavin in proces tvorbe odtoka s prispevnih površin vodotoka (Bonell, 1993; Jakeman in Hornberger, 1993; Weiler et al., 1999; Shultz, 1999; Joerin et al., 2002; Weiler et al., 2003). Teoretično ozadje določevanja komponent odtoka z uporabo naravnih ali umetnih okoljskih sledil je podrobneje predstavljeno v teoretičnem delu naloge (poglavje 2.2).

V naši raziskavo smo kot naravno sledilo uporabili elektroprevodnost vode, s pomočjo katere smo ločili dve komponenti hidrogramov odtoka znotraj zabeleženih padavinskih dogodkov. Komponenti odtoka se ločita glede na starost oz. zadrževalni čas znotraj prispevnega območja vodotoka in sta opredeljeni kot t. i. »nova voda«, ki v hidrološki sistem porečja vstopi v času padavinskega dogodka, in »stara voda«, ki glede na vsebnost sledila (elektroprevodnost) tvori odtok v času pred pojavom padavinskega dogodka. Ločitev komponent odtoka smo izvedli na podlagi zveznih meritev elektroprevodnosti odtoka v vodotoku in meritev elektroprevodnosti enotnih vzorcev padavinske vode, odvzetih za posamezne padavinske dogodke. Poznano je,

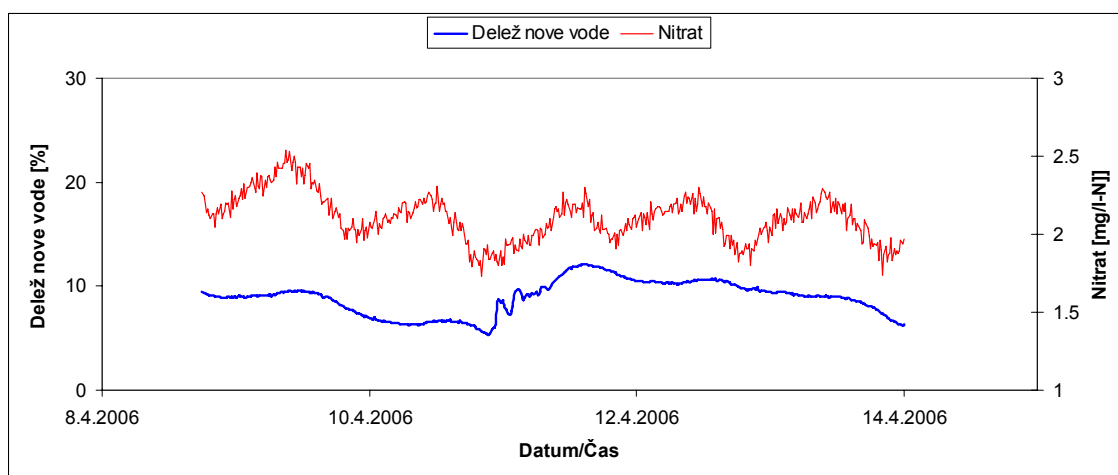
da ima uporaba elektroprevodnosti vode za ločitev komponent hidrograma odtoka določene omejitve, predvsem v smislu časovne spremenljivosti koncentracije specifičnih ionov v procesu tvorbe padavinskega odtoka (Laudon in Slaymaker, 1997). Ker pa je hidrološka odzivnost prispevnih površin Padeža velika, tvorba padavinskega odtoka zelo hitra in temu primerno zadrževalni in potovalni čas padavinske vode kratek, menimo, da ima možna časovna spremenljivost sestave koncentracije specifičnih ionov, ki vpliva na skupno elektroprevodnost vode, zgolj omejen vpliv.

Izmerjena elektroprevodnost padavin v odvzetih vzorcih padavinske vode (»nove vode«) se je gibala med 0,0090 mS/cm in 0,0160 mS/cm, pri čemer je elektroprevodnost padavinske vode upadala z večanjem količine padavin v padavinskem dogodku. Elektroprevodnost baznega odtoka – »stare vode« je bila v obdobjih nizkih pretokov v glavnem nad 0,3000 mS/cm, v primeru ekstremno nizkih pretokov v času poletnega sušnega obdobja se je vrednost elektroprevodnosti vode v vodotoku dvignila na okoli 0,3800 mS/cm. Med padavinskimi dogodki je ob hitrem dotoku padavinske vode vrednost elektroprevodnosti vode v vodotoku hitro upadla, v primeru najvišjih hidrogramov odtoka pod 0,1500 mS/cm. Grafično so zvezne meritve elektroprevodnosti vode v vodotoku ter pretočnih razmer prikazane v prilogi A.

V nadaljevanju so prikazani rezultati določitve deležev nove vode v skupnem odtoku v času opazovanih padavinskih dogodkov na podlagi dvokomponentnega modela mešanja nove (padavinske) vode in stare vode (baznega odtoka). Manjša nenadna nihanja v deležu nove vode so posledica nihanj merjene elektroprevodnosti vode, ki pa na samo obravnavo vpliva sestave odtoka na spiranje nitratnega dušika nima vpliva. V padavinskem dogodku marca 2006 je nova voda v skupnem odtoku dosegla 40 % delež (slika 4.30), v padavinskem dogodku aprila pa zgolj 12 % delež (slika 4.31). V obeh primerih padavinska dogodka nista vplivala na dinamiko koncentracije nitratnega dušika v vodotoku.

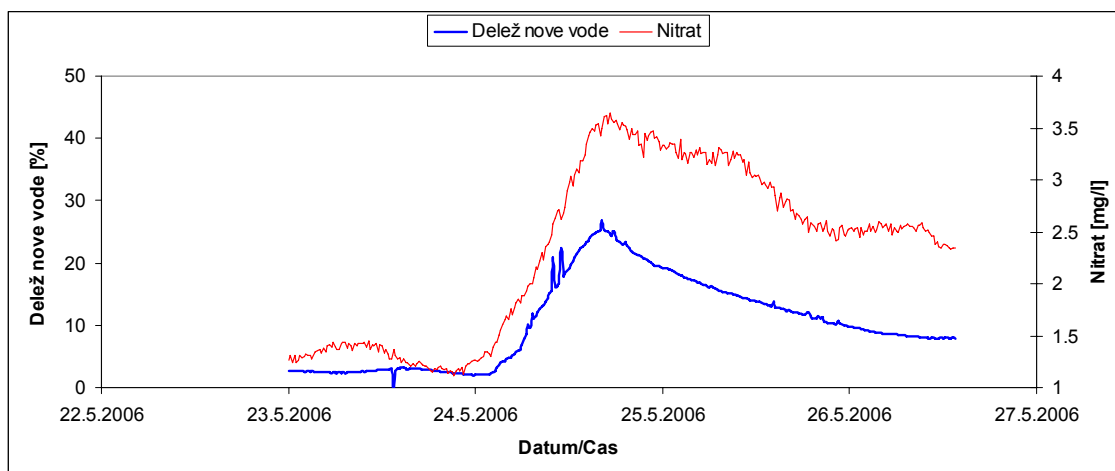


Slika 4.30: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku marca.
Figure 4.30: Proportion of the event water and nitrate concentration in rainfall event of March.

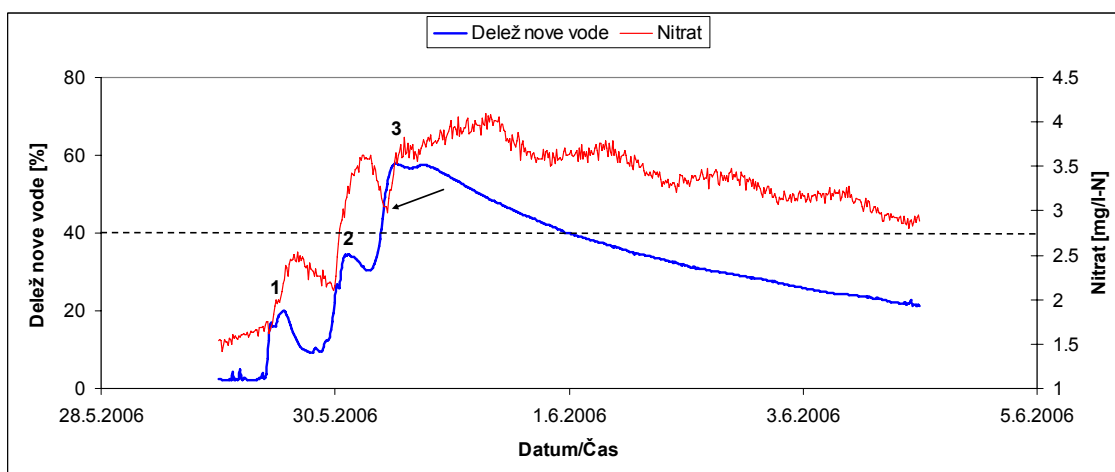


Slika 4.31: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku aprila.
Figure 4.31: Proportion of the event water and nitrate concentration in rainfall event of April.

V padavinskem dogodku maja je delež nove vode dosegel 26 % skupnega odtoka (slika 4.32), opažen je porast koncentracije nitratnega dušika z višanjem deleža padavinskega odtoka. Zvišanje koncentracije nitratnega dušika s povečanjem deleža nove vode je potekalo tudi v času prvega in drugega hidrograma v sestavljenem padavinskem dogodku maj–junij (slika 4.33). Delež nove vode v prvem hidrogramu je dosegel 16 %, v drugem hidrogramu pa 34 %. V tretjem hidrogramu se je delež nove vode povzpел na 57 %, kar je vplivalo na znižanje koncentracije nitratnega dušika v vodotoku za nekaj več kot 0,5 mg/l-N. Območje, kjer pride do znižanja koncentracije nitratnega dušika v vodotoku zaradi visokega deleža padavinske vode, je na sliki 4.33 označeno s puščico.

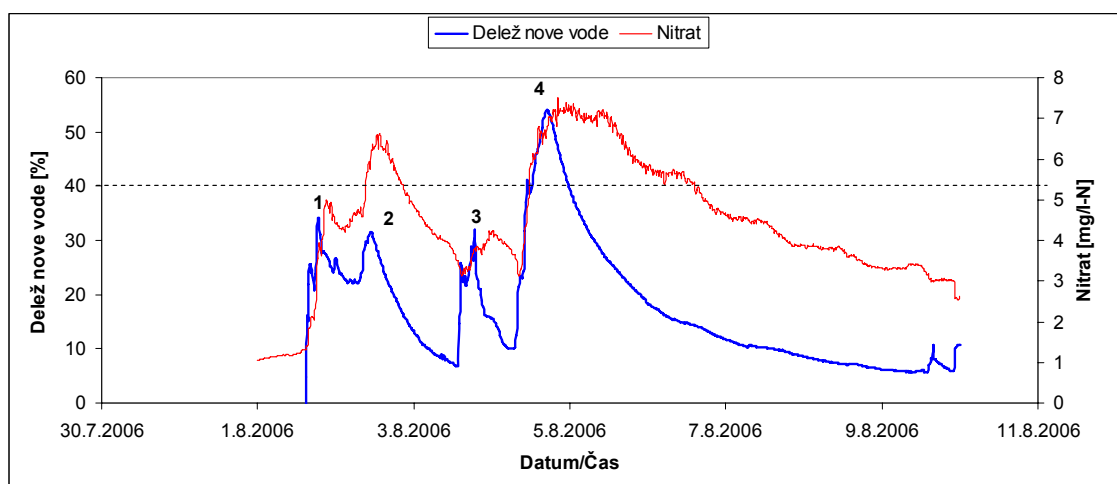


Slika 4.32: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku maja.
Figure 4.32: Proportion of the event water and nitrate concentration in rainfall event of May.



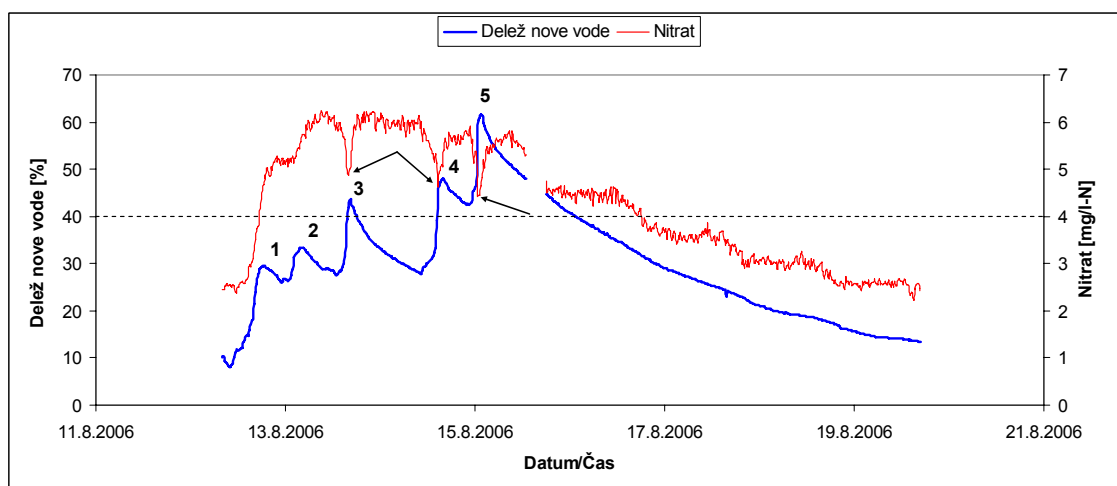
Slika 4.33: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku maj–junij.
Figure 4.33: Proportion of the event water and nitrate concentration in rainfall event May–June.

Znotraj padavinskega dogodka avgust I so bile spremembe v deležu nove vode v skupnem odtoku zaradi visokih intenzitet padavin zelo hitre (slika 4.34). V času prvega hidrograma je intenziteta padavin dosegla vrednost 7,9 mm/15 min, kar je povzročilo zelo hiter dvig deleža nove vode na 34 %. V drugem in tretjem hidrogramu sta deleža padavinske vode dosegla vrednost 30 % oz. 32 %. Najvišji delež nove vode je bil v zadnjem, četrtem hidrogramu, in sicer 54 %. Kljub visokim deležem nove vode ni prišlo do znižanja koncentracije nitratnega dušika v vodotoku.



Slika 4.34: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku avgust I.
Figure 4.34: Proportion of the event water and nitrate concentration in rainfall event August I.

Slika 4.35 prikazuje spremenljivost deleža nove vode v času padavinskega dogodka avgust II. V prvem in drugem hidrogramu sta deleža padavinske vode dosegla vrednosti 28 in 33 %, oba hidrograma pa sta povzročila zvezen dvig koncentracije nitratnega dušika.

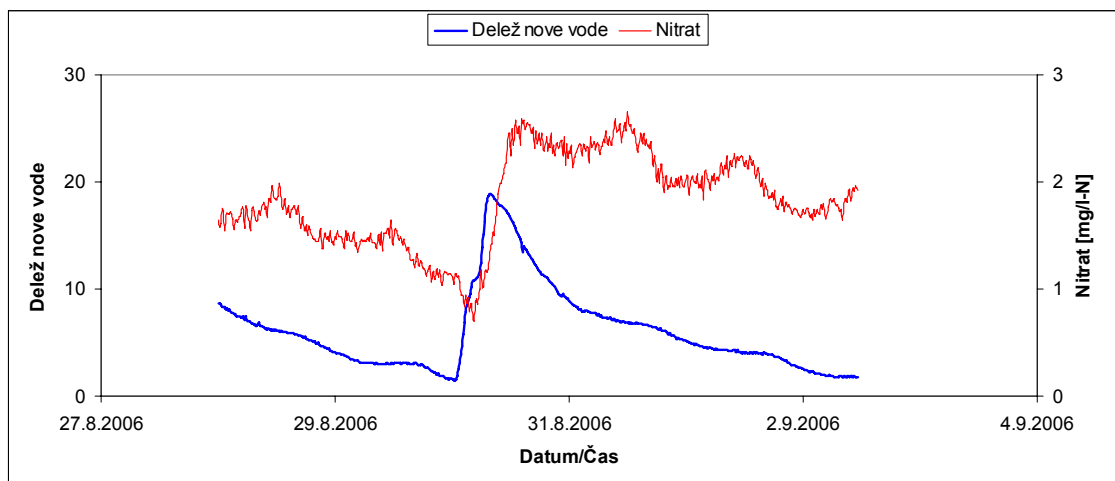


Slika 4.35: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku avgust II.
Figure 4.35: Proportion of the event water and nitrate concentration in rainfall event August II.

V času 3., 4. in 5. hidrograma je bil ob visokih intenzitetah padavin (4 do 6 mm/15 min) in posledično hitri formaciji hidrogramov delež nove vode visok. V 3. hidrogramu je dosegel 43 % delež, v 4. hidrogramu 47 % delež, v zadnjem hidrogramu pa je delež nove vode presegel 60 %, kar je bil obenem tudi najvišji zabeleženi delež nove vode v opazovanih padavinskih dogodkih. Visoki deleži nove vode v nizu zadnjih treh hidrogramov so vplivali na znižanje

koncentracije nitratnega dušika v vodotoku za 1mg/l-N do 1,5 mg/l-N, kar je na sliki 4.35 označeno s puščicami.

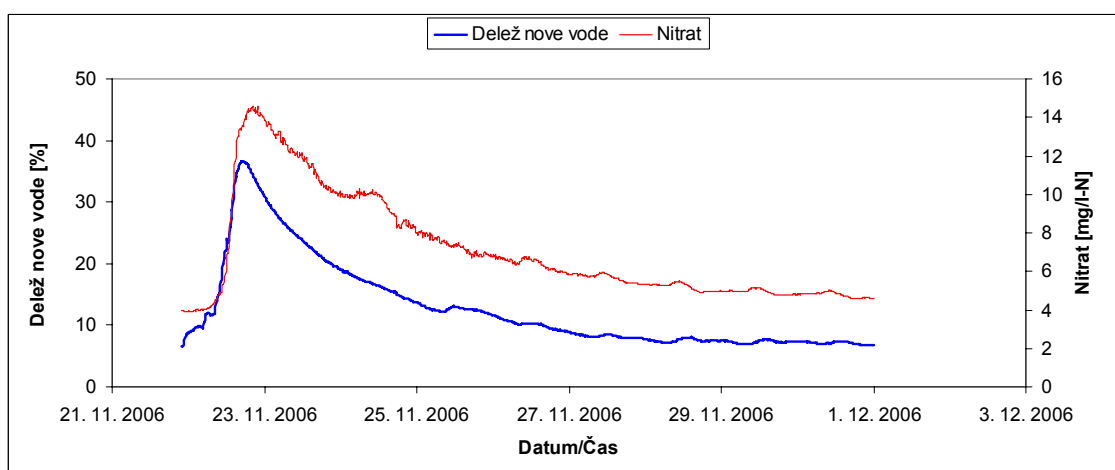
V padavinskem dogodku avgust III je delež nove vode dosegel vrednost 18 % (slika 4.36), s povečanjem deleža nove vode se je zvezno višala koncentracija nitratnega dušika v vodotoku.



Slika 4.36: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v padavinskem dogodku avgust III.

Figure 4.36: Proportion of the event water and nitrate concentration in rainfall event August III.

Nova voda je v novembrskem padavinskem dogodku dosegla 36 % delež, ob tem pa je bil zabeležen najvišji porast koncentracije nitratnega dušika v vodotoku izmed vseh opazovanih padavinskih dogodkov (slika 4.37).



Slika 4.37: Delež nove vode in koncentracija nitratnega dušika v novembrskem padavinskem dogodku.

Figure 4.37: Proportion of the event water and nitrate concentration in rainfall event of November.

Vrednosti deležev nove vode v času konic hidrogramov opazovanih padavinskih dogodkov so podane v preglednici 4.1.

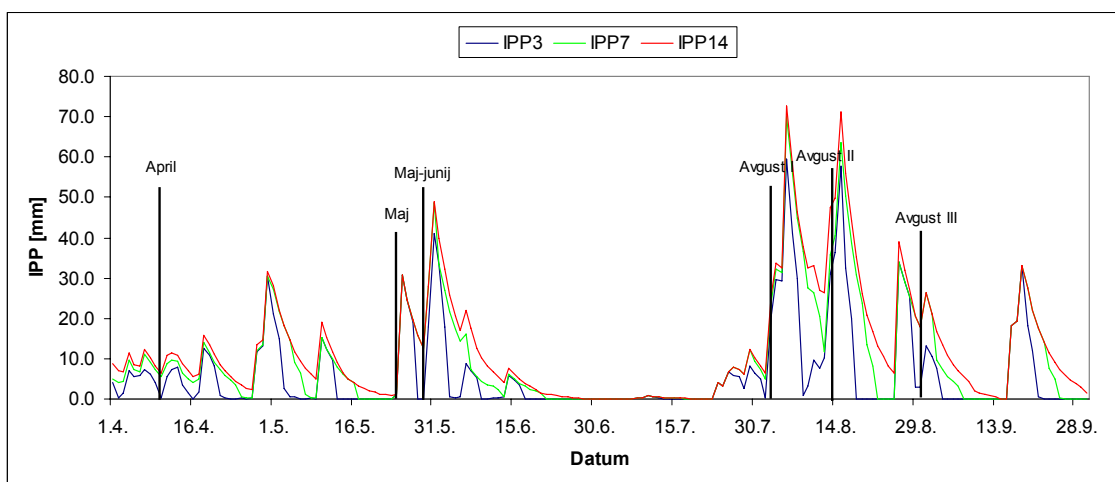
V večini padavinskih dogodkov se delež nove vode v skupnem odtoku ni dvignil nad 40 %. Povzamemo lahko, da je za dogodke z manjšimi količinami in intenzitetami padavin značilen velik delež »stare vode«. V obdobjih teh padavinskih dogodkov je bilo opažen zvezen dvig koncentracije nitratnega dušika s povečevanjem deleža nove vode. Pozitivna soodvisnost med deležem nove vode in koncentracijo nitratnega dušika ni bila opažena v večini opazovanih hidrogramov, v katerih je nova voda predstavljala več kot 40 % delež skupnega odtoka (primer zadnjih treh hidrogramov v padavinskem dogodku avgust II in zadnjega hidrograma v padavinskem dogodku maj–junij), kjer je bilo zaznано razredčenje in znižanje koncentracije nitratnega dušika v času konic hidrogramov odtoka. Kmalu po upadu koničnih pretokov pa se je koncentracija nitratnega dušika znova dvignila na vrednosti, kakršne so bile merjene v času pred povišanim dotokom nove vode. V primeru zadnjega hidrograma v padavinskem dogodku avgust I, ko je delež padavinske vode znašal 54 %, upad koncentracije nitratnega dušika ni bil opažen, kar lahko pripišemo predvsem zelo počasni tvorbi hidrograma odtoka, saj je od začetka dviganja hidrograma do konice hidrograma poteklo kar 9 ur. Formacija preostalih hidrogramov z deležem nove vode nad 40 % in opaženim upadom koncentracije nitratnega dušika je potekla v le 2 do 3 urah (preglednica 4.1).

Novo vodo je možno enačiti z neposrednim padavinskim odtokom, če je stekanje padavinske vode s prispevnih površin vodotoka zelo hitro oz. je kontaktni čas padavinske vode s prispevnimi površinami vodotoka zelo kratek (Caissie et al., 1996; Kendall et al., 2001). Kot smo že omenili, je hidrološki odziv prispevnega območja Padeža zelo hiter, kar se odraža na hitri tvorbi hidrogramov odtoka in kratkih časih koncentracije, ki potečejo od začetka dvigajočega dela hidrograma do konice hidrograma (preglednica 4.1). V primeru nekaterih hidrogramov odtoka lahko torej »novo vodo« enačimo z neposrednim padavinskim odtokom, ki zaradi hitrega stekanja nima možnosti intenzivnejšega mešanja s »staro vodo« in biogeokemijskim okoljem gozdnih tal. Takšna struktura padavinskega odtoka posledično privede do znižanja koncentracije nitratnega dušika v vodotoku.

4.5.3 Primerjava spremenljivosti hidrološke mobilizacije nitratnega dušika v letih 2006 in 2007

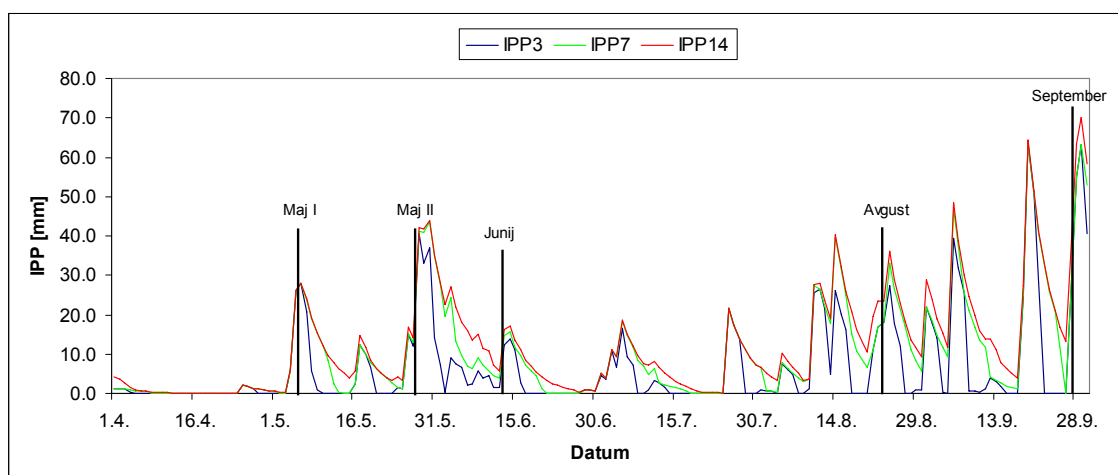
Ugotavljanje spremenljivosti hidrološke mobilizacije nitratnega dušika v istih obdobjih znotraj daljših časovnih obdobj na podlagi analize opazovanih padavinskih dogodkov je težavno, saj same padavinske dogodke težko primerjamo med seboj. Nam pa detajlno spremljanje koncentracije nitratnega dušika med padavinskimi dogodki omogoča analizo hkratnih spremenljivih hidroloških in sezonskih biogeokemijskih razmer, ki se odražajo na spremenjeni razpoložljivosti nitratnega dušika za hidrološko mobilizacijo v širših časovnih okvirih.

Sliki 4.38 in 4.39 prikazujeta kronološki pregled opazovanih padavinskih dogodkov v letih 2006 in 2007, skupaj z vrednostmi indeksa predhodnih padavin IPP₃, IPP₇ in IPP₁₄ kot hidrološkega časovnega merila.



Slika 4.38: Kronološki pregled opazovanih padavinskih dogodkov in vrednosti indeksa predhodnih padavin v letu 2006.

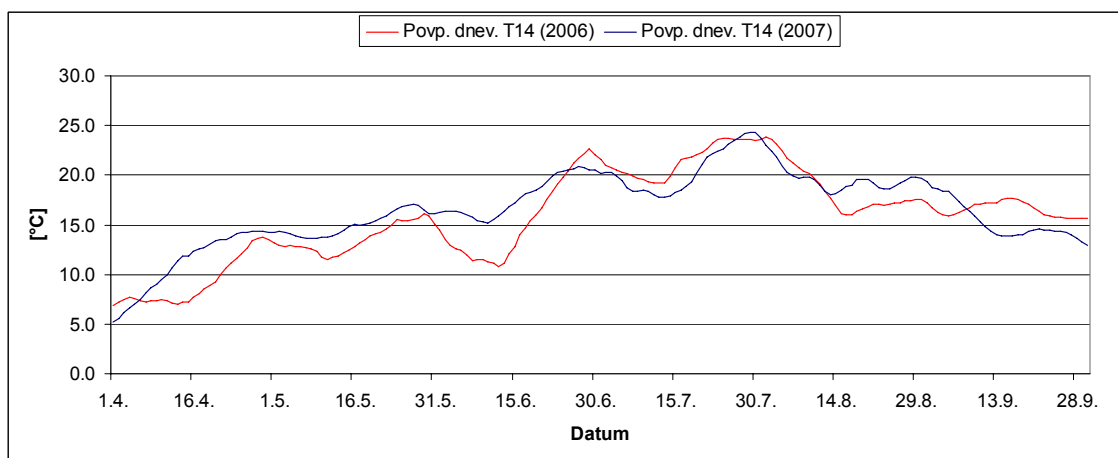
Figure 4.38: Chronologic overview of the observed rainfall events and values of the Antecedent Precipitation Index in 2006.



Slika 4.39: Kronološki pregled opazovanih padavinskih dogodkov in vrednosti indeksa predhodnih padavin v letu 2007.

Figure 4.39: Chronological overview of the observed rainfall events and values of the Antecedent Precipitation Index in 2006.

Primerjava sezonskih razmer v letih 2006 in 2007 z vrednostmi povprečnih dnevni temperatur zraka za obdobja 14 predhodnih dni (T_{14}) je prikazana na sliki 4.40.



Slika 4.40: Primerjava povprečnih dnevni temperatur za obdobje 14 predhodnih dni v letih 2006 in 2007.

Figure 4.40: Comparison of average daily temperatures for the periods of 14 preceding days in 2006 and 2007.

Padavinski dogodek v aprilu leta 2006 ni izkazal povišanja koncentracije nitratnega dušika s spremembo pretočnih razmer, kar smo že utemeljili z nizkimi temperaturami v predhodnem zgodnjepomladanskem obdobju. V letu 2007 je bil april izjemno sušen (skupna mesečna količina padavin je bila zgolj 3,2 mm), prvi padavinski dogodek, ki je sledil temu sušnemu obdobju, je bil padavinski dogodek maj I (slika 4.39). Precej visoke koncentracije nitratnega dušika (4,4 mg/l-N), ki so bile zabeležene v času padavinskega dogodka maj I (slika 4.18),

lahko povežemo s predhodnim toplim obdobjem v letu 2007 s temperaturami T_{14} blizu $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ v primerjavi z istim obdobjem v letu 2006 (T_{14} krepko pod $10\text{ }^{\circ}\text{C}$), kar je verjetno vplivalo na aktiviranje procesov mineralizacije in nitrifikacije v gozdnih tleh že v mesecu aprilu 2007. Obenem pa se potencialna zaloga nitratnega dušika v gozdnih tleh v sušnem obdobju meseca aprila 2007 ni mobilizirala.

Padavinska dogodka konec maja v letu 2006 (padavinski dogodek maj – slika 4.12) in 2007 (padavinski dogodek maj II – slika 4.19) sta se zgodila v precej podobnih predhodnih hidroloških (nizke vrednosti IPP) in temperaturnih (T_{14} 15 do $17\text{ }^{\circ}\text{C}$) razmerah. V enovitem padavinskem dogodku maj v letu 2006 s konico hidrograma $1,52\text{ m}^3/\text{s}$ je koncentracija nitratnega dušika dosegla vrednost $3,6\text{ mg/l-N}$, medtem ko se je v sestavljenem padavinskem dogodku maj II s konico 2. hidrograma $2,76\text{ m}^3/\text{s}$ koncentracija nitratnega dušika povzpela na vrednost $2,9\text{ mg/l-N}$.

Padavinski dogodek, zabeležen v juniju 2007, odraža nekoliko zmanjšano odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremembo pretočnih razmer v vodotoku v primerjavi s padavinskimi dogodki, zabeleženimi v maju 2007, kar lahko navežemo na manjše znižanje temperatur zraka v prvi polovici junija 2007 (slika 4.40) ter verjetnim predhodnim zmanjšanjem zaloge nitratnega dušika v gozdnih tleh kot posledico padavinskih dogodkov v maju.

V letu 2006 je bil mesec avgust s hidrološkega stališča najbolj zanimiv, skupna količina padavin je bila kar 333 mm , posledično je bila spremenljivost koncentracije nitratnega dušika v vodotoku velika. V letu 2007 je bila količina padavin v avgustu precej manjša (166 mm) kot v letu 2006, vendar še vedno precej nad dolgoletno povprečno mesečno količino padavin, ki znaša 109 mm (slika 4.2). Padavinska dogodka, ki sta v teh sicer različnih hidroloških razmerah v avgustu v letih 2006 in 2007 kronološko najbolj primerljiva, sta zadnji zabeležen padavinski dogodek v avgustu leta 2006 (avgust III – slika 4.16) in edini zabeležen padavinski dogodek v avgustu 2007 (slika 4.21). Predhodno obdobje padavinskega dogodka avgust III je bilo zelo namočeno, posledično je bila odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere v primerjavi s predhodnimi padavinskimi dogodki majhna. Koncentracija nitratnega dušika se je v času padavinskega dogodka avgust III s konico

pretoka $1,22 \text{ m}^3/\text{s}$ zvišala z $1,1 \text{ mg/l-N}$ na $2,6 \text{ mg/l-N}$. V padavinskemu dogodku, ki je bil zabeležen v avgustu leta 2007, se je v času 2. hidrograma s konico $1,29 \text{ m}^3/\text{s}$ koncentracija nitratnega dušika zvišala z 1 mg/l-N na $3,5 \text{ mg/l-N}$. Razlika v odzivnosti koncentracije nitratnega dušika na spremenjene hidrološke pogoje ni velika glede na razlikovanje v predhodnih hidroloških razmerah, delno pa jo lahko pripišemo tudi temperaturnim razmeram, saj je bila druga polovica avgusta 2007 toplejša kot enako obdobje v letu 2006.

Glede na opazovano dinamiko koncentracije nitratnega dušika med padavinskimi dogodki v avgustu 2006 lahko sklepamo, da je v predhodnem obdobju – mesecih juniju in juliju 2006, ki sta bila izjemno sušna –, prišlo do precejšnje akumulacije nitratnega dušika v gozdnih tleh. Na sliki 4.40 lahko vidimo, da so bile v obravnavanem obdobju povprečne temperature zraka T_{14} zelo visoke, v celotnem obdobju julija 2006 so se le redko spustile pod $20 \text{ }^\circ\text{C}$. V letu 2007 sta meseca junij in julij manj sušna kot v letu 2006 (sliki 4.38 in 4.39), obenem pa so bile tudi temperature v juliju 2007, z izjemo kratkega obdobja konec julija oz. v začetku avgusta 2007, nižje kot v letu 2006.

Jesenski obdobji v letih 2006 in 2007 se razlikujeta tako z vidika hidroloških pogojev kot tudi z vidika temperaturnih razmer. V letu 2006 je prišlo do izpada celotnega običajnega jesenskega deževnega obdobja. Septembra 2006 je bilo izmerjenih $50,8 \text{ mm}$ padavin, v letu 2007 pa kar $238,8 \text{ mm}$, obenem so bile temperature v septembru 2006 višje kot v enakem obdobju leta 2007 (slika 4.40). Padavinski dogodek v jesenskem obdobju leta 2006 je bil zabeležen v novembru s konico odtoka $2,80 \text{ m}^3/\text{s}$ in je napram ostalim padavinskim dogodkom povzročil ekstremno povišanje koncentracije nitratnega dušika v vodotoku na $14,2 \text{ mg/l-N}$. Precejšen dvig koncentracije nitratnega dušika je glede na skupno količino padavin v predhodnem obdobju (prvi polovici septembra) povzročil tudi padavinski dogodek konec septembra 2007.

4.5.4 Časovna formacija konic hidrogramov in maksimalnih koncentracij nitratnega dušika

Padavinski dogodki pozno spomladi (padavinska dogodka maj in maj–junij v letu 2006 in padavinska dogodka maj I in maj II v letu 2007), poleti (padavinski dogodki avgust I, avgust

II in avgust III v letu 2006 in padavinska dogodka junija in avgusta 2007) in padavinski dogodki jeseni (novembra 2006 in septembra 2007), znotraj katerih je prišlo do intenziviranega spiranja nitratnega dušika s prispevnih površin v vodotok, izkazujejo zanimiv časovni vzorec tvorbe konic hidrogramov v primerjavi s časovno pojavnostjo konic koncentracij nitratnega dušika znotraj posameznih hidrogramov. Pri vseh opazovanih hidrogramih je prišlo do formacije konic hidrogramov prej, kot so bile dosežene maksimalne koncentracije nitratnega dušika v času posameznega hidrograma. V preglednicah 4.3 in 4.4 so za opazovane padavinske dogodke v letu 2006 in 2007 prikazani časi (v urah), ki so potekli od začetka dvigajočih delov hidrogramov do izoblikovanja konic hidrogramov (oznaka T_k), skupaj s časovnimi zamiki (oznaka T_z), s katerimi so se maksimalne koncentracije nitratnega dušika pojavile za konicami hidrogramov odtoka.

Preglednica 4.3: Karakteristični časi T_k v [h] in T_z v [h] za hidrograme opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006.

Table 4.3: Characteristic times T_k in [h] and T_z in [h] for hydrographs in observed rainfall events in 2006.

Padavinski dogodek	Marec	April	Maj	Maj–junij			Avgust I				Avgust II					Avgust III	November
Št.			*	*	2	3	*	2	3	4	*	2	3	4	5	*	2
T_k [h]	7	4	9	3	5	5	3	3	4	9	6	5	2	2	2	7	9
T_z [h]	-	-	3	4	4	12	4	5	6	6	5	7	7	7	11	6	6

Preglednica 4.4: Karakteristični časi T_k v [h] in T_z v [h] za hidrograme opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2007.

Table 4.4: Characteristic times T_k in [h] and T_z in [h] for hydrographs in observed rainfall events in 2007.

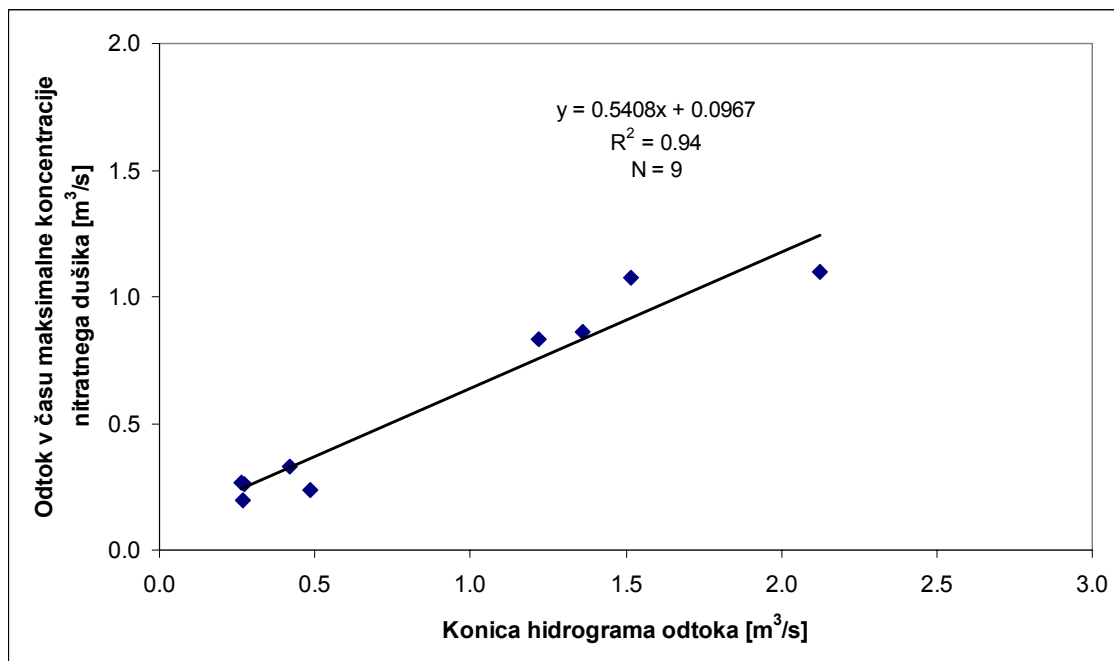
Padavinski dogodek	Maj I			Maj II			Junij	Avgust		September			
Št.	*	2	3	*	2	3	*	*	2	*	2	3	4
T_k [h]	7	6	6	4	3	11	5	5	8	6	8	3	7
T_z [h]	3	5	7	3	4	4	4	5	7	6	6	21	10

Časovni zamik pojava T_z maksimalnih koncentracij nitratnega dušika se giblje od 3 ur pa do 21 ur (3. hidrogram v padavinskem dogodku septembra 2007). Če primerjamo zakasnitvene čase T_z za izbrane prve hidrograme v padavinskih dogodkih v letih 2006 in 2007 (v preglednicah 4.3 in 4.4 označeni z *), ki so povzročili dvig koncentracij nitratnega dušika, z zakasnitvenimi časi sledečih hidrogramov v sestavljenih padavinskih dogodkih, vidimo, da imajo prvi hidrogrami najkrajše zakasnitvene čase. V sosledju hidrogramov sestavljenih padavinskih dogodkov (npr. avgust I in avgust II) se zakasnitveni časi daljšajo. Najdaljši zakasnitveni časi so značilni za hidrograme v katerih so deleži nove vode visoki (zadnji

hidrogram v sestavljenem padavinskem dogodku maj–junij, zadnji trije hidrogrami v sestavljenem padavinskem dogodku avgust II in tretji hidrogram v padavinskem dogodku septembra 2007), kar je povzročilo razredčenje visokih koncentracij nitratnega dušika v času konic hidrogramov.

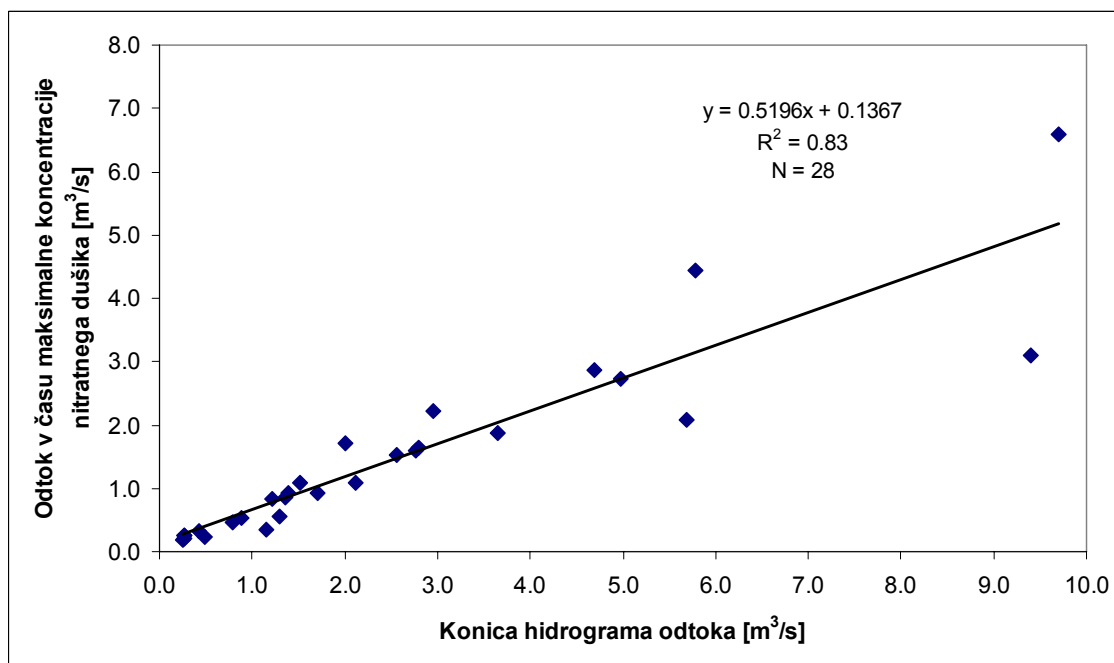
Na sliki 4.41 je prikazana soodvisnost med konicami odtoka in odtokom v času maksimalnih koncentracij nitratnega dušika za izbrane prve hidrograme v padavinskih dogodkih pozno spomladi in poleti (v preglednicah 4.3 in 4.4 označeni z *). Ugotovljena je bila zelo dobra linearna soodvisnost med obema pretokoma ($R^2 = 0,94$). Predhodne hidrološke razmere pred pojavom teh hidrogramov so sicer dokaj podobne (nizke vrednosti indeksa predhodnih padavin), količina padavin, struktura padavinskih dogodkov ter velikost konic odtoka pa so precej različne (preglednici 4.1 in 4.2). Še bolj kot v samih hidroloških karakteristikah pa se opazovani hidrogrami nedvomno razlikujejo v sezonskem biogeokemijskem ozadju, ki uravnava razpoložljivo zalogo nitratnega dušika, ki se lahko s povečanim odtokom s prispevnih površin mobilizira (poglavje 4.5.3).

Soodvisnost med konico hidrograma odtoka in odtokom v času maksimalne koncentracije nitratnega dušika v vodotoku za vse opazovane hidrograme odtoka je prikazana na sliki 4.42. Čeprav se opazovani padavinski dogodki močno razlikujejo tako v hidrološkem smislu (sestava padavinskih dogodkov, predhodna namočenost prispevnega območja) kot tudi v sezonskem biogeokemijskem ozadju (padavinski dogodki v različnih letnih časih), je ugotovljena linearna soodvisnost še vedno dobra ($R^2 = 0,83$). Razlika med napovedanimi vrednostmi odtoka v času maksimalne koncentracije nitratnega dušika na podlagi linearne regresijske premice in opazovanimi odtoki v času maksimalne koncentracije nitratnega dušika se sicer veča z višanjem konic hidrogramov odtoka.



Slika 4.41: Soodvisnost med konico hidrograma odtoka in pretokom v času maksimalne koncentracije nitratnega dušika za izbrane prve hidrograme.

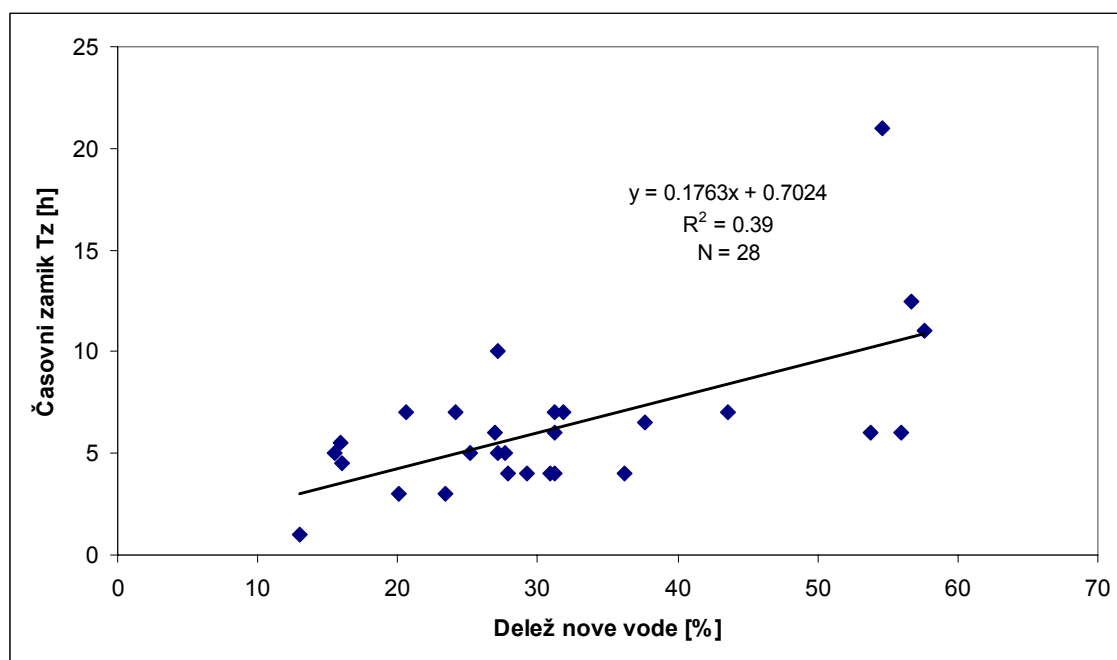
Figure 4.41: Dependence between the hydrograph peak and the discharge at the time of the maximum nitrate concentration for selected first hydrographs.



Slika 4.42: Soodvisnost med konico hidrograma odtoka in pretokom v času maksimalne koncentracije nitratnega dušika za vse opazovane hidrograme.

Figure 4.42: Dependence between the hydrograph peak and the discharge at the time of the maximum nitrate concentration for all observed hydrographs.

Zanimiva, sicer manj izrazita povezava se pokaže, če primerjamo dosežene deleže nove vode v vseh opazovanih hidrogrameh napram časovnim zakasnitvam, s katerimi se konice koncentracije nitratnega dušika v vodotoku pojavijo za konicami hidrograma odtoka (slika 4.43). Razvidno je, da večji delež nove vode v hidrogramu odtoka povzroči daljši zakasnitveni čas maksimalne koncentracije nitratnega dušika za konico hidrograma odtoka. Potreben je torej večji upad odtoka oz. deleža nove vode, preden doseže koncentracija nitratnega dušika v vodotoku najvišje vrednosti.



Slika 4.43: Povezava med deležem nove vode v opazovanih hidrogrameh odtoka in dolžino časovnega zamika nastopa maksimalnih koncentracij nitratnega dušika za konicami hidrogramov odtoka.

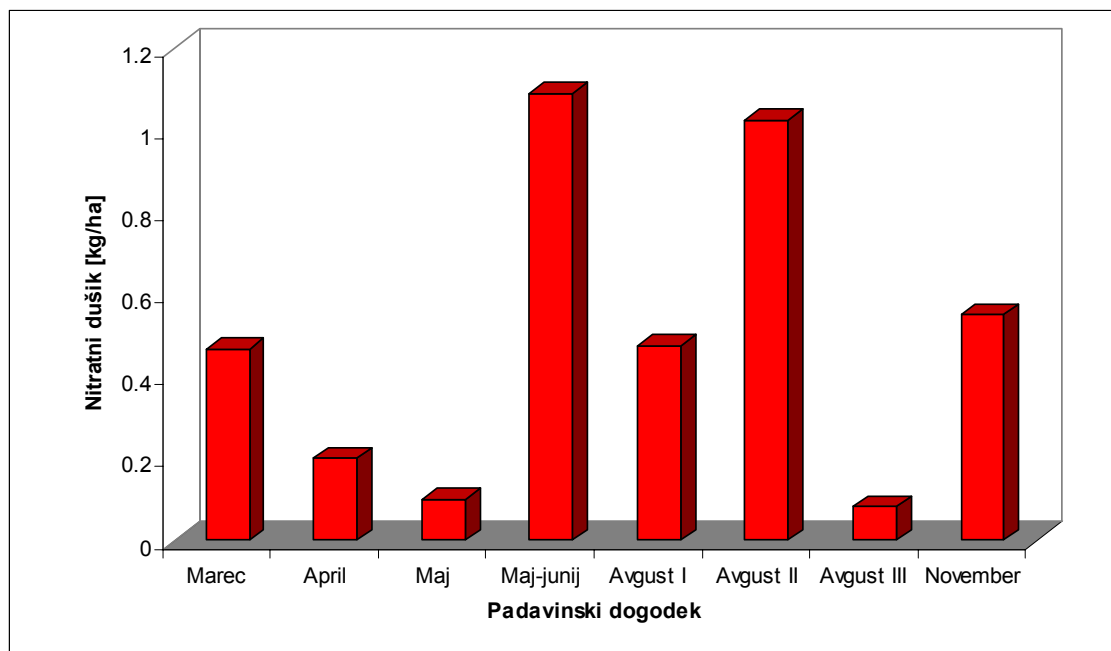
Figure 4.43: Relation between event water proportion in observed hydrographs and the length of the time delay of maximum nitrate concentration occurrence after the hydrograph peaks.

4.5.5 Masna bilanca spranega nitratnega dušika v času opazovanih padavinskih dogodkov

Količine dušika, ki se z odtokom sperejo z gozdnatih prispevnih območij in dejansko predstavljajo izgubo ali presežek hranila za gozdni ekosistem, so zelo različne v odvisnosti od strukture gozda in klimatskih razmer, večinoma pa se gibljejo med 5 in 10 kg-N/ha/leto (Cirno in McDonnell, 1997; Lewis et al., 1999; Binkley et al., 2000; Binkley et al., 2004). Velja poudariti, da so v literaturi večinoma podane vrednosti masne bilance spranega nitratnega dušika, določene na osnovi vzorcev vode v vodotoku, ki so bili odvzeti z daljšimi

časovnimi intervali zajema (ponavadi tedenski odvzem, redkeje kratkotrajne dnevne serije meritev), ob tem pa so vzorčenja večinoma izvedena v obdobjih baznega odtoka. Osnovni namen teh raziskav je opredelitev letnih količin spranega nitratnega dušika z gozdnatih območij ter pridobitev vpogleda v sezonsko spremenljivost razpoložljivega nitratnega dušika. Primerov, ko se je dejansko analiziralo masno bilanco spranega nitratnega dušika znotraj posameznih padavinskih dogodkov, je zelo malo (npr. McHale et al., 2002; Poor in McDonnell, 2007).

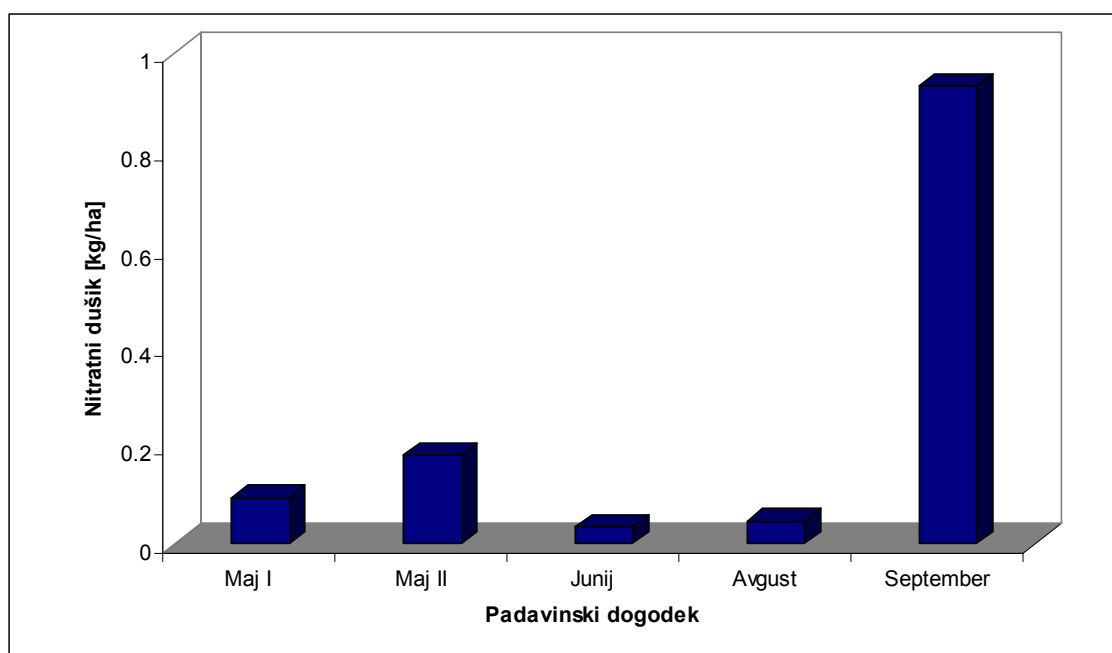
Na sliki 4.44 so prikazane količine nitratnega dušika (v kg/ha), ki so se sprale s prispevnega območja Padeža v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006, na sliki 4.45 pa količine nitratnega dušika (v kg/ha), sprane med padavinskimi dogodki v letu 2007.



Slika 4.44: Masna bilanca nitratnega dušika, spranega s prispevnega območja Padeža v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006.

Figure 4.44: Nitrate mass flux flushed from the Padež stream watershed during the observed rainfall events in 2006.

Količine nitratnega dušika, ki so se po vodotoku sprala s prispevnega območja Padeža v času opazovanih padavinskih dogodkov, so močno spremenljive, saj se opazovani padavinski dogodki razlikujejo tako z vidika hidroloških značilnosti kot tudi sezonskih biogeokemijskih razmer.

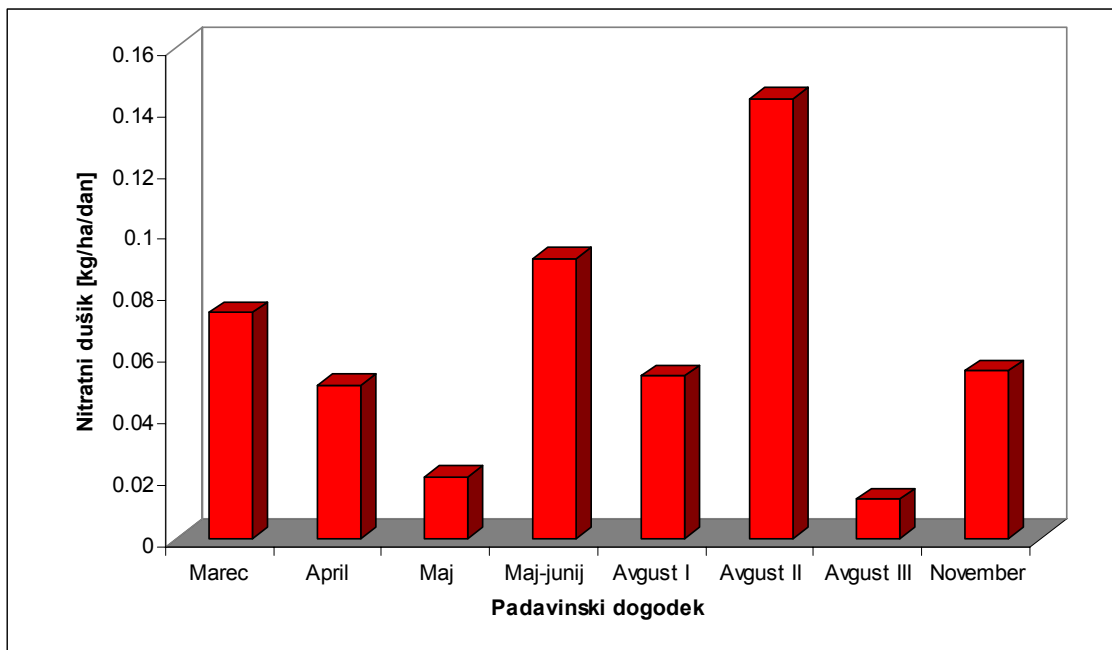


Slika 4.45: Masna bilanca nitratnega dušika, spranega s prispevnega območja Padeža v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2007.

Figure 4.45: Nitrate mass flux flushed from the Padež stream watershed during the observed rainfall events in 2007.

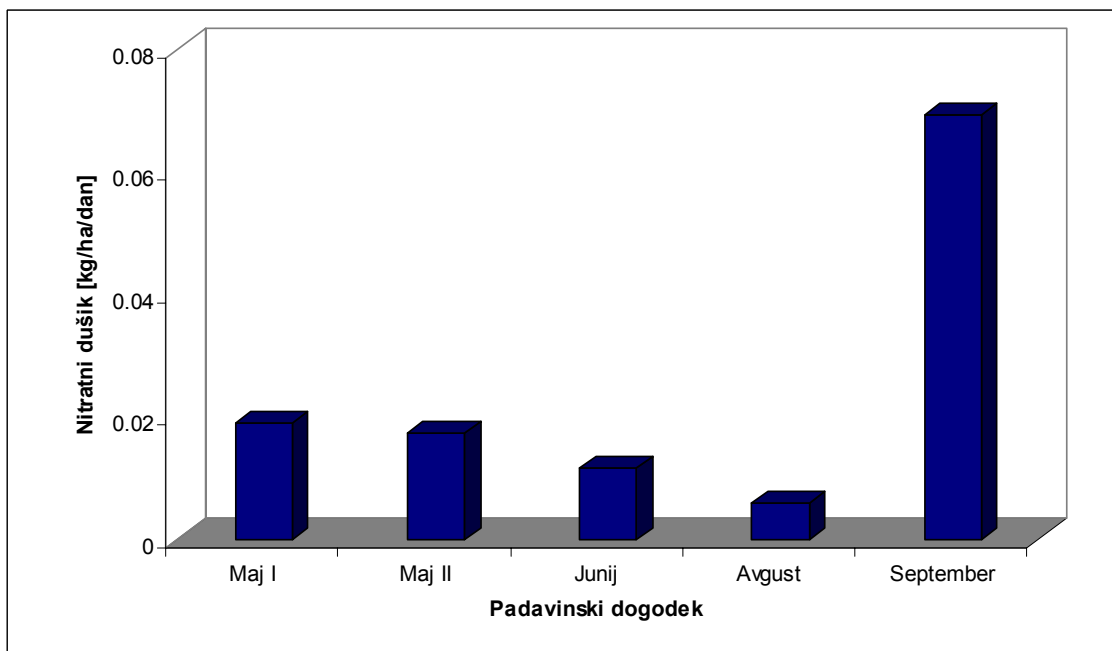
Največja količina nitratnega dušika se je s porečja Padeža v letu 2006 sprala v času dveh padavinskih dogodkov (maj–junij in avgust II), znotraj katerih so bili zabeleženi najvišji pretoki v vodotoku. V letu 2007 se je največja količina s prispevnega območja sprala v času septembrskega padavinskega dogodka. Skupna količina spranega nitratnega dušika v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006 znaša 3,9 kg/ha, v času padavinskih dogodkov leta 2007 pa 1,3 kg/ha.

Primerjava količin spranega nitratnega dušika na enotnem časovnem merilu enega dne je prikazana na slikah 4.46 in 4.47, kjer so podane povprečne dnevne količine spranega nitratnega dušika v obdobjih opazovanih padavinskih dogodkov v letih 2006 in 2007. Najintenzivnejše spiranje nitratnega dušika je potekalo v času padavinskega dogodka avgust II, ko je bila skladno z dolgotrajnejšimi velikimi pretoki v strugi Padeža tudi koncentracija nitratnega dušika visoka.



Slika 4.46: Povprečne dnevne vrednosti količine spranega nitratnega dušika v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006.

Figure 4.46: Average daily values of the nitrate mass flux during the rainfall events in 2006.



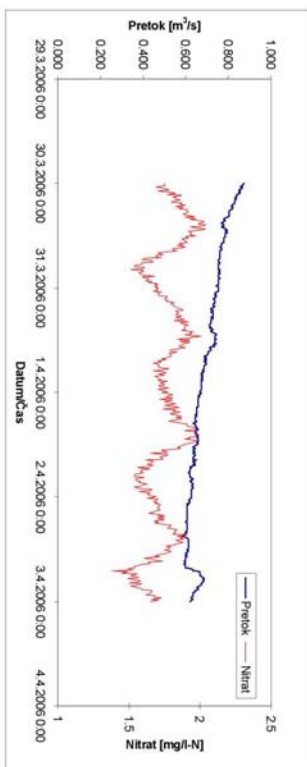
Slika 4.47: Povprečne dnevne vrednosti količine spranega nitratnega dušika v času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2007.

Figure 4.47: Average daily values of the nitrate mass flux during the rainfall events in 2007.

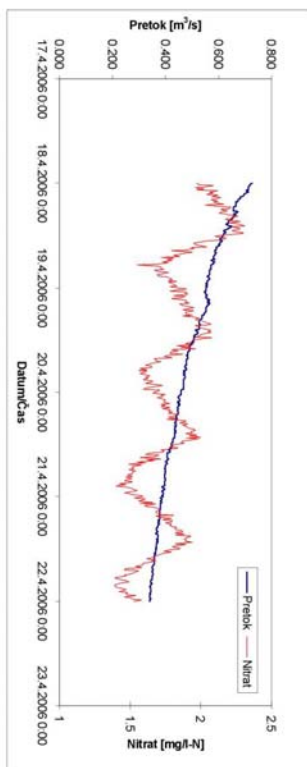
4.6 ČASOVNA SPREMENLJIVOST KONCENTRACIJE NITRATNEGA DUŠIKA V OBDOBJIH BREZ PADAVIN

Obdobja brez padavin so tako s hidrološkega vidika kot z vidika časovne dinamike koncentracije nitratnega dušika na prvi pogled nezanimiva. V teh obdobjih je spremenljivost pretočnih razmer v strugi vodotoka majhna, prav tako pa je napram spremenljivosti v obdobjih padavinskih dogodkov majhna spremenljivost koncentracije nitratnega dušika, ki se večinoma gibljejo med 1 in 2 mg/l-N. Kot je razvidno iz slik 4.48a do 4.48g pa zvezne meritve koncentracije nitratnega dušika v obdobjih brez padavin razkrivajo časovni vzorec spremenljivosti, ki kaže tesno povezanost med vodotokom in biogeokemijskim ozadjem gozdnatih prispevnih površin.

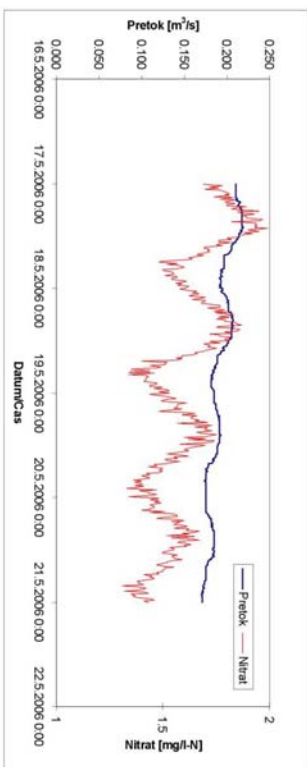
Pronicanje oz. vertikalno izpiranje nitratnega dušika z baznim odtokom ima določen dnevni cikel, kjer se minimalne koncentracije nitratnega dušika tekom posameznega dneva pojavljajo pozno popoldne oz. zgodaj zvečer, maksimalne merjene koncentracije nitratnega dušika pa v jutranjem in dopoldanskem času. Dnevni časovni vzorec koncentracije nitratnega dušika je bil omenjen že pri obravnavi padavinskih dogodkov v zgodnjеспomladanskem času (marca in aprila 2006), ko se je navkljub spremenljivosti pretočnih razmer v vodotoku dnevni časovni vzorec koncentracije nitratnega dušika ohranil. Ob tem amplituda dnevne spremenljivosti koncentracije nitratnega dušika v različnih obdobjih ne ostaja enaka. Na sliki 4.49 so skupno na enotnem poletnem času prikazani odkloni koncentracije nitratnega dušika v opazovanih obdobjih brez padavin od srednjih vrednosti koncentracije, določenih za posamezno mersko obdobje. Največjo amplitudo imajo merjene koncentracije nitratnega dušika v aprilu, medtem ko do najmanjših dnevnih odklonov v koncentraciji pride v poletnem času (junij in julij), ko so bili pretoki v strugi ekstremno nizki. Večja dnevna nihanja v koncentraciji nitratnega dušika v spomladanskem času (konec marca, aprila in maja) lahko navežemo predvsem na dejstvo, da v teh obdobjih že pride do povišanja temperature zraka in vode, hkrati pa je zaradi še nerazvitega vegetacijskega pokrova struga večinoma nezasenčena. V aprilu in začetku maja je bila v strugi ob ugodnih svetlobnih razmerah biološka obrast najintenzivnejša. V poletnem času je struga popolnoma zasenčena, posledično je tudi vpliv aktivnosti biološke obrasti na koncentracijo nitratnega dušika manjši.



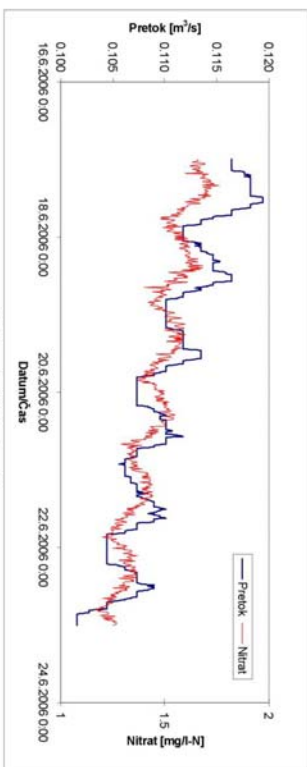
Slika 4.48a: Marec.
Figure 4.48a: March.



Slika 4.48b: April.
Figure 4.48b: April.

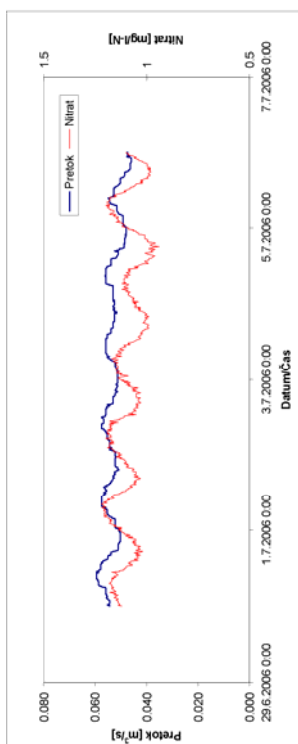


Slika 4.48c: Maj.
Figure 4.48c: May.

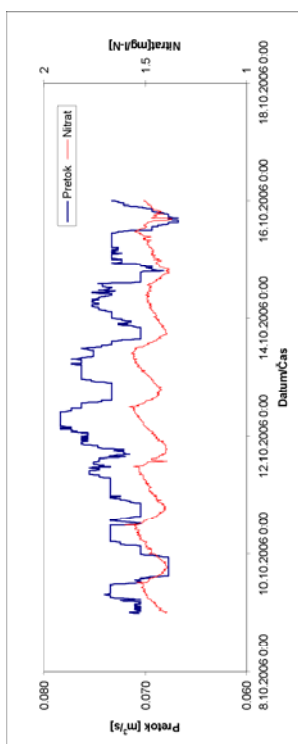


Slika 4.48d: Junij.
Figure 4.48d: June.

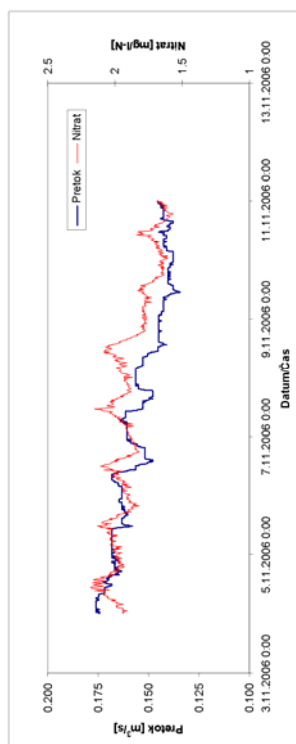
nadaljevanje na naslednji strani;
continued on the next page



Slika 4.48e: Julij.
Figure 4.48e: July.



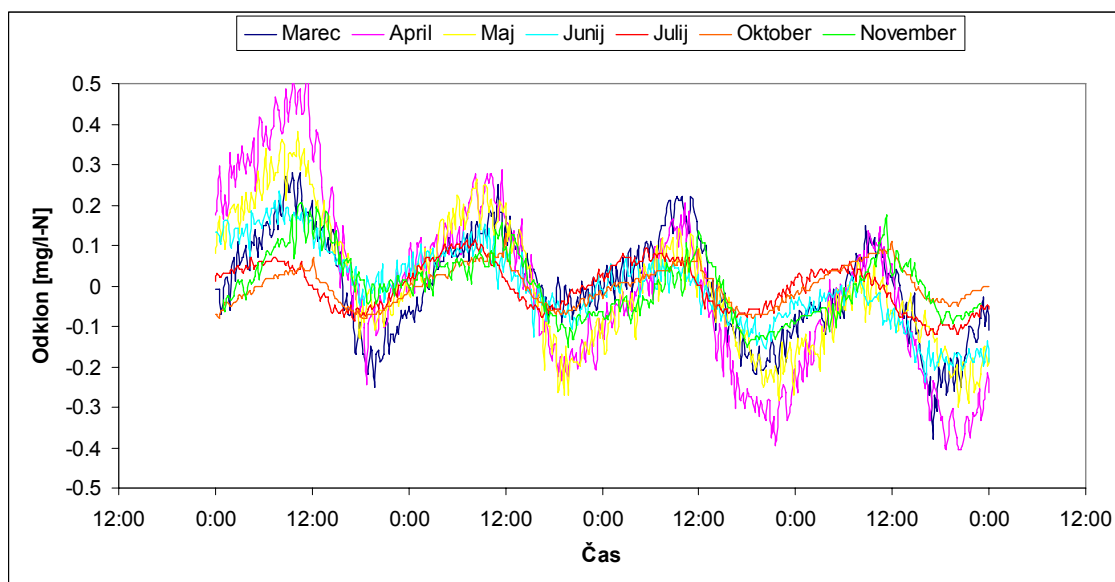
Slika 4.48f: Oktober.
Figure 4.48f: October.



Slika 4.48g: November.
Figure 4.48g: November.

Slika 4.48a – 4.48g: Zvezne meritve koncentracije nitrata dušika v obdobjih brez padavin.
Figure 4.48a – 4.48g: Continuous measurements of the nitrate concentration during the periods without precipitation.

Na dnevni cikel nihanja koncentracije nitratnega dušika ima bistven vpliv poraba hranil s strani gozdne vegetacije ter opažen dnevno-nočni cikel nihanja vodne gladine v strugi kot posledica evapotranspiracije, saj skladno z nihanjem nivoja vodne gladine niha tudi koncentracija nitratnega dušika v vodotoku. Nihanja vodne gladine v strugi so sicer majhna, vendar so te majhne spremembe v nivoju vode v vodotoku lahko odraz precejšnje dnevne spremenljivosti nivoja zasičene cone tal (Cirno in McDonnell, 1997; Ohte et al., 1997; Rushton et al., 2006). V nočnem času je aktivnost vegetacije zmanjšana, manjša je evapotranspiracija, kar omogoča dvig nivoja zasičene cone tal ter s tem intenzivnejše izpiranje nitratnega dušika proti strugi vodotoka.

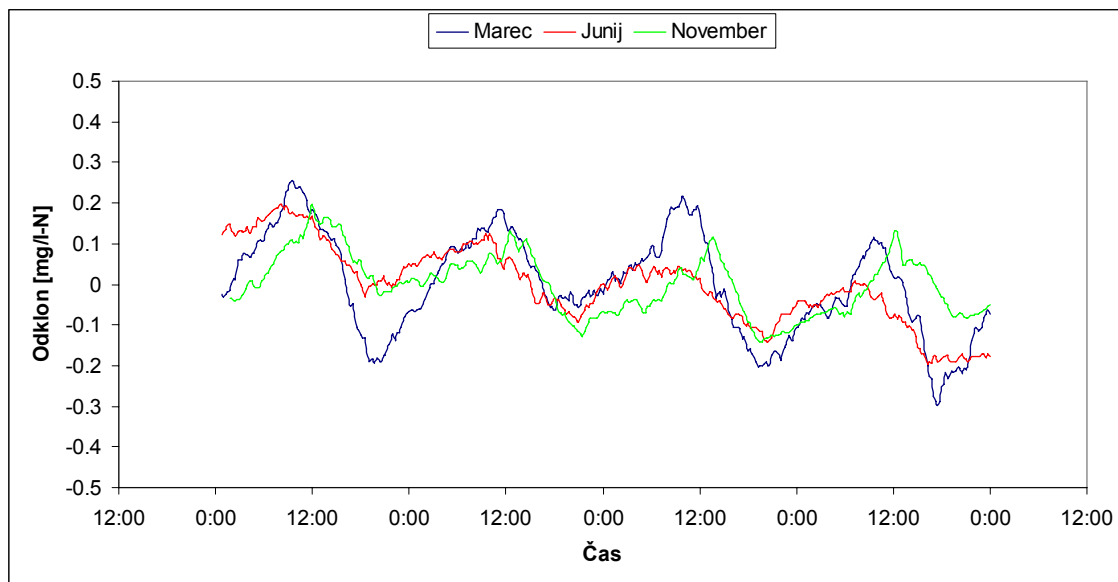


Slika 4.49: Dnevni cikli odklonov koncentracije nitratnega dušika od srednjih vrednosti koncentracije v posameznem merskem obdobju.

Figure 4.49: Daily cycles of the nitrate concentration deviation from the average concentrations defined for a particular period of measurements.

Med posameznimi merskimi obdobji je prišlo do zamikov dnevnih ciklov koncentracije nitratnega dušika. Slika 4.50 prikazuje dnevne cikle odklonov povprečnih urnih koncentracij nitratnega dušika od povprečnih koncentracij v izbranem merskem obdobju za merska obdobja v marcu, juniju in novembru. Minimumi dnevnih ciklov koncentracije nitratnega dušika so se pojavili med 18. in 21. uro, njihov časovni zamik pa je manj izrazit kot v primeru maksimumov dnevnih ciklov. V marcu so se tako maksimumi dnevnih ciklov koncentracije nitratnega dušika pojavili med 10. in 11. uro, v juniju med 7. in 8. uro, v novembru pa med

12. in 13. uro. Časovne zamike dnevnih ciklov koncentracije nitratnega dušika lahko pripišemo spremenljivosti dolžine dneva ter s tem aktivnosti gozdne vegetacije.



Slika 4.50: Dnevni cikli odklonov povprečnih urnih koncentracije nitratnega dušika od srednjih vrednosti koncentracije v posameznem merskem obdobju.

Figure 4.50: Daily cycle of the average hourly nitrate concentration deviation from the average concentrations defined for a particular period of measurements.

5 KONCEPTUALIZACIJA ČASOVNE IN PROSTORSKE DINAMIKE HIDROLOŠKE MOBILIZACIJE NITRATNEGA DUŠIKA S POREČJA

5.1 UVOD

Zvezne meritve koncentracije nitratnega dušika v vodotoku znotraj opazovanih padavinskih dogodkov, predstavljene v 4. poglavju, izražajo veliko kompleksnost odziva gozdnatega prispevnega območja Padeža v smislu variabilnosti koncentracije nitratnega dušika. Odziv prispevnih površin, opazovan skozi zvezno spremljanje koncentracije nitratnega dušika v vodotoku, je posledica delovanja hidroloških kontrolnih mehanizmov, zadolženih za mobilizacijo in transport produktov biogeokemijskih transformacij v sistemu gozdnih tal, ki uravnavajo količino razpoložljive zaloge produktov mineralizacije in nitrifikacije, ki so dejansko na razpolago hidrološkim mobilizacijskim mehanizmom.

Prav v interakciji med hidrološkimi in biogeokemijskimi mehanizmi ter možni časovni ali prostorski prevladi enega mehanizma nad drugim tiči glavni vzrok razhajanj in nejasnosti v opredelitvi vloge hidroloških pogojev pri sproščanju in spiranju nitratnega dušika, navkljub precejšnjemu številu raziskav, ki se s to problematiko ukvarja. Opredelitev in neposredna primerjava ugotovljenih vlog hidroloških dejavnikov med posameznimi raziskavami, ki jih najdemo v literaturi, je s hidrološkega vidika dodatno otežena kot posledica neenakosti opazovanih hidroloških enot, ki navežejo nase prostorsko heterogenost hidroloških, pedoloških, biogeokemijskih ter ostalih značilnosti. Dodaten omejitveni dejavnik v hidrološkem smislu predstavlja opredelitev poti stekanja padavinskega odtoka ter določitev komponent padavinskega odtoka, ki je večinoma mogoča zgolj pri zelo majhnih hidroloških merilih, medtem ko je prostorska ekstrapolacija na večja območja vprašljiva (Blöschl in Sivapalan, 1995; Quinn, 2004).

V naši raziskavi smo se usmerili v spremljanje odzivov prispevnega območja Padeža kot hidrološke in biogeokemijske celote s prevladujočim poudarkom na časovni dinamiki dogajanja. S hidrološkega stališča omogoča enotno prostorsko obravnavo enovita

hidrogeološka podlaga območja, z biogeokemijskega stališča pa prevladujoča raba površin (listnati gozd) ter enovite pedološke karakteristike območja.

Z namenom razumevanja soodvisnosti med hidrološkimi mehanizmi in biogeokemijskimi razmerami, katerih vloga na stopnjo razpoložljivosti, sproščanja, izpiranja in spiranja nitratnega dušika po vodotoku je nestalna in se sezonsko močno spreminja, smo se odločili za konceptualno opredelitev sproščanja nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja. Konceptualna zasnova ponuja praktičen kompromis med hidrološkimi modeli, ki temeljijo na strogih fizikalnih soodvisnostih, ter empiričnimi modeli. Konceptualna opredelitev procesa omogoča po eni strani preverjanje skladnosti opazovanega procesa s poznanimi fizikalnimi zakonitostmi, po drugi pa razumevanje ozadja ugotovljenih empiričnih soodvisnosti (Viney et al., 2000; Sivapalan, 2005).

Konceptualni okvir, predstavljen v nadaljevanju, združuje rezultate lastnih meritev s spoznanji o hidrološko pogojeni dinamiki sproščanja in spiranja nitratnega dušika, ki jih lahko zasledimo v literaturi. V konceptualno opredelitev smo skušali zajeti ugotovljeno časovno dinamiko spiranja nitratnega dušika ter jo z namenom procesne utemeljitve navezati na prostorski vidik dinamike sproščanja nitratnega dušika v tleh. Prostorska dimenzija konceptualnega razumevanja pri tem ni usmerjena v obravnavo pogojev na posameznih mikrohidroloških enotah, ampak je prostorsko proces spremljan s stališča koncepta variabilnih območij zasičenega površinskega odtoka, do katerih pride ob zasičenju profila tal z vodo. Prav tako v okvir konceptualnega razumevanja niso vključeni procesi v strugi vodotoka. Zadrževalni čas odtoka v strugi Padeža je v času padavinskih dogodkov kratek, zato domnevamo, da je vsebnost nitratnega dušika v vodotoku opredeljena v naprej s sezonskim biogeokemijskim ozadjem prispevnih površin preden padavinski odtok dejansko doseže strugo vodotoka.

5.2 SPREMENLJIVOST VSEBNOSTI NITRATNEGA DUŠIKA V GOZDNIH TLEH

V razvitih gozdovih zmernih geografskih širinah se je v gozdnih tleh sposobna akumulirati velika količina organskih in neorganskih dušikovih spojin (Lovett et al., 2000; Goodale, 2002; Fitzhugh et al., 2003). Ob tem veljajo biogeokemijski procesi v tleh za enega glavnih kontrolnih dejavnikov, ki uravnavajo količino zaloge in s tem dostopnost različnih oblik dušikovih spojin gozdni vegetaciji (Beachtold et al., 2003). Do povečanja velikosti zaloge neorganskih oblik dušika v tleh pride, ko stopnja mineralizacije preseže sposobnost flore in favne gozdnih tal ter gozdne vegetacije, da imobilizirajo oz. asimilirajo dodatne količine neorganskega dušika. Te dodatne količine neorganskega dušika v gozdnih tleh predstavljajo presežek neorganskega dušika za gozdni ekosistem in se akumulirajo v sistemu gozdnih tal, dokler hidrološki pogoji ne omogočijo njihove mobilizacije.

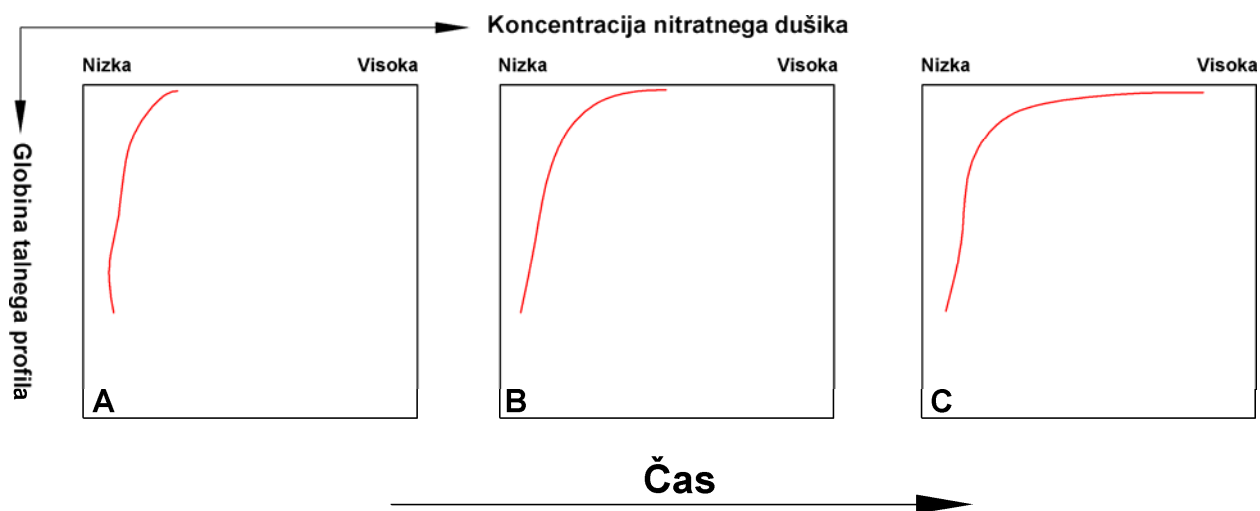
Biogeokemijski procesi, ki skrbijo za pretvorbo dušikovih spojin v tleh, so kompleksni, ob tem pa je pogosto opaženo znižanje vsebnosti dušika z globino tal (Worall in Burt, 1999; Bishop et al., 2004). Lajtha et al. (2004) so za svoje eksperimentalne primere ugotovili, da je v večini primerov upad koncentracije hranil z globino tal eksponenten. Eksponenten upad vsebnosti nitratnega dušika z globino tal je privzet tudi v ekohidrološkem modelu SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Neitsch et al., 2002a, Neitsch et al., 2002b), ki omogoča modeliranje netočkovnega onesnaženja s prispevnih območij s prevladujočo kmetijsko rabo površin.

Akumulacija nitratnega dušika v gozdnih tleh je najverjetnejši biogeokemijski vzrok sprememb v koncentraciji nitratnega dušika v vodotoku v obdobjih opazovanih padavinskih dogodkov, predstavljenih v poglavju 4. Produkti mineralizacije in nitrifikacije se ob odsotnosti hidroloških mehanizmov, ki so sposobni te produkte mobilizirati iz talnega profila proti vodotoku, kopičijo v talnih horizontih. Na sliki 5.1 je prikazan hipotetičen časovni potek akumulacije dušika v talnem profilu gozdnih tal v sušnem obdobju po predhodnem padavinskem dogodku. Predpostavljeno je, da se najvišja vsebnost nitratnega dušika nahaja v plitvih horizontih tal (prehod iz O horizonta v A horizont tal) pod humusnim horizontom tal, v katerem je organska snov večinoma še nerazgrajena. Glede na oznako talnega profila po

klasifikaciji tal WRB 2006 v 3. poglavju imata horizonta, kjer se nalagajo produkti mineralizacije organske snovi, oznako Oa in Ah. Z globino tal se koncentracija nitratnega dušika niža.

Velikost razmerja med celotnim ogljikom in dušikom v gozdnih tleh (C/N razmerje) je pomemben indikator sposobnosti gozdnih tal, da zmanjšujejo oz. povečujejo intenziteto mineralizacije organskih dušikovih spojin v gozdnih tleh ter na ta način regulirajo razpoložljivost teh produktov za hidrološko mobilizacijo v obdobjih padavinskih dogodkov. Visoke vrednosti razmerja C/N kažejo na visoko porabo dušika s strani heterotrofnih organizmov v tleh, na ta način pa je manj dušika razpoložljivega za nadaljnjo mineralizacijo (Lovett et al., 2002).

Vrednost razmerja C/N v pedološkem profilu na Padežu se giblje okoli 18 in se nadalje z globino še nekoliko znižuje (preglednica 3.2), kar je indikator dobre mineralizacije in nitrifikacije organske snovi v horizontih Oa in Ah. Imobilizacijska sposobnost za dušik v gozdnih tleh na porečju Padeža je majhna; glede na opredelitev gozdnatih porečij, ki jo je postavil Gundersen et al., (1998), je posledično lahko potencialno spiranje nitratnega dušika iz talnih horizontov zelo veliko.

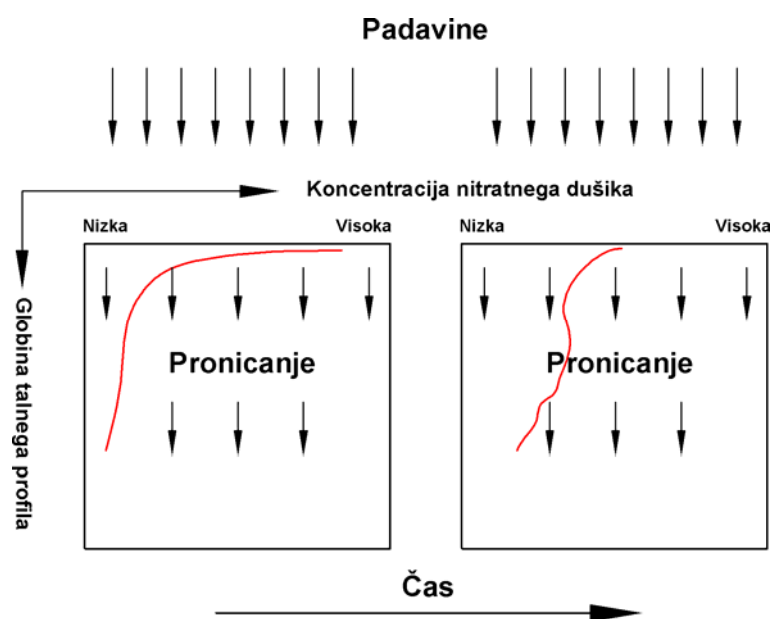


Slika 5.1: Hipotetični prikaz akumulacije nitratnega dušika v profilu gozdnih tal v sušnem obdobju.
Figure 5.1: Hypothetical representation of the nitrate accumulation in the forest floor soil profile during dry period.

Slika 5.1 (A) prikazuje hipotetično porazdelitev koncentracije nitratnega dušika v talnem profilu po pojavu padavinskega dogodka. Koncentracija nitratnega dušika se z globino talnega profila počasi znižuje, vendar razlike med vsebnostjo nitratnega dušika v plitvih in globljih talnih horizontih niso velike. Z daljšanjem sušnega obdobja in odsotnostjo hidroloških mobilizacijskih mehanizmov ter ob primernih temperaturnih in vlažnostnih razmerah se vsebnost nitratnega dušika v plitvih talnih horizontih izrazito poveča (sliki 5.1 (B) in 5.1 (C)). Glede na rezultate terenskih meritev v času padavinskih dogodkov je bilo najbolj intenzivno akumuliranje nitratnega dušika v predhodnem sušnem obdobju pred pojavom padavinskih dogodkov v avgustu ter padavinskega dogodka v novembru leta 2006. Če primerjamo razmere v opazovanih prvih poplavnih valovih (slika 4.24), je zaloga nitratnega dušika v plitvih talnih horizontih v predhodnih sušnih obdobjih naraščala od zgodnjih spomladanskih padavinskih dogodkov (marca in aprila), ko je bila zaloga nitratnega dušika v tleh majhna, proti poletnim padavinskim dogodkom. Prvi hidrogram znotraj padavinskega dogodka avgust I tako izraža najvišjo odzivnost merjene koncentracije nitratnega dušika v vodotoku na spremenjene pretočne razmere v vodotoku.

Zmanjšana odzivnost koncentracije nitratnega dušika v vodotoku na spremenjene pretočne razmere gledano skozi časovno sosledje hidrogramov v sestavljenih padavinskih dogodkih lahko navežemo na počasno zmanjševanje vsebnosti nitratnega dušika v gozdnih tleh ter homogenizacijo koncentracije nitratnega dušika po globini talnega profila. Verjetno se ob ustreznih temperaturnih in vlažnostnih razmerah v tleh intenzivna mineralizacija in nitrifikacija vrši tudi v času med posameznimi hidrogrami znotraj sestavljenih padavinskih dogodkov, kar vpliva na počasnejše zmanjševanje zaloge nitratnega dušika v tleh.

Medtem ko se v predhodnem obdobju prvega hidrograma odtoka sestavljenega padavinskega dogodka izoblikuje porazdelitev koncentracije nitratnega dušika, kakršna je prikazana na sliki 5.1 (C), se skozi sosledje hidrogramov razlike med koncentracijo v plitvih horizontih tal in globljih horizontih tal zmanjšajo pod vplivom pronicajoče padavinske vode (slika 5.2).



Slika 5.2: Hipotetični prikaz spremembe vsebnosti nitratnega dušika v talnem profilu v času padavinskega dogodka.

Figure 5.2: Hypothetical representation of the nitrate concentration changeability in the forest floor soil profile during a rainfall event.

V času prvih hidrogramov odtoka so lahko torej ob hitrem zasičenju celotnega talnega profila s padavinsko vodo iz plitvih talnih horizontov intenzivneje sprosti odtok, ki vsebuje višjo koncentracijo nitratnega dušika, kar povzroči hiter odziv merjenih koncentracij nitratnega dušika v vodotoku na spremenjene pretočne razmere.

5.3 HIDROLOŠKA MOBILIZACIJA NITRATNEGA DUŠIKA NA PROSTORSKEM NIVOJU VARIABILNIH OBMOČIJ ZASIČENEGA POVRŠINSKEGA ODTOKA

V prejšnjem poglavju je opisan koncept časovnega poteka akumulacije nitratnega dušika v talnem profilu ter spremenljivosti koncentracije nitratnega dušika po globini talnega profila v času padavinskih dogodkov. Do intenzivne akumulacije nitratnega dušika v talnem profilu pride ob ustreznem razponu biogeokemijskih razmer (primernih temperaturnih in vlažnostnih razmer v talnem profilu), ki intenzivirajo proces mineralizacije in nitrifikacije, ter ob odsotnosti hidroloških kontrolnih mehanizmov, ki poskrbijo za mobilizacijo nitratnega dušika iz talnega profila proti vodotoku. V nadaljevanju je upoštevano delovanje hidroloških kontrolnih mehanizmov, kakršno je v svoji hipotezi spiranja nitratnega dušika iz talnega profila podal Hornberger et al., (1994). Prostorsko, na nivoju porečja, je proces obravnavan s stališča koncepta variabilnih območij tvorbe zasičenega površinskega odtoka (Creed et al., 1996; Creed in Band, 1998a; Weiler in McDonnell, 2006). Osnovni principi delovanja hidroloških mehanizmov v okviru postavljene hipoteze so predstavljeni v teoretičnem delu naloge (poglavje 2.4.3). Osnovno hipotezo smo morali zaradi specifične hidrološke odzivnosti prispevnega območja Padeža, ki se močno razlikuje od hidroloških razmer, za katere je bila postavljena hipoteza spiranja nitratnega dušika, prilagoditi z upoštevanjem opazovanih odzivov koncentracije nitratnega dušika na spremenjene hidrološke razmere.

5.3.1 Spiranje nitratnega dušika iz talnih horizontov

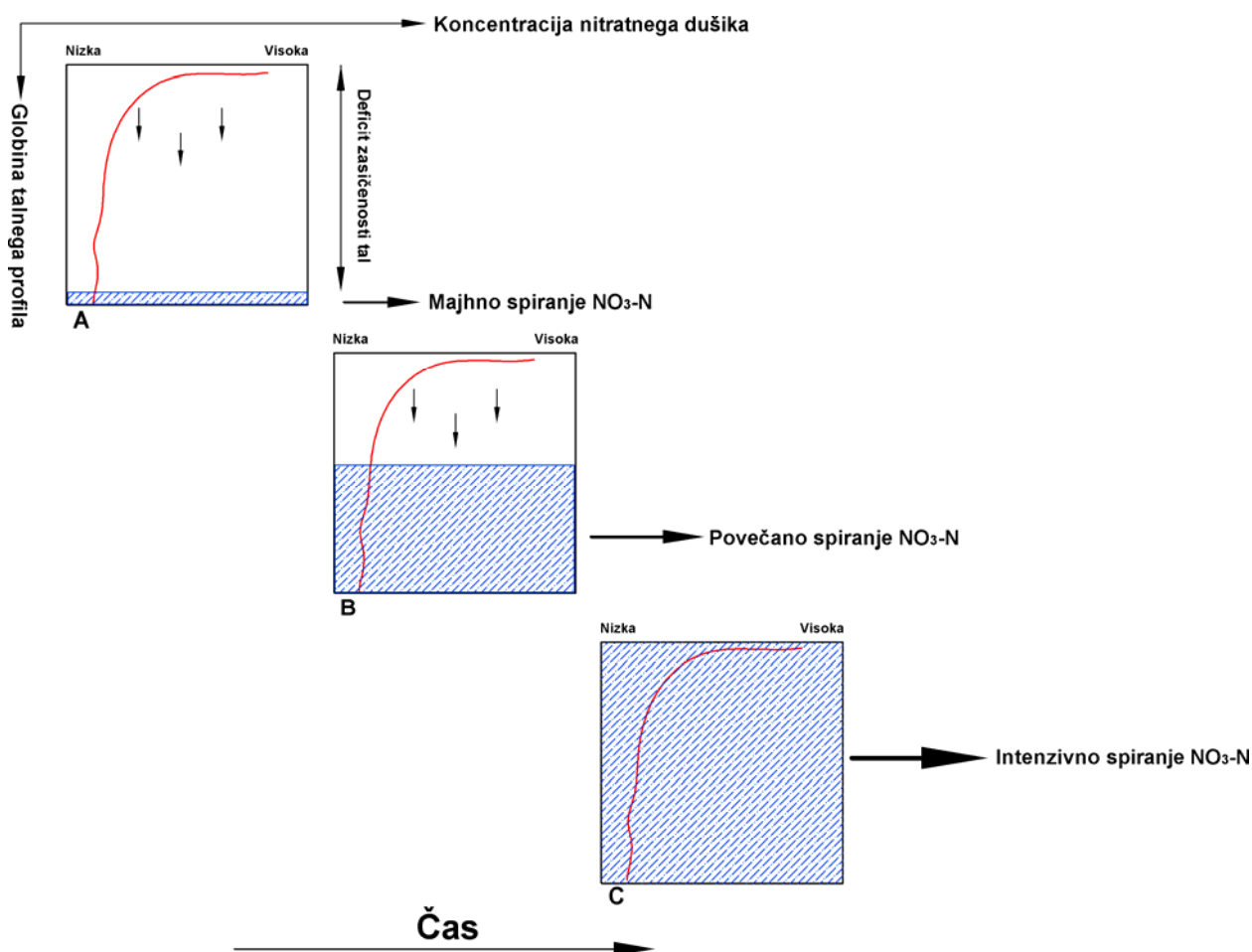
Spiranje nitratnega dušika, akumuliranega v talnih horizontih, se vrši pretežno pod vplivom nihanja v, z vodo zasičeni (saturirani), coni tal (Hornberger et al., 1994; Creed et al., 1996). Shematsko je proces spiranja nitratnega dušika iz talnih horizontov prikazan na sliki 5.3. V sušnih obdobjih se zasičena cona tal nahaja globlje pod površjem tal. Temu primerno je deficit zasičenosti tal, ki je definiran kot globina, na kateri se nahaja zasičena cona pod površjem tal, velik. Ker je vsebnost nitratnega dušika v globokih, z vodo zasičenih talnih horizontih majhna, se v sušnem obdobju spere v vodotok majhna količina nitratnega dušika. Ob primernih pogojih mineralizacije in nitrifikacije se nitratni dušik akumulira v talnih horizontih nad zasičeno cono tal, ki so hidrološko izolirani (slika 5.3 (A)). V času baznega

odtoka se tako izpira majhen del zaloge nitratnega dušika v tleh, ki se nahaja v globljih talnih horizontih z majhno vsebnostjo nitratnega dušika.

Znotraj padavinskega dogodka se začne zasičena cona tal dvigati proti površju tal. Izpiranje in spiranje nitratnega dušika se pospeši pod vplivom pronicanja padavinske vode, ki povzroči vertikalno mobilizacijo zaloge nitratnega dušika v plitvih horizontih gozdnih tal proti zasičeni coni tal. Znotraj zasičene cone tal se nitratni dušik lateralno mobilizira (spira) s padavinskim odtokom proti vodotoku (slika 5.3 (B)). Ključni element mobilizacije nitratnega dušika je v tem obdobju zasičen podpovršinski odtok. V takšnih primerih je lahko pomemben element hitre mobilizacije dušika v še nezasičeni coni tal tudi medtok (Cirimo in McDonnell, 1997), ki se pojavi ob stiku zgornjih talnih horizontov z večjo hidravlično prepustnostjo v vertikalni smeri ter večjo lateralno hidravlično transmisivnostjo z globljimi, hidravlično manj prepustnimi in transmisivnimi talnimi horizonti. Najintenzivnejše spiranje nitratnega dušika iz talnega profila poteka, ko zasičena cona tal doseže površje tal in je z vodo zasičen celoten talni profil. V tem primeru se lateralno spiranje zaloge nitratnega dušika vrši vzdolž celotnega talnega profila (slika 5.3 (C)) s stekanjem zasičenega podpovršinskega toka, povratnega toka ter zasičenega površinskega padavinskega odtoka.

Količino akumuliranega nitratnega dušika v talnih horizontih lahko v kontekstu hipoteze spiranja nitratnega dušika ob ustreznih biogeokemijskih razmerah tako navežemo na frekvenco in amplitudo nihanja zasičene cone tal (Creed in Band, 1998b).

Na prispevnem območju Padeža so tla pretežno meljasta in glinasta (preglednica 3.2), vrednost koeficienta hidravlične prepustnosti je nizka (giblje se med 10^{-5} in 10^{-6} m/s). V času padavinskega dogodka lahko tako pronicajoča padavinska voda hitro zapolni celoten talni profil. Prehod med razmerami, prikazanimi na slikah 5.3 (A) in 5.3 (C), je torej zelo hiter, kar se odraža po eni strani na hitri hidrološki odzivnosti prispevnega območja, po drugi strani pa na hitri reakciji koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere v strugi. Ob tem je verjetnost za tvorbo medtoka v kratkem času, ki je potreben za nasičenje celotnega talnega profila, zelo majhna.



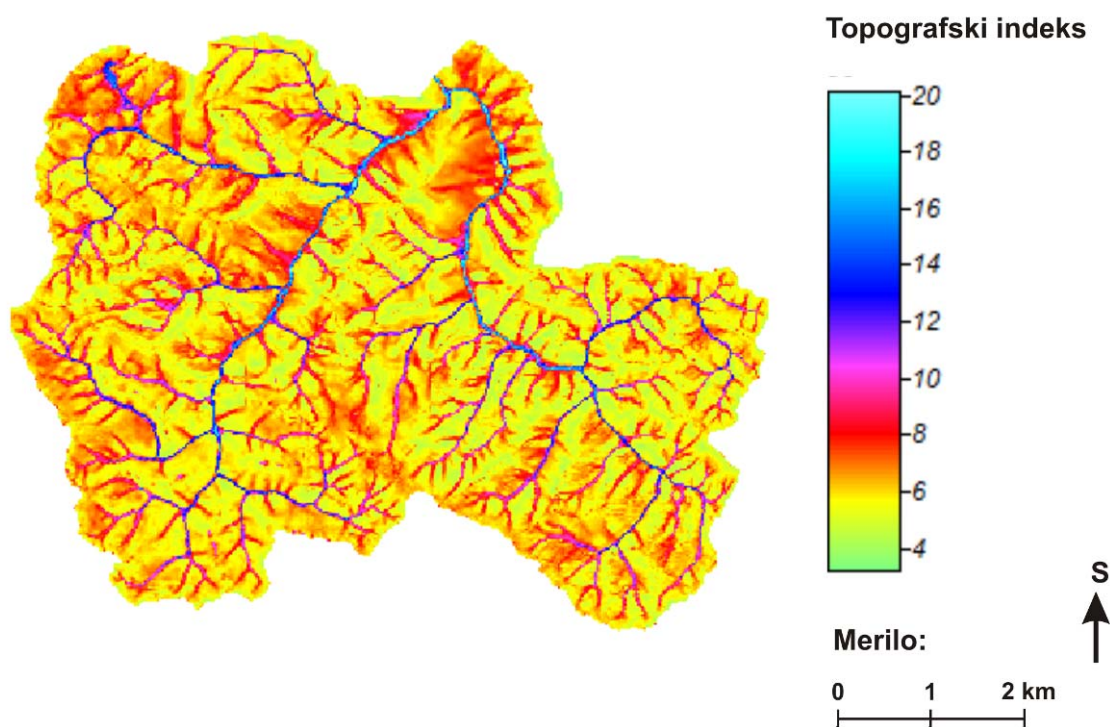
Slika 5.3: Shematski prikaz procesa spiranja nitratnega dušika iz talnih horizontov v času padavinskega dogodka.

Figure 5.3: Schematic representation of nitrate flushing from the soil horizons during a rainfall event.

5.3.2 Regulacija mobilizacije nitratnega dušika preko variabilnih območij zasičenega talnega profila

Spiranje nitratnega dušika iz talnih horizontov preko sprememb v deficitu zasičenosti talnega profila tal lahko s prostorskega nivoja porečja spremljamo preko časovne in prostorske spremenljivosti obsega variabilnih območij zasičenega površinskega odtoka, ki se odvija v času padavinskih dogodkov. Variabilna območja zasičenega površinskega odtoka so območja, na katerih pride do zasičenja celotnega talnega profila. S teh območij torej glede na predlagani koncept spiranja nitratnega dušika, akumuliranega v talnih horizontih, pride do najintenzivnejše mobilizacije nitratnega dušika proti strugi vodotoka.

Časovna in prostorska spremenljivost razsežnosti variabilnih območij zasičenega površinskega odtoka je pogojena s topografskimi karakteristikami prispevnih površin. Topografske karakteristike prispevnih površin se na hidrološke lastnosti najpogosteje naveže preko topografskega indeksa oz. indeksa hidrološke podobnosti (poglavje 2.4.1). Za območja z enako vrednostjo topografskega indeksa se tako predpostavi, da se na padavinski dogodek enako odzovejo. V kontekstu saturiranega deficita tal to pomeni, da imajo ob določenem času območja z enako vrednostjo topografskega indeksa zasičeno cono tal na enaki globini talnega profila. Tla na območjih z visokimi vrednostmi topografskega indeksa so večino časa povsem saturirana (sem lahko prištevamo tudi območje same struge vodotoka) oz. se ob pojavu padavin zelo hitro zasitijo z vodo. Na sliki 5.4 je prikazana prostorska razporeditev vrednosti topografskega indeksa na prispevnem območju Padeža gorvodno od merskega mesta Padež03.

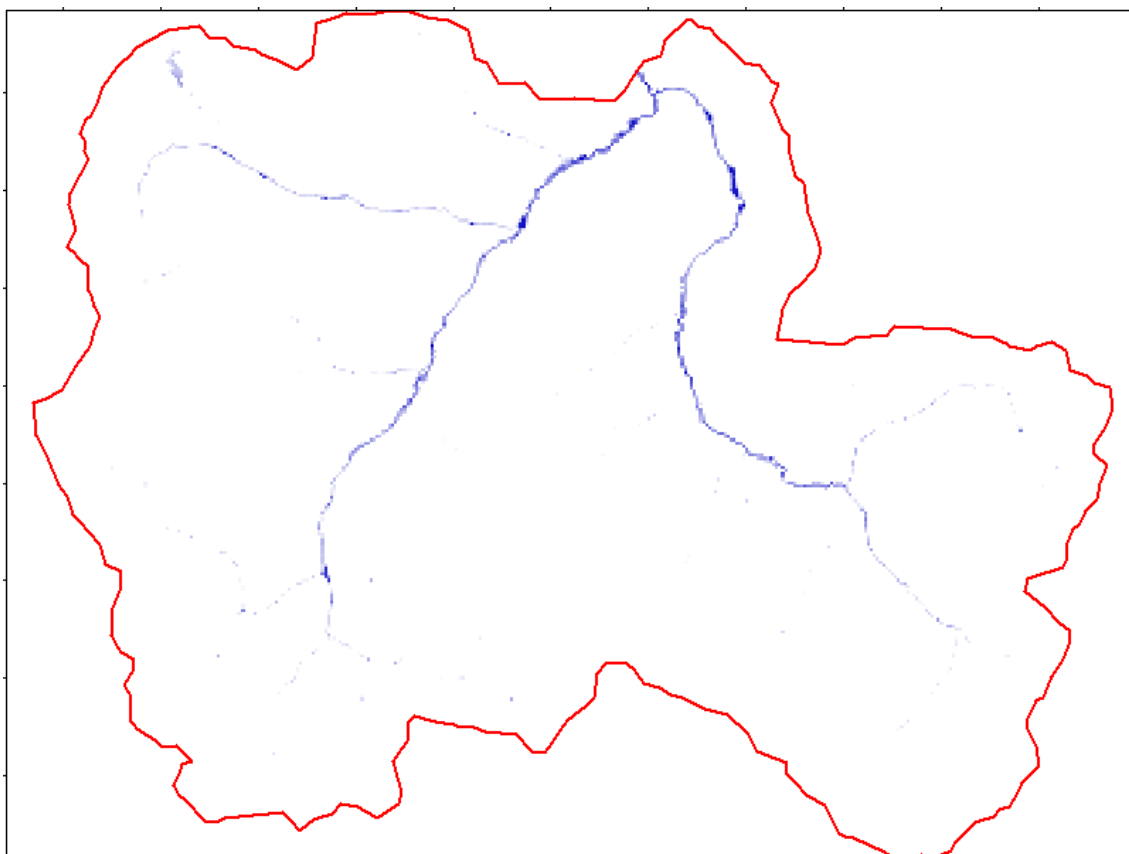


Slika 5.4: Prostorska razporeditev vrednosti topografskega indeksa na prispevnem območju Padeža gorvodno od merskega mesta Padež03.

Figure 5.4: Spatial distribution of the topographic index values on the Padež stream watershed upstream of the limnigraph Padež03.

Najvišje izračunane vrednosti topografskega indeksa se nahajajo na dnu dolin Padeža in Suhorka in znašajo okoli 20, najnižje vrednosti topografskega indeksa okoli 4 so na obronkih gričev. Povprečna vrednost topografskega indeksa za obravnavano območje znaša 6,42, standardni odklon je 1,81.

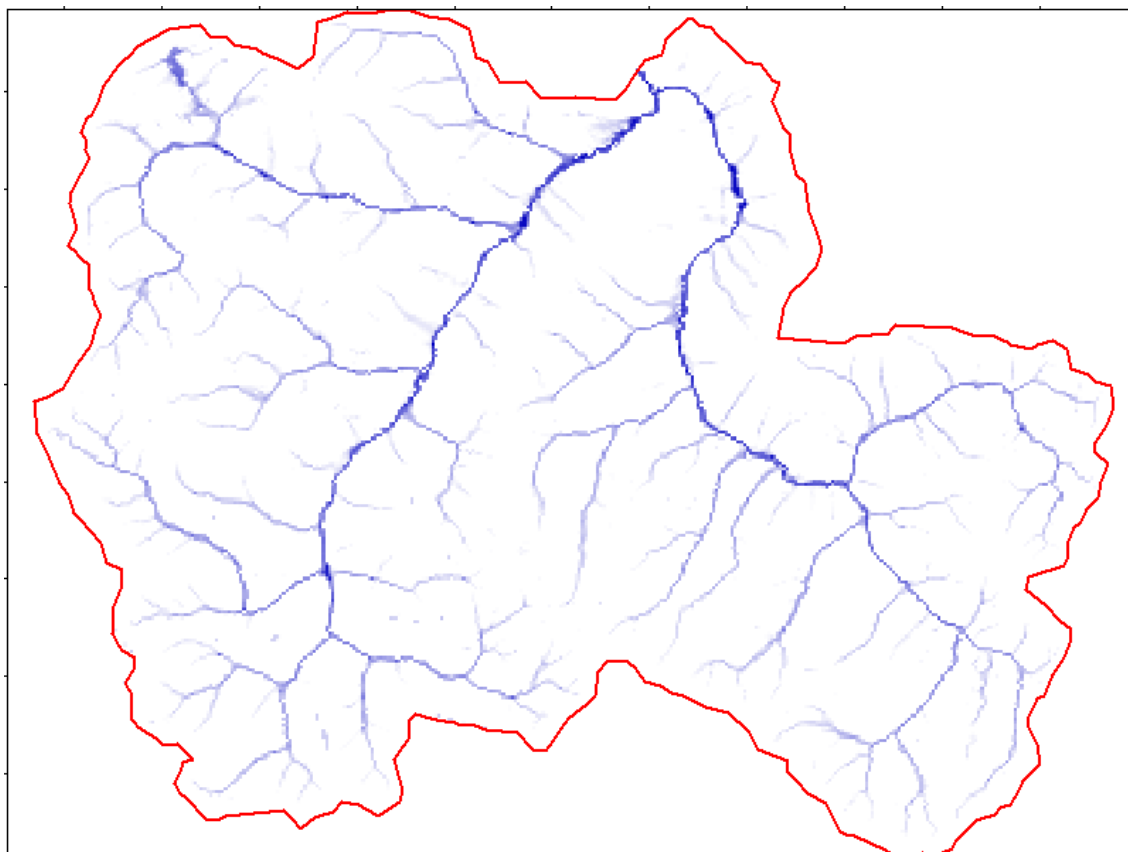
Na sliki 5.5 je prikazan hipotetičen primer prostorske razsežnosti zasičenih območij znotraj obravnavanega prispevnega območja v sušnih obdobjih, ki zajema zgolj najnižje predele obeh glavnih dolin oz. glavni strugi obeh potokov. Območja zasičenega talnega profila so obarvana modro. Površinski odtok je prisoten zgolj v obeh glavnih potokih, Suhorki in Padežu, večina preostalih manjših pretokov povsem presahne. V obdobjih takšne razsežnosti zasičenih območij je mobilizacija nitratnega dušika s porečja majhna.



Slika 5.5: Hipotetičen primer prostorske razsežnosti zasičenih območij znotraj obravnavanega prispevnega območja v sušnih obdobjih.

Figure 5.5: Hypothetical example of the spatial extension of the saturated areas inside the studied watershed during dry periods.

V času padavinskih dogodkov se začnejo zasičena območja širiti na preostala, nižje ležeča območja glavnih dolin ter po dolinah manjših pritokov (slika 5.6). V obdobjih take prostorske razsežnosti zasičenih območij je spiranje nitratnega dušika s porečja intenzivirano.



Slika 5.6: Hipotetičen primer prostorske razsežnosti zasičenih območij znotraj obravnavanega prispevnega območja v obdobjih padavinskih dogodkov.

Figure 5.6: Hypothetical example of the spatial extension of the saturated areas inside the studied watershed during the periods of rainfall events.

McGlynn in McDonnell (2003) sta proučevala vpliv diskretnih topografskih enot na dinamiko kroženja hranil v gozdu. Njuna hipoteza je bila, da riparijska območja v času padavinskih dogodkov lahko predstavljajo pomemben vir hranil, ki se potencialno mobilizira v vodotok. Spiranje nitratnega dušika na nivoju prispevnega območja je močno pogojeno s prostorsko in časovno vlogo riparijskih območij kot območij zasičenega talnega profila. Ob tem je z vidika dinamike spiranja nitratnega dušika s prispevnih površin bolj kot dejanska skupna prostorska razsežnost zasičenih območij ključnega pomena časovna spremenljivost razsežnosti zasičenega riparijskega območja. Prispevna območja z večjo časovno lateralno spremenljivostjo razsežnosti variabilnih zasičenih območij znotraj padavinskih dogodkov

imajo daljši čas spiranja nitratnega dušika proti vodotoku, temu primerno je tudi količina spranega nitratnega dušika večja kot s prispevnih površin, kjer je časovna lateralna spremenljivost razsežnosti zasičenih območij majhna (Creed in Band, 1998a).

Na prispevnem območju Padeža je hidrografska mreža gosta ($1,94 \text{ km/km}^2$), površinski vodni tokovi so v hribinsko osnovo vrezali globoka in večinoma ozka dolinska območja. V sušnih obdobjih se površinski vodni tokovi pojavljajo predvsem v obeh glavnih dolinah Padeža in Suhorke, večina ostalih manjših pritokov kmalu po padavinskih dogodkih povsem presahne. V sušnih obdobjih je tako večina prispevnega območja hidrološko nepovezana z osrednjimi dolinskimi predeli (slika 5.5). Kmalu po začetku padavinskih dogodkov se hidrološka povezanost v sušnih obdobjih izoliranih prispevnih površin znova zelo hitro vzpostavi ob nasičenju pretežno meljastega talnega profila z dotekajočo padavinsko vodo. Lateralna širitev zasičenih dolinskih predelov je lahko precejšnja in poteka hitro (slika 5.6), posledica pa so, v skladu z ugotovitvami Creeda in Banda (1998a), podaljšani časi spiranja nitratnega dušika ter velike količine nitratnega dušika, ki se spere v času padavinskih dogodkov. Mehanizem dreniranja oz. vertikalnega izpiranja nitratnega dušika, kakršnega je predlagal Creed et al. (1996), povzroča počasno mobilizacijo nitratnega dušika v globlje talne horizonte. Ta bi bil lahko odgovoren za spiranje nitratnega dušika v obdobjih brez padavin, torej v času baznega odtoka.

Prisotnost mehanizma, ki ima sposobnost reguliranja spiranja nitratnega dušika preko hidroloških in sezonskih biogeokemijskih kontrolnih mehanizmov v posameznem padavinskem dogodku, nakazuje časovna razporeditev konic hidrograma odtoka napram maksimalnim koncentracijam nitratnega dušika v posameznem padavinskem dogodku (slike 4.41, 4.42 in 4.43). V kontekstu variabilnih območij zasičenega talnega profila lahko specifično časovno razporeditev konic odtoka in koncentracije nitratnega dušika pripišemo topografskim karakteristikam prispevnega območja, ki regulirajo časovno lateralno spremenljivost razsežnosti območij zasičenega talnega profila.

Z vidika hipoteze spiranja nitratnega dušika (Hornberger et al., 1994) je mehanizem spiranja iz zasičenega talnega profila lahko prepoznan, vendar je za osnovno hipotezo značilna pojavnost maksimalnih koncentracij spranega nitratnega dušika v vodotoku pred konicami

hidrograma odtoka (Hornberger et al. 1994; Creed et al., 1996). Mehanizem spiranja nitratnega dušika je bil ugotovljen in preverjen na prispevnih območjih (npr. Creed in Band, 1998a; Creed in Band, 1998b; McHale et al., 2002; Inamdar et al., 2004), kjer imajo tla precej večjo hidravlično prepustnost kot tla na prispevnem območju Padeža. V teh primerih lahko pronicajoč padavinski odtok v zgodnih fazah padavinskih dogodkov iz talnih horizontov iztisne v vodotok talno vodo z veliko vsebnostjo nitratnega dušika. Posledično se konica koncentracije nitratnega dušika pojavi pred konico hidrograma odtoka.

V primeru Padeža gre za učinek nekakšnega podaljšanega spiranja nitratnega dušika, ob čemer se maksimalne koncentracije pojavijo z določeno časovno zakasnitvijo za konico hidrograma odtoka. V času dvigajočih delov hidrogramov pride do nasičenja talnih profilov v dolinskih predelih ter s tem povezane širitve variabilnih zasičenih območij. Skladno s širitvijo variabilnih zasičenih območij se intenzivira spiranje nitratnega dušika, kar se odraža na povišanju koncentracije nitratnega dušika vodotoku. V obdobjih konic hidrograma odtoka je prostorska razsežnost variabilnih zasičenih območij največja, najvišji so tudi deleži nove vode, ki doseže vodotok brez izrazitejšega kontakta z biogeokemijskim okoljem gozdnih tal, vendar konične koncentracije nitratnega dušika ob tem še niso dosežene. Do maksimalnih koncentracij nitratnega dušika v vodotoku pride, ko celoten odtok nekoliko upade (sliki 4.41 in 4.42), upade tudi delež nove vode (slika 4.43), območja zasičenega talnega profila se začnejo počasi krčiti, ob tem pa ostaja mobilizirana zaloga nitratnega dušika v gozdnih tleh še vedno velika, kar nakazuje tudi počasen upad koncentracije nitratnega dušika z upadajočim pretokom v padajočih delih hidrogramov. Ob višjih deležih nove vode (nad 40 %) se koncentracija nitratnega dušika v vodotoku celo nekoliko zniža, zakasnitveni čas maksimalnih koncentracij nitratnega dušika za konicami hidrogramov odtoka pa se podaljša.

Velikost zaloge nitratnega dušika v gozdnih tleh na porečju Padeža v poletnem in jesenskem času očitno presega takojšnjo zmožnost hidroloških mehanizmov, da akumulirani nitratni dušik sperejo v vodotok.

5.3.3 Potencialni viri nitratnega dušika, mobiliziranega preko tvorbe variabilnih območij zasičenega talnega profila

Povprečna koncentracija nitratnega dušika v Padežu 1,5 mg/l-N, določena na podlagi laboratorijskih vzorcev, odvzetih v obdobjih baznega odtoka, je povišana glede na podatke o povprečnih letnih koncentracijah v odtoku z gozdnatih prispevnih površin iz literature, ki se pogosto gibljejo tudi precej pod 1 mg/l-N. Ob tem je treba poudariti, da se večina podatkov o povprečnih letnih koncentracijah, najdenih v literaturi, nanaša na gozdnata prispevna območja vodotokov v povirnih delih porečij z visokimi nadmorskimi višinami ter specifičnimi klimatskimi in pedološkimi pogoji (Likens in Bormann, 1995; Arheimer et al., 1996; Hood et al., 2003; Sickman et al., 2003), ki večinoma pomenijo omejitvene dejavnike biogeokemijskih transformacij v gozdnih tleh. Pomemben hidrološki element mobilizacije nitratnega dušika na teh območjih je tajanje snežne odeje v spomladanskem času, ko so večinoma tudi opažene najvišje koncentracije nitratnega dušika v vodotoku. V primeru Padeža tajanje snežne odeje nima bistvenega vpliva na dinamiko mobilizacije nitratnega dušika. Raziskave, ki jih lahko najdemo v literaturi, večinoma niso usmerjene v spremljanje vloge posameznih padavinskih dogodkov pri mobilizaciji nitratnega dušika, ampak bolj v njeno sezonsko spremenljivost.

Binkley et al. (2004) podaja podroben pregled nad povprečnimi letnimi koncentracijami nitratnega dušika v več kot 300 vodotokih z gozdnatimi prispevnimi površinami na območju ZDA. Povprečna koncentracija je znašala 0,31 mg/l, razpon vrednosti je bil od 0 do skoraj 3 mg/l. Glavne razlike v koncentracijah izhajajo iz geografskega položaja in sestave gozdne vegetacije. V vodotokih, ki drenirajo prispevna območja, prekrita z listnatim gozdom, so bile ugotovljene 2- do 3-krat višje koncentracije kot v vodotokih, katerih porečja prekriva iglasti gozd.

Spremenljivost zaloge dušika v gozdnih tleh je lahko zelo velika v odvisnosti od temperaturnih, vlažnostnih razmer, pedoloških značilnosti tal in sestave gozdne vegetacije (Reich et al., 1997; Wang in Fernandez, 1999). Hackl et al. (2004) je ugotovil veliko variabilnost v vsebnosti dušika ter intenziteti procesov transformacije dušika v gozdnih tleh v odvisnosti od vsebnosti vode v tleh in sestave gozda; nekateri gozdni sestoji so imeli podobno sestavo (prevladovanje bukve in hrasta), kot jo lahko najdemo na porečju Padeža.

Večino prispevnega območja Padeža prekriva listnati gozd, ki se nahaja na več kot 80 % površin. Nižja pobočna in dolinska riparijska območja so z listnatim gozdom skoraj v celoti prekrita. Najbolj razširjena drevesna vrsta na teh območjih je črna jelša, ki je znana zaradi svojega simbiotskega razmerja z bakterijo *Frankia alni*, ki ima sposobnost fiksacije atmosferskega dušika (Cote in Camire, 2005). Vnos dušika v vodotoke, ki drenirajo gozdnate prispevne površine, na katerih so prisotne različne vrste jelše, se lahko vrši na različne načine (Compton et al., 2003):

- direktnim vnosom partikularne organske snovi z opadom listja in ostalih drevesnih delov v vodotok;
- pronicanjem topnih oblik dušikovih spojin v hiporeični coni ter talni in podtalni vodi z riparijskih območij;
- lateralnim transportom raztopljenih oblik dušikovih spojin s širših prispevnih območij, ki jih porašča pretežno jelša.

Skladno s predlaganim konceptom spiranja nitratnega dušika s širitvijo območij zasičenega talnega profila so prav riparijska območja hidrološko najbolj aktivna in v njih prihaja do najintenzivnejših oscilacij v nivoju saturirane cone tal. Dodatne količine dušika, ki se vnašajo v tla preko omenjenega simbiotskega razmerja, so ob ustreznih pogojih za potek procesov mineralizacije in nitrifikacije lahko pomemben dejavnik, ki vpliva na veliko zalogo nitratnega dušika v tleh ter razpoložljivost nitratnega dušika za hidrološko mobilizacijo v padavinskih dogodkih. Zaloga nitratnega dušika v gozdnih tleh se je izkazala za veliko v primeru pozno spomladanskih (maja in junija), poletnih (nizi padavinskih dogodkov v avgustu) ter še posebej v primeru jesenskega padavinskega dogodka v novembru, ko so bile predhodne temperaturne in vlažnostne razmere primerne za intenziven potek procesov mineralizacije in nitrifikacije. Zaradi zelo hitre hidrološke odzivnosti prispevnega območja Padeža je potencialna vloga riparijskih območij pri odstranjevanju produktov mineralizacije in nitrifikacije preko denitrifikacije (Cirno in McDonnell, 1997) zelo majhna. Riparijska območja tako najverjetneje delujejo izključno kot dodaten vir in ne kot potencialni ponor nitratnega dušika. Padavinski dogodki v zgodnjepomladanskem času (marec in april) niso bistveno vplivali na dnevno dinamiko koncentracije nitratnega dušika v strugi Padeža. Omejeno vlogo hidroloških mobilizacijskih mehanizmov v teh dveh primerih lahko pripišemo nizkim temperaturam v

predhodnih obdobjih (preglednica 4.1), ki so zavirale biogeokemijske procese proizvodnje nitratnega dušika v gozdnih tleh. Nizke temperature v zimskem času ne omogočajo produkcije nitratnega dušika v gozdnih tleh, zaradi tega pride ob padavinah v zimskem času do konstantnega zmanjševanja zaloge nitratnega dušika v gozdnih tleh od jesenskih pa vse do zgodnjih spomladanskih padavinskih dogodkov. Posledično je odzivnost koncentracije nitratnega dušika v vodotoku na spremenjene hidrološke razmere majhna.

Opazovani padavinski dogodki, predstavljeni v 4. poglavju, nakazujejo na primanjkljaj zaloge nitratnega dušika, ki je razpoložljiva za hidrološko mobilizacijo v primeru obeh padavinskih dogodkov v zgodnjеспomladanskem času (marec in april) ter v primeru zadnjega opazovanega padavinskega dogodka v avgustu (avgust III). Ta obdobja lahko označimo kot obdobja majhne zaloge nitratnega dušika, medtem ko lahko ostala obdobja, ko se je koncentracija nitratnega dušika intenzivno odzvala na spremenjene hidrološke razmere, označimo kot obdobja primanjkljaja hidroloških mobilizacijskih mehanizmov. Njihova sposobnost spiranja nitratnega dušika v vodotok presega velikost zaloge nitratnega dušika v biogeokemijskem okolju gozdnih tal.

6 RAZVOJ MODELA

6.1 UVOD

Z zveznimi meritvami kemizma vode v potoku Padež (koncentracije nitratnega dušika, elektroprevodnosti vode), hidroloških pogojev (količine in razporeditve padavin, odtoka vode s porečja) ter meteoroloških dejavnikov (temperature zraka) v letih 2006 in 2007, ki so podrobno predstavljene v 4. poglavju, smo pridobili obsežno bazo podatkov. Na tej osnovi smo lahko opredelili vpliv posameznih padavinskih dogodkov na intenziteto spiranja nitratnega dušika s prispevnega območja Padeža v različnih sezonskih okvirih. Rezultati meritev kažejo veliko kompleksnost medsebojnega vzajemnega delovanja hidroloških in sezonskih biogeokemijskih kontrol, ki uravnavajo časovno dinamiko sproščanja nitratnega dušika s prispevnih površin Padeža. S konceptualnim modelom spiranja nitratnega dušika s prispevnega območja, predstavljenim v 5. poglavju, smo na podlagi lastnih meritev ter spoznanj iz literature procesno uokvirili in utemeljili opazovano vzajemno delovanje hidroloških in biogeokemijskih kontrol z vidika časovne in prostorske dinamike.

Zvezno spremljanje meteoroloških, hidroloških razmer ter kemizma vode, kakršno smo izvajali na prispevnem območju Padeža v letih 2006 in 2007, zahteva veliko materialnih sredstev ter terenskega dela in hkrati predstavlja osrednji del naše naloge. V literaturi najdemo le nekatera eksperimentalna porečja, kjer se hkratni hidrometeorološki in biogeokemijski monitoring izvaja več let ali celo desetletij (npr. eksperimentalno porečje Hubbard Brook (Likens in Boremann, 1995) ali eksperimentalno porečje na območju Catskill Mountains (Lovett et al., 2000)), kar omogoča celosten vpogled v sezonsko spremenljivost delovanja gozdnega ekosistema v smislu bilance spranega nitratnega dušika. V našem primeru je zaradi sorazmerno kratkega obdobja opazovanj (približno 2 leti) ter visoke časovne frekvence meritev poudarek predvsem na kratkotrajni spremenljivosti mobilizacije nitratnega dušika pod vplivom padavinskih dogodkov, na podlagi katere pa smo pridobili vpogled tudi v sezonsko spremenljivost intenzitete spiranja nitratnega dušika s prispevnega območja.

Poraja se vprašanje v kolikšni meri lahko spoznanja o hidrološkem in biogeokemijskem dogajanju v letu 2006 in 2007 na osnovi lastnih meritev služijo za razumevanje spiranja nitratnega dušika na različnih časovnih merilih. Pridobljeni podatki prav gotovo veliko prispevajo k celostnemu konceptualnemu razumevanju hidrološke mobilizacije nitratnega dušika. Ob tem pa ne vemo, ali opazovana spremenljivost koncentracije nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov, ki smo jo zaznali znotraj značilnih zabeleženih hidrometeoroloških in sezonskih biogeokemijskih razmer, omogoča ustrezno ekstrapolacijo pridobljenih spoznanj in potencialno napoved intenzitete spiranja nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov, ki se pojavijo v drugačnih hidrometeoroloških in sezonskih biogeokemijskih okvirih.

V letu 2006 so zvezne meritve kemizma vode s časovnim zajemom podatkov 15 in 30 minut potekale 174 dni, znotraj osmih padavinskih dogodkov je bilo zabeleženih 17 hidrogramov (poplavnih valov). V letu 2007 so se meritve izvajale 59 dni, v času petih padavinskih dogodkov je bilo zabeleženih 13 hidrogramov.

6.2 MODELIRANJE DINAMIKE KONCENTRACIJE NITRATNEGA DUŠIKA V ČASU PADAVINSKIH DOGODKOV

6.2.1 Nabor atributov

Določitev nabora atributov, na podlagi katerih se izvede aplikacija metod rudarjenja podatkov, je odraz poznavanja obravnavanega procesa in naj bo osnovana na tej podlagi (Hall et al., 2002; Zaffron, 2005). Nabor atributov, ki smo ga vključili v proces generiranja modelnega drevesa z algoritmom M5, je podan v preglednici 6.1. Izbira atributov povzema ugotovitve iz literature ter lastna spoznanja, pridobljena z meritvami, ki so detajlno obravnavana v poglavjih št. 4 in 5.

Preglednica 6.1: Nabor atributov, uporabljenih pri generiranju modelnih dreves z algoritmom M5.

Table 6.1: List of attributes included into the model tree generation by a M5 algorithm.

Atribut	Opis
NO ₃	Koncentracija nitratnega dušika v vodotoku v [mg/l-N].
IPP ₃	Indeks predhodnih padavin, določen za obdobje 3 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
IPP ₅	Indeks predhodnih padavin, določen za obdobje 5 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
IPP ₇	Indeks predhodnih padavin, določen za obdobje 7 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
IPP ₁₄	Indeks predhodnih padavin, določen za obdobje 14 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{3h}	Vsota padavin v obdobju 3 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{6h}	Vsota padavin v obdobju 6 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{12h}	Vsota padavin v obdobju 12 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{24h}	Vsota padavin v obdobju 24 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{48h}	Vsota padavin v obdobju 48 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
avgT ₁	Povprečna urna temperatura zraka v obdobju 1 dne pred pojavom konice hidrograma odtoka v [°C].
avgT ₃	Povprečna urna temperatura zraka v obdobju 3 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [°C].
avgT ₇	Povprečna urna temperatura zraka v obdobju 7 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [°C].
avgT ₁₄	Povprečna urna temperatura zraka v obdobju 14 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [°C].
TV	Temperatura vode v vodotoku v [°C].
Q	Pretok v vodotoku v [m ³ /s].
NV	Delež nove vode v odtoku [-].

Ovisni atribut, ki smo ga modelirali na podlagi ostalih neodvisnih atributov, je koncentracija nitratnega dušika v vodotoku v mg/l-N z oznako NO₃. Enovito hidrološko merilo v smislu predhodne namočenosti oz. izsušenosti smo upoštevali z dnevni vrednostmi indeksa

predhodnih padavin (IPP) za časovna obdobja 3, 5, 7 in 14 dni pred nastopom določene konice hidrograma odtoka. Detajlneje je struktura padavinskih dogodkov upoštevana z vsotami padavin za predhodna obdobja dolžin 3 do 48 ur. Dodatno so značilnosti opazovanih padavinskih dogodkov v smislu izoblikovanja padavinskega odtoka okarakterizirane preko podatkov o pretoku v vodotoku (Q) in deležu »nove« padavinske vode v celotnem odtoku (NV).

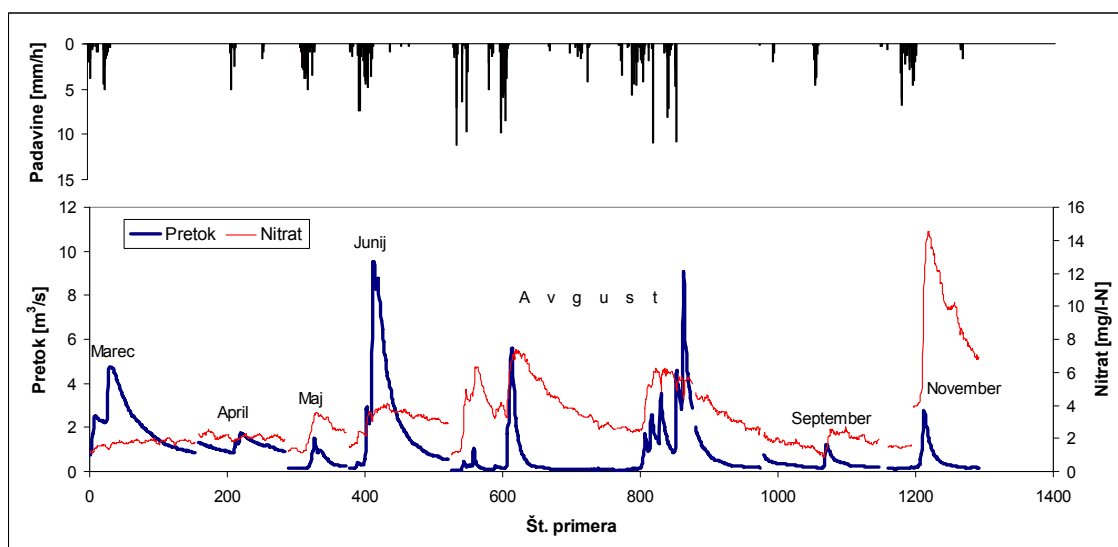
Vpliv sezonske biogeokemijske spremenljivosti je zajet s podatki o povprečnih urnih temperaturah zraka za predhodna obdobja dolžin 1, 3, 7 in 14 dni in temperaturo vode v vodotoku.

Časovni interval podajanja podatkov, vključenih v podatkovni niz, je 1 ura. Nabor podatkov za leto 2006, v katerega so vključena zgolj obdobja padavinskih dogodkov, vsebuje 1257 primerov, vsak izmed teh predstavlja kombinacijo nabora atributov ob določenem časovnem koraku. Primerov, ki obsegajo obdobja padavinskih dogodkov v letu 2007, je 964.

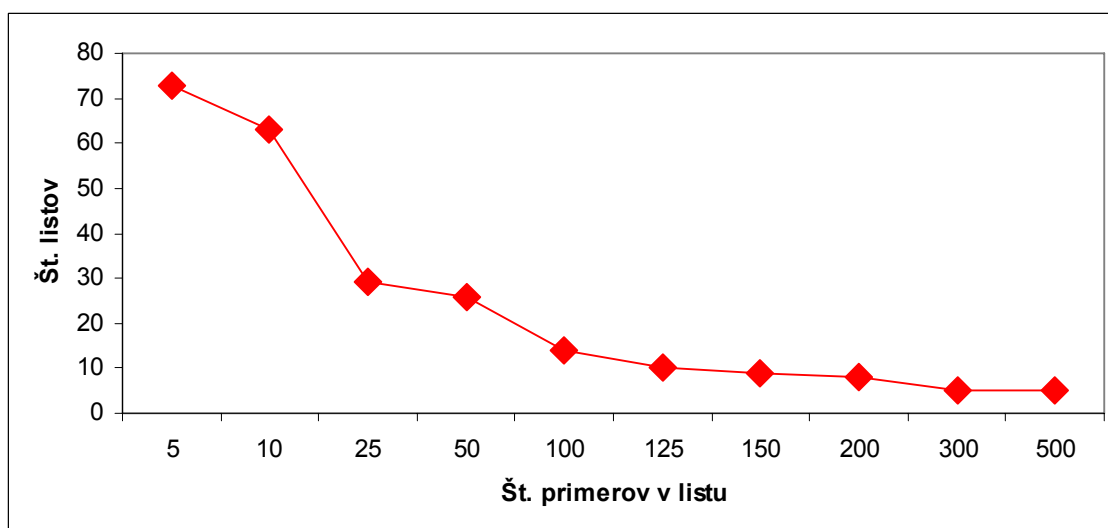
6.2.2 Modelno drevo koncentracije nitratnega dušika v obdobjih padavinskih dogodkov

Modelna drevesa, prikazana v nadaljevanju, so rezultat analize obsežnega nabora podatkov, ki smo jih pridobili v letu 2006. Za lažjo predstavljaljivost kompleksnosti vzajemnih sezonsko in hidrološko spodbujenih oscilacij v merjeni koncentraciji nitratnega dušika v vodotoku na sliki 6.1 prikazujemo celoten nabor urnih podatkov o padavinah, pretoku in koncentraciji nitratnega dušika v obdobjih padavinskih dogodkov v letu 2006. Padavinski dogodki so detajlno predstavljeni v poglavju 4.4.2.

Za opredelitev učnega in testnega niza primerov ter analizo kredibilnosti pridobljenih modelnih dreves smo uporabili metodo 10-kratnega navzkrižnega preverjanja. Razraščanje modelnega drevesa, pridobljenega z algoritmom M5, vgrajenim v programsko orodje WEKA, se kontrolira s kriterijem minimalnega števila primerov, ki jih posamezen list modelnega drevesa vsebuje. Velikosti modelnih dreves kot število listov, ki je odvisno od kriterija minimalnega števila primerov v posameznem listu, so prikazani na sliki 6.2.



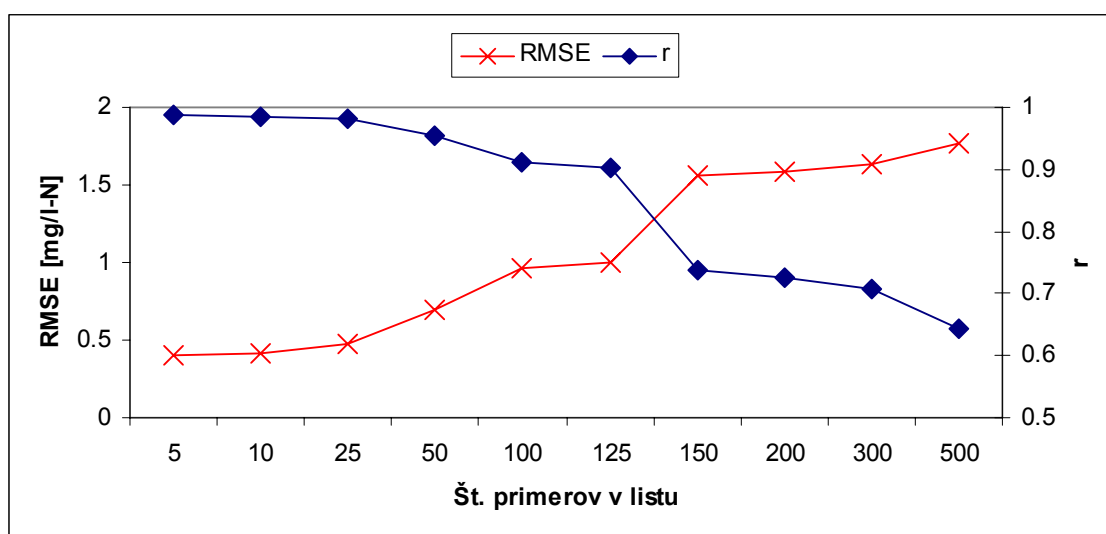
Slika 6.1: Urni podatki za leto 2006.
Figure 6.1: Hourly data for 2006.



Slika 6.2: Velikost modelnih dreves v odvisnosti od števila primerov v listu.
Figure 6.2: Size of the model trees as a function of the number of instances in a leaf.

Napovedna uspešnost modelnih dreves v odvisnosti od kriterija rezanja – števila primerov v posameznem listu je prikazana na slikah 6.3 in 6.4. Modelna drevesa z majhnim številom primerov v posameznem listu so zelo velika. V primeru, ko ima modelno drevo zgolj 5 primerov v posameznem listu, je skupno število listov kar 73, obenem pa je napovedna uspešnost tega drevesa izjemno visoka (napaka RMSE = 0,40 mg/l-N; koeficient korelacije $r = 0,99$; srednja absolutna napaka = 0,22 mg/l-N; relativna absolutna napaka = 13,57 %; napaka RRSE = 17,36 %). Takšno modelno drevo je s praktičnega aplikativnega vidika povsem neuporabno, glede na ekstremno visoko uspešnost napovedovanja je najverjetneje

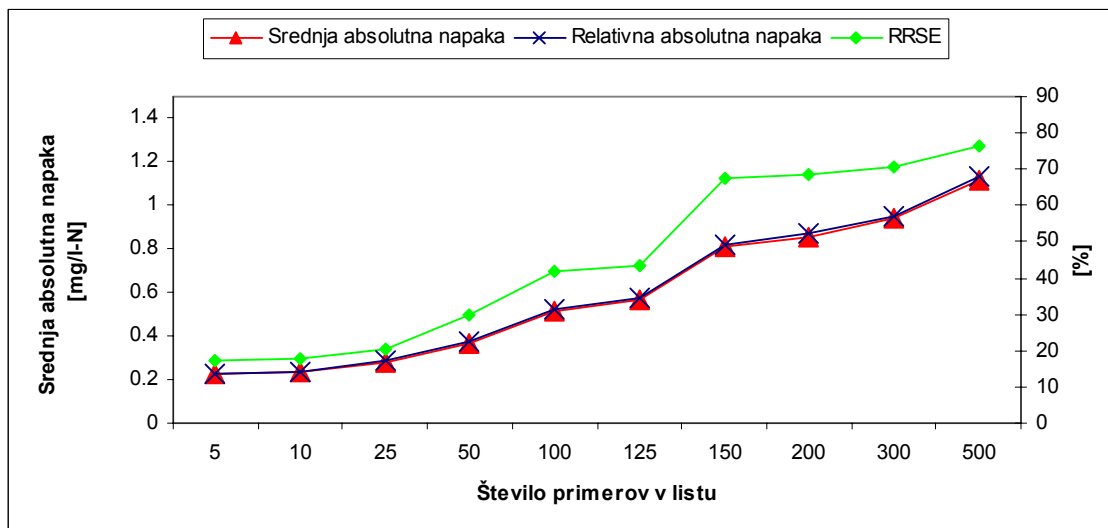
pretrenirano na obstoječi podatkovni niz, kar zahteva bolj drastično rezanje modelnega drevesa s povečanjem števila primerov v posameznem listu. Zadovoljiva napovedna uspešnost je bila dosežena z modelnima drevesoma, ki imata 100 in 125 primerov v posameznem listu, medtem ko je napovedna uspešnost precej padla v primeru nadaljnjega zviševanja števila primerov v posameznem listu (sliki 6.3 in 6.4). Za prikaz upada kompleksnosti modelnih dreves z višanjem kriterija minimalnega števila primerov v posameznem listu modelnega drevesa v prilogi B podajamo shematske strukture modelnih dreves s 50, 100, 200 in 500 primeri v posameznem listu.



Slika 6.3: Napovedna uspešnost modelnih dreves (vrednosti RMSE in r).
Figure 6.3: Predicting performance of the model trees (values of RMSE and r).

Modelno drevo s 100 primeri v posameznem listu ima 14 listov oz. linearnih regresijskih enačb, njegova napovedna uspešnost je naslednja: napaka RMSE = 0,97 mg/l-N; koeficient korelacije $r = 0,92$; srednja absolutna napaka = 0,51 mg/l-N; relativna absolutna napaka = 31,17 %; napaka RRSE = 41,79 %. Modelno drevo s 125 primeri v posameznem listu ima 10 listov, njegova napovedna uspešnost pa je naslednja: napaka RMSE = 1,02 mg/l-N; koeficient korelacije $r = 0,91$; srednja absolutna napaka = 0,57 mg/l-N; relativna absolutna napaka = 34,57 %; napaka RRSE = 43,23 %. Razlika v napovedni uspešnosti med obema modelnima drevesoma je majhna, ob tem je drevo s 125 primeri v posameznem listu precej manjše od modelnega drevesa s 100 primeri v posameznem listu. Kot model, primeren za analizo spremenljivosti koncentracije nitratnega dušika v vodotoku v času padavinskih dogodkov,

smo tako izbrali modelno drevo, generirano ob upoštevanju kriterija 125 primerov v posameznem listu (oznaka MD125).



Slika 6.4: Napovedna uspešnost modelnih dreves (vrednosti srednje absolutne napake, relativne absolutne napake in napake RRSE).

Figure 6.4: Predicting performance of the model trees (values of mean absolute error, relative absolute error and RRSE).

Modelno drevo MD125 je shematsko prikazano v preglednici 6.2 (levo). V desnem stolpcu preglednice so zapisane linearne regresijske enačbe (modeli), ki se nahajajo v listih modelnega drevesa. Klasifikacijski kriterij, ki je bil izbran v korenem vozlišču na prvem nivoju delitve, je IPP_5 . Glede na vrednost delitvenega atributa $IPP_5 = 17,9$ mm padavin opredeljeni veji modelnega drevesa opisujeta primere manjše hidrološke namočenosti prispevnega območja ($IPP_5 \leq 17,9$ mm) ter primere velike hidrološke namočenosti prispevnih površin ($IPP_5 > 17,9$ mm). Na drugem nivoju delitve sta kot delitvena kriterija izbrani temperaturi $avgT_3 = 10,1$ °C in $avg T_{14} = 11,6$ °C, ki opredeljujeta sezonski okvir padavinskih dogodkov. V modelno drevo MD125 niso vključene vsote padavin za obdobja krajša od 12 ur. Na nižjem, 3. nivoju delitve v modelnem drevesu MD125 najdemo kot delitveni kriterij vsote padavin ($P_{sum_{12h}} = 0,3$ mm in $P_{sum_{48h}} = 22,3$ mm) ter temperaturo $avgT_1 = 9,9$ °C, s čimer se še detajlneje opredeli klasifikacija na podlagi strukture padavinskih dogodkov ter temperaturnih razmer. Na 4. in 5. nivoju delitve najdemo kot delitvene kriterije attribute $avgT_7$, $avgT_{14}$ in IPP_{14} . Zanimivo je dejstvo, da modelno drevo MD125 ni vključilo kot kriterij za klasificiranje ter napovedovanje koncentracije nitratnega dušika s pomočjo linearnih regresijskih enačb podatkov o pretoku v vodotoku Q ter temperature vode TV.

Podatki o pretoku vode so sicer posredno upoštevani preko deležev »nove vode« NV v skupnem odtoku, ki so vključeni v linearne regresijske enačbe št. 8 do 10.

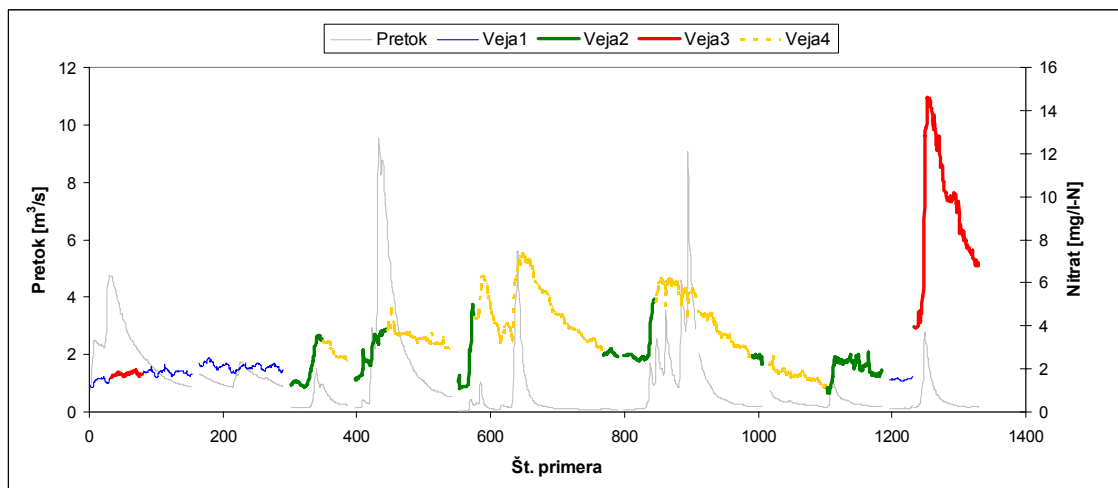
Preglednica 6.2: Shematski prikaz modelnega drevesa MD125 (levo) in seznam linearnih regresijskih enač (modelov), ki se nahajajo v listih.

Table 6.2: Schematic representation of MD125 model tree (left) and a list of linear regression equations (models), which are in the leaves.

Shema regresijskega drevesa	Linearne regresijske enačbe (modeli)
Nivo delitve (vozlišča)	
1 2 3 4 5	
↓ ↓ ↓ ↓ ↓	
IPP5 ≤ 17.914 :	LM1: NO3 = + 0.0008*Psum24h+0.0006*Psum48h+0.0017*IPP5 + 0.0017*IPP14-0.0008*avgT3+0.0095*avgT7+0.0017*avgT14 +1.7664
avgT3 ≤ 10.118 [Veja 1]	LM2: NO3 =+0.0008*Psum24h+0.0006*Psum48h+0.0017*IPP5 + 0.0017*IPP14-0.0008*avgT3+0.0095*avgT7+0.0008*avgT14+1.9596
Psum12h ≤ 0.3 :	LM3: NO3 =-0.0014*Psum12h+0.0008*Psum24h+0.0006* Psum48h +0.0017*IPP5+0.0017*IPP14-0.0008*avgT3+0.0095*avgT7-0.0029 *avgT14+1.6483
avgT14 ≤ 7.331 : LM1	LM4: NO3 =0.0016*Psum12h+0.0008*Psum24h+0.0025*Psum48h +0.0017*IPP5+0.0071*IPP14-0.0006*avgT3-0.008*avgT7-0.0073 *avgT14+2.1905
avgT14 > 7.331 : LM2	LM5: NO3 =0.0016*Psum12h+0.0008*Psum24h+0.0025*Psum48h +0.0017*IPP5+0.0071*IPP14-0.0006*avgT3-0.0068*avgT7- 0.0073*avgT14+1.6814
Psum12h > 0.3 : LM3	LM6: NO3 =0.0016*Psum12h+0.0008*Psum24h+0.0025*Psum48h +0.0017*IPP5+0.0082*IPP14-0.0006*avgT3+0.0082* avgT7-0.0073 *avgT14+2.3035
avgT3 > 10.118 [Veja 2]	LM7: NO3 =0.0016*Psum12h+0.0008*Psum24h+0.0072*Psum48h +0.0017*IPP5+0.0068*IPP14-0.0006*avgT3+0.014* avgT7-0.0073 *avgT14+2.889
Psum48h ≤ 22.3 :	LM8: NO3 =0.2417*Nv+0.0004*Psum12h+0.0067*Psum24h+0.0181 *IPP5-0.0129*IPP14+0.2743*avgT1+0.0013*avgT3+ 0.0076*avgT7 -0.0277*avgT14+0.4859
IPP14 ≤ 23.564 :	LM9: NO3 =0.2417*Nv+0.0004*Psum12h+0.0067*Psum24h+0.0181 *IPP5-0.0129*IPP14+0.168*avgT1+ 0.0013*avgT3+ 0.0076*avgT7 -0.0277*avgT14+6.7974
avgT7 ≤ 15.398 : LM4	LM10: NO3 =4.4079*Nv+0.0004*Psum12h+0.0183*Psum24h-0.0203 *IPP5+0.0587*IPP14+0.007*avgT1+0.0013*avgT3+0.0076 *avgT7 +0.1929*avgT14-2.5505
avgT7 > 15.398 : LM5	
IPP14 > 23.564 : LM6	
Psum48h > 22.3 : LM7	
IPP5 > 17.914 :	
avgT14 ≤ 11.633 [Veja 3]	
avgT1 ≤ 9.899 : LM8	
avgT1 > 9.899 : LM9	
avgT14 > 11.633 : LM10 [Veja 4]	

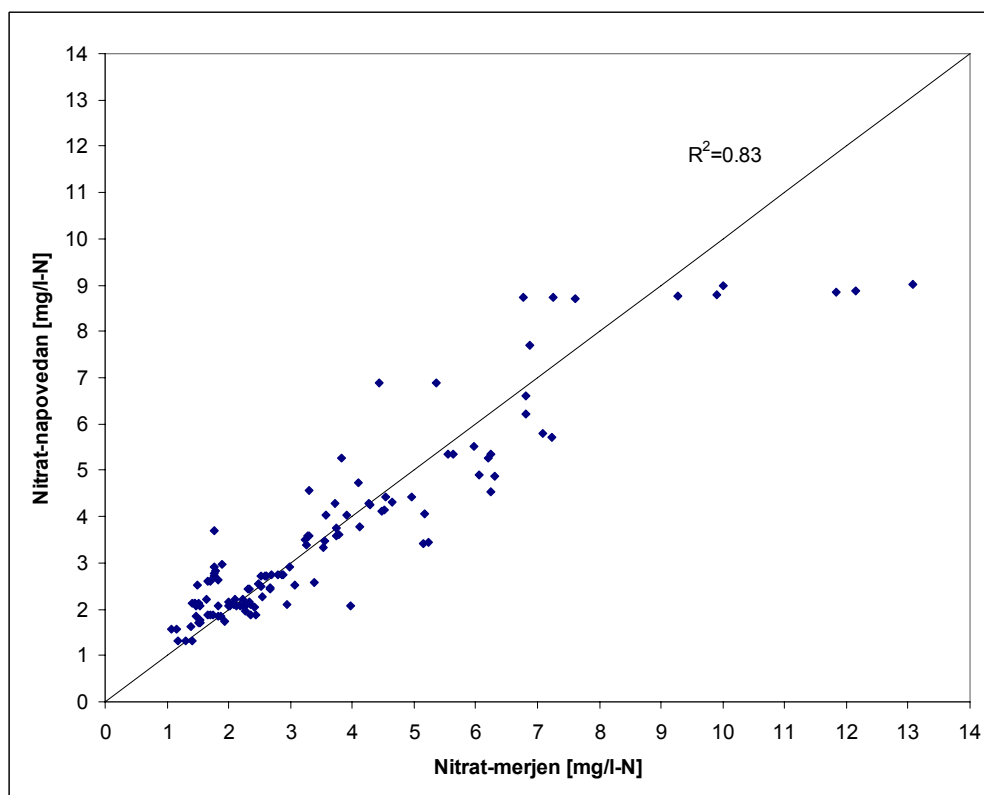
Rezultat delitve podatkovnega niza na podlagi kriterijev, postavljenih na prvem in drugem nivoju delitve, so štiri veje modelnega drevesa (preglednica 2). Za lažjo predstavo učinka opredelitve štirih vej modelnega drevesa na sliki 6.5 prikazujemo nastalo delitev podatkovnega nabora koncentracij nitratnega dušika na štiri razrede. Z vidika časovnega merila dogajanja Veja1 vsebuje podatke, pridobljene v hidrološko manj namočenih obdobjih v zgodnjepomladanskem obdobju (padavinska dogodka marec in april) in kratkem obdobju pred novembrskim padavinskim dogodkom. Veja2 vsebuje podatke iz obdobjih prvih hidrogramov in dvigajočih delov nekaterih sledečih hidrogramov v nizih hidrogramov padavinskih dogodkov v maju, juniju in avgustu, Veja4 pa podatke iz preostalih, bolj namočenih obdobjih, zabeleženih v poznospomladanskem in poletnem času. Veja3 zaobjema

podatke iz hidrološko bolj namočenih obdobj v zgodnjеспomladanskem in jesenskem obdobju. Merjene koncentracije nitratnega dušika napram koncentracijam, napovedanim z modelnim drevesom MD125 na podlagi navzkrižnega preverjanja, so prikazane na sliki 6.6.



Slika 6.5: Delitev podatkovnega nabora koncentracij nitratnega dušika na podlagi klasifikacijskih kriterijev 1. in 2. nivoja delitve v modelnem drevesu MD125.

Figure 6.5: Partitioning of the nitrate concentrations dataset based on the classification criteria on 1st and 2nd split levels of the model tree MD125.



Slika 6.6: Merjene koncentracije nitratnega dušika napram koncentracijam, napovedanim z modelnim drevesom MD125.

Figure 6.6: Measured nitrate concentrations vs. predicted nitrate concentrations by model tree MD125.

Iz slike 6.6 je razvidno, da modelno drevo MD125 uspešno napoveduje predvsem nizke do srednje koncentracije nitratnega dušika v vodotoku (1-5 mg/l-N), medtem ko napovedna sposobnost modela pada z naraščajočo koncentracijo nitratnega dušika. Modelno drevo MD125 z 10 listi je očitno preveč robustno, da bi uspešneje napovedovalo koncentracije nitratnega dušika nad 5 mg/l-N, ki pa se v podatkovnem nizu pojavljajo zgolj v izjemno kratkih obdobjih konic hidrogramov odtoka. Modelno drevo tudi ni uspelo predvideti koncentracij nitratnega dušika nad 9 mg/l-N, medtem ko so izmerjene koncentracije v času novembrskega dogodka dosegle vrednost 14 mg/l-N.

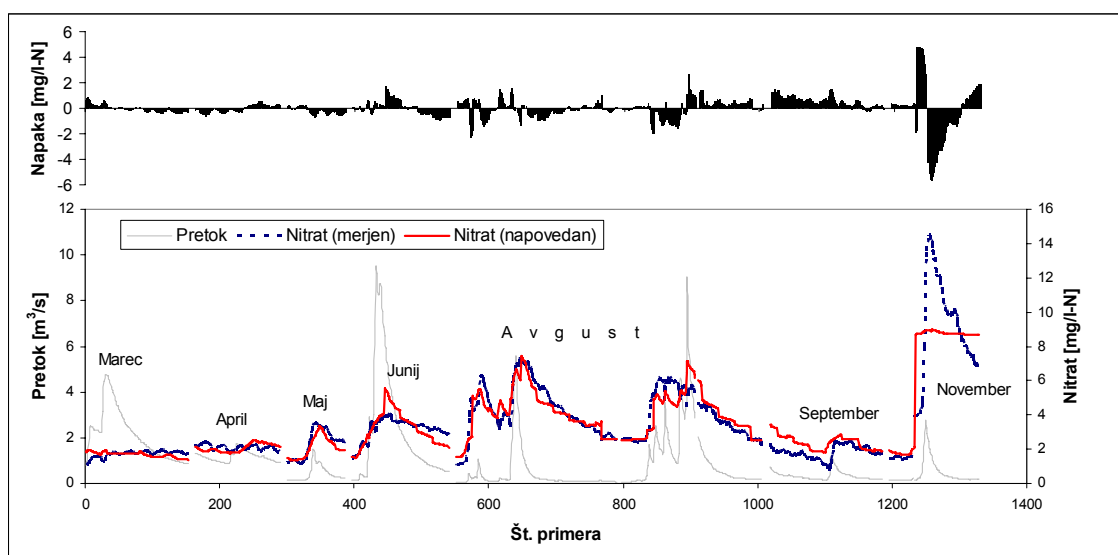
6.2.3 Interpretacija zgradbe in rezultatov modela v kontekstu domenskega znanja

Strukturna transparentnost modelnih dreves ne omogoča zgolj interpretacije rezultatov napovedi modelnega drevesa z oceno kredibilnosti, ampak tudi analizo zgradbe modelnega drevesa v kontekstu predhodnega poznavanja modeliranega procesa. V modelnem drevesu MD125 je bila kot korenski delitveni atribut izbrana vrednost $IPP_5 = 17,9$ mm. Izbira vrednosti indeksa predhodnih padavin v začetnem delitvenem kriteriju je najverjetneje posledica njegove opredelitve. Vrednosti IPP so glede na definicijo določene za dnevni časovni korak, medtem ko so ostali atributi, ki so vključeni v podatkovni nabor, podani z urnim časovnim korakom. Čeprav je IPP5 izbran kot začetni delitveni kriterij, pa je iz nadaljnje zgradbe modelnega drevesa MD125 razvidno, da časovna opredelitev IPP nima prevladujočega vpliva na izbor atributov v modelnem drevesu, saj se že na 2. delitvenem nivoju kot delitvena kriterija pojavita povprečni urni temperaturi za predhodno obdobje treh dni ($avgT_3$) in štirinajstih dni ($avgT_{14}$).

Vrednosti indeksa predhodnih padavin so določene empirično preko izbrane recesijske konstante, s katero skušamo opisati časovni potek spremenljivosti namočenosti oz. izsušenosti prispevnega območja vodotoka z upoštevanjem njegovih hidroloških karakteristik. Z vidika domenskega poznavanja modeliranega procesa eksaktne vrednosti empiričnega indeksa predhodnih padavin ne nudijo direktnih informacij o spremenljivosti koncentracije nitratnega dušika v vodotoku, omogočajo pa vpogled v časovno spremenljivost hidroloških pogojev na porečju Padeža, znotraj katerih se vrši proces spiranja nitratnega dušika. Vrednosti povprečnih dnevnih temperatur $avgT_3 = 10,1$ °C in $avgT_{14} = 11,6$ °C, ki sta bili določeni kot delitvena kriterija na 2. nivoju delitve v modelnem drevesu MD125, sta z biogeokemijskega vidika

veliko bolj oprijemljivi. Kot je bilo že večkrat poudarjeno, sta temperatura in vlažnostne razmere v tleh bistvena dejavnika, ki vplivata na intenziteto procesov mineralizacije in nitrifikacije v gozdnih tleh (Arheimer et al., 1996; Andersson and Lepisto, 1998; Knoepp in Swank, 2002). Medtem ko je maksimalna intenziteta mineralizacije in nitrifikacije opažena v temperaturnem območju 25 °C do 35 °C (Nicolardot et al., 1994), postanejo procesi razgradnje dušikovih organskih spojin močno inhibirani pri temperaturah pod 10 °C (Knoepp in Swank, 2002). Če predpostavimo, da povprečne temperature zraka v daljši predhodnih obdobjih odražajo tudi temperaturne razmere v gozdnih tleh, potem lahko določena delitvena kriterija znotraj modelnega drevesa MD125 $avgT_3 = 10,1$ °C in $avgT_{14} = 11,6$ °C interpretiramo kot mejni vrednosti, ki ločujeta obdobja bolj učinkovite mineralizacije in nitrifikacije ter posledične akumulacije produktov v gozdnih tleh od obdobj, ko ti procesi potekajo počasneje ali sploh ne potekajo. Na sliki 6.6 so primeri iz obdobj intenzivnejše razgradnje organskih dušikovih spojin klasificirani v vejah modelnega drevesa št. 2 in 4.

Na sliki 6.7 je prikazana primerjava med merjenimi vrednostmi koncentracije nitratnega dušika v obdobjih opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006 in vrednostmi, ki jih je napovedalo modelno drevo MD125. Napake prikazujejo razliko med napovedanimi in merjenimi vrednostmi koncentracije nitratnega dušika.



Slika 6.7: Primerjava merjenih koncentracij nitratnega dušika in koncentracij, napovedanih z modelnim drevesom MD125.

Figure 6.7: Comparison of measured nitrate concentrations and concentrations predicted by model tree MD125.

Iz slike 6.7 je razvidno, da modelno drevo MD125 uspešno napove koncentracije nitratnega dušika v času zgodnjеспomladanskih (marec in april), poznospomladanskih (maj in junij) ter poletnih (avgust) padavinskih dogodkov, ko napaka le redko v času posameznih konic hidrogramov odtoka preseže 2 mg/l-N.

V času novembrskega padavinskega dogodka so bile koncentracije nitratnega dušika v primerjavi s preostalimi padavinskimi dogodki ekstremno visoke. Utemeljitev opaženih visokih vrednosti koncentracije nitratnega dušika je podana v poglavju 4.4. V času novembrskega padavinskega dogodka je napovedna uspešnost modelnega drevesa MD125 najslabša, saj napaka preseže vrednost 4 mg/l-N. Do spremembe v koncentraciji nitratnega dušika je v času novembrskega padavinskega dogodka prišlo zelo hitro. Modelno drevo MD125 je očitno preveč robustno, da bi uspelo natančneje napovedati veliko oscilacijo v koncentraciji nitratnega dušika v času edinega novembrskega padavinskega dogodka. Boljšo napoved koncentracije v obdobju novembrskega padavinskega dogodka bi lahko dosegli, če bi znižali vrednost kriterija minimalnega števila primerov v posameznem listu modelnega drevesa, vendar bi s tem tvegali preveliko prilagodljivost nastalega modelnega drevesa na učni podatkovni niz. Problem natančnejše napovedi ekstremnih koncentracije nitratnega dušika izhaja iz dejstva, da se je v novembru 2006 zgodil le en padavinski dogodek, posledično ima algoritem za generiranje regresijskih dreves premalo podatkov, na osnovi katerih bi lahko uspešneje napovedal dogajanje v novembru, kot mu je to uspelo v primeru spomladanskih in poletnih padavinskih dogodkov.

Podatki o pretoku Q in temperaturi vode TV niso bili prepoznani kot pomembni za napovedovanje koncentracije nitratnega dušika v padavinskih dogodkih. Iz podatkovnega niza, prikazanega na sliki 6.1, je razvidno, da je razen splošne pozitivne soodvisnosti med pretokom in koncentracijo nitratnega dušika, ob podobnih pretočnih razmerah v strugi Padeža odziv koncentracije nitratnega dušika v različnih sezonskih okvirih zelo spremenljiv. Podatki o pretoku vode v Padežu so sicer upoštevani posredno z deležem »nove vode« NV v odtoku. Atribut NV se pojavi v regresijskih enačbah št. 8 do 10, ki so uporabljene za napovedovanje koncentracije nitratnega dušika v hidrološko namočenih obdobjih ($IPP_5 > 17,9$ mm), v času katerih so deleži nove vode lahko precejšnji (poglavje 4.5.2).

6.2.4 Preizkus modelnega drevesa v drugačnih hidroloških in sezonskih okvirih

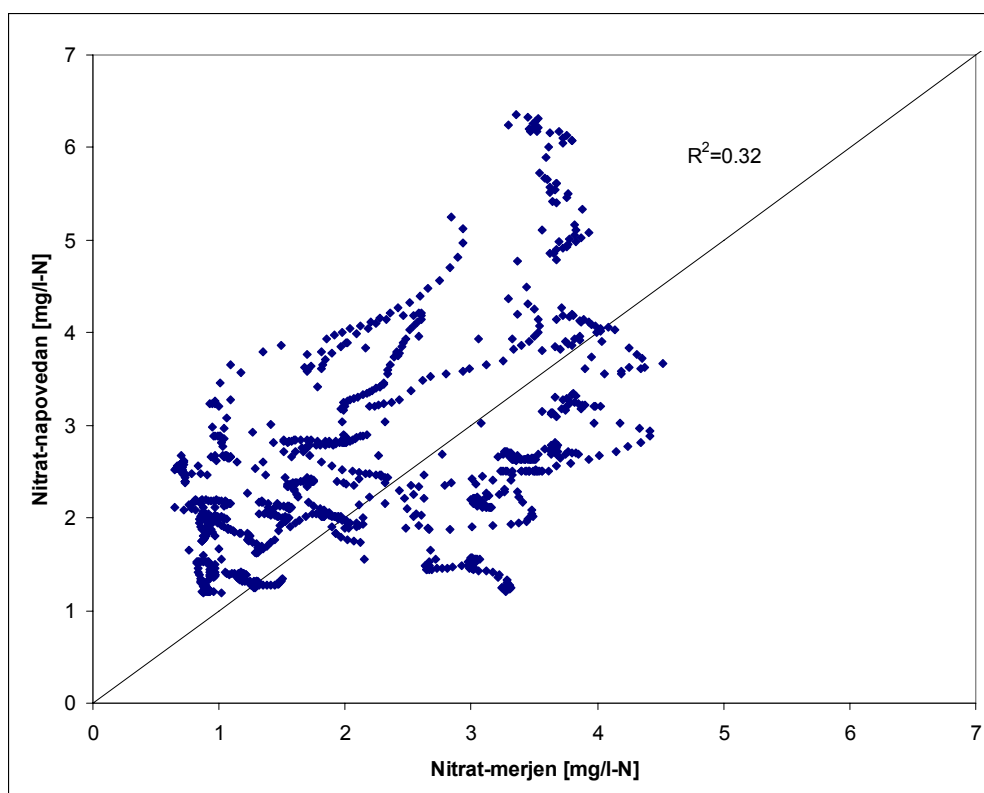
Algoritem za generiranje modelnih dreves M5 se je izkazal za uporabno orodje pri iskanju povezav med opazovanimi koncentracijami nitratnega dušika v vodotoku in hidrološkimi ter sezonskimi biogeokemijskimi razmerami. Relativno preprosto modelno drevo MD125 je uspelo na podlagi podanih atributov uspešno napovedati koncentracijo nitratnega dušika predvsem med spomladanskimi in poletnimi padavinskimi dogodki (slika 6.7), obenem pa nam je omogočilo osvetliti strukturo pridobljenega modelnega drevesa v luči domenskega poznavanja procesov spiranja nitratnega dušika z gozdnatih prispevnih površin.

Baza podatkov, na osnovi katere je bilo pridobljeno modelno drevo, je precej obsežna. Nabor podatkov v letu 2006 vključuje 1257 primerov, podanih na časovnem koraku ene ure, kar pokriva več kot 50 dni meritev znotraj samih padavinskih dogodkov. Še pomembneje kot sama skupna dolžina meritev je dejstvo, da so se podatki pridobili v različnih letnih časih in pokrivajo zelo različne sezonske biogeokemijske razmere, ki imajo velik vpliv na razpoložljivost nitratnega dušika za hidrološko mobilizacijo. Kot smo utemeljili v poglavjih 4.2 in 4.3 je bilo leto 2006 tako s hidrološkega kot klimatskega vidika precej nenavadno z izrazitim viškom padavin v avgustu, predhodno obdobje v juniju in juliju je bilo zelo sušno in vroče. Drugi večji ekstrem v letu 2006 predstavlja jesensko obdobje, ki je bilo nenavadno sušno in toplo.

Čeprav smo pridobili podatke o odzivu intenzitete spiranja nitratnega dušika v omenjenih neobičajnih hidroloških in temperaturnih razmerah, se poraja vprašanje, v kolikšni meri nam lahko opazovanja v letu 2006 služijo za predvidevanja oz. napovedovanje koncentracije nitratnega dušika v vodotoku v času padavinskih dogodkov, ki se zgodijo v drugačnih hidroloških in sezonskih okvirih. Da bi preverili napovedno uspešnost modelnega drevesa MD125, pridobljenega na podlagi meritev v letu 2006 v drugačnih hidroloških in sezonskih biogeokemijskih razmerah, smo modelno drevo uporabili za napoved koncentracije nitratnega dušika v padavinskih dogodkih, opazovanih v letu 2007. Padavinski dogodki v letu 2007 so se pojavili v hidroloških in sezonskih okvirih, ki se precej razlikujejo od razmer v letu 2006 in nam v smislu teorije rudarjenja po podatki predstavljajo neodvisen testni nabor podatkov, na podlagi katerega lahko preverimo učinkovitost izbranega orodja rudarjenja podatkov.

Primerjava hidroloških ter sezonskih razmer v letih 2006 in 2007 v povezavi z opazovano odzivnostjo koncentracije nitratnega dušika na padavinske dogodke je podrobneje predstavljena v poglavju 4.5.3.

Napovedna uspešnost modelnega drevesa MD125 na testnem naboru podatkov, pridobljenih v letu 2007, je naslednja: napaka RMSE = 1,08 mg/l-N; koeficient korelacije $r = 0,57$; srednja absolutna napaka = 0,89 mg/l-N; relativna absolutna napaka = 64,56 %; napaka RRSE = 64,88 %. Uspešnost modelnega drevesa pri napovedovanju koncentracije nitratnega dušika v letu 2007 je pričakovano slabša napram napovedni uspešnosti v letu 2006. Do najbolj občutnega znižanja pride pri koeficientu korelacije, kar je razvidno tudi iz slike 6.8, kjer so merjene koncentracije nitratnega dušika v letu 2007 prikazane v primerjavi z napovedanimi koncentracijami.

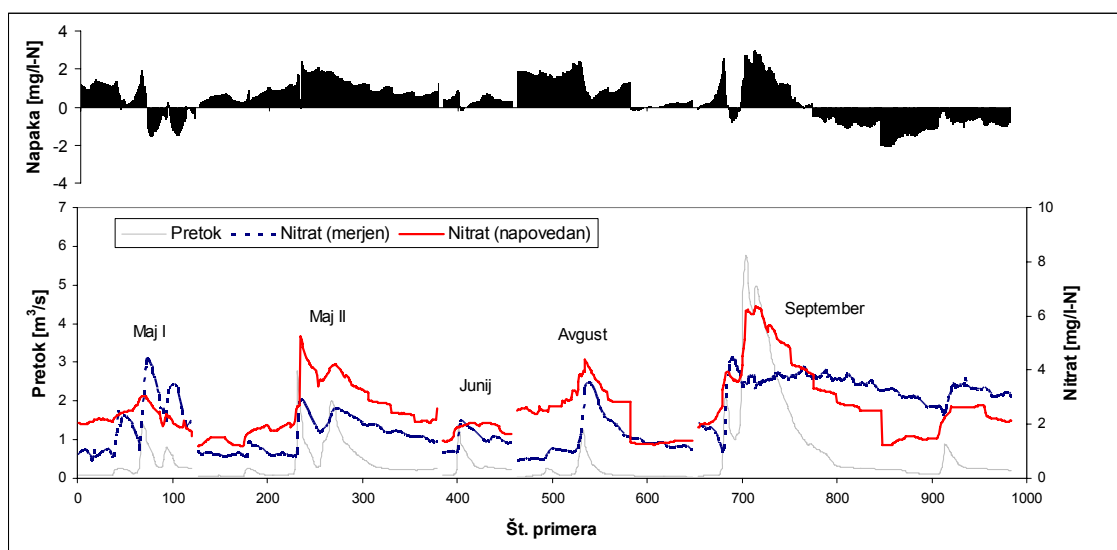


Slika 6.8: Merjene koncentracije nitratnega dušika v letu 2007 napram koncentracijam, napovedanim z modelnim drevesom MD125.

Figure 6.8: Measured nitrate concentrations in 2007 vs. nitrate concentrations predicted by model tree MD125.

Majhna je sprememba napake RMSE (1,02 mg/l-N za leto 2006 napram 1,08 mg/l-N za leto 2007). Prav tako ostaja relativno nizka srednja absolutna napaka (0,57 mg/l-N za leto 2006 napram 0,89 mg/l-N za leto 2007).

Na sliki 6.9 so prikazani padavinski dogodki v letu 2007, merjene koncentracije nitratnega dušika v vodotoku ter napovedane koncentracije nitratnega dušika z modelnim drevesom MD125. Napaka predstavlja razliko med napovedanimi in merjenimi vrednostmi koncentracije nitratnega dušika. Modelno drevo MD125 je kljub svoji robustnosti uspešno prepoznalo časovno dinamiko variabilnosti koncentracije nitratnega dušika v vodotoku, kar se kaže z dobrim ujemanjem časovne razporeditve konic merjene in napovedane koncentracije nitratnega dušika ter obdobja naraščanja in upada koncentracije. Bolj problematična je napovedna uspešnost modelnega drevesa predvsem v času konic hidrogramov odtoka ter z njimi povezanih maksimumov koncentracije nitratnega dušika v vodotoku, ko napaka modela pogosto preseže 2 mg/l-N. Maksimalna absolutna napaka znaša 3 mg/l-N v času septembrskega padavinskega dogodka.



Slika 6.9: Primerjava merjenih koncentracij nitratnega dušika v letu 2007 in koncentracij, napovedanih z modelnim drevesom MD125.

Figure 6.9: Comparison of measured nitrate concentrations in 2007 and concentrations predicted by model tree MD125.

Poleg samih razlik v strukturi padavinskih dogodkov, opaženih v letih 2006 in 2007, lahko razhajanja v merjenih in napovedanih koncentracijah nitratnega dušika nedvomno pripišemo veliki pestrosti in spremenljivosti časovnih hidroloških in sezonskih biogeokemijskih razmer

v obeh letih. Boljšo napovedno učinkovitost koncentracije nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov v letu 2007 bi lahko dosegli, če bi pridobili modelno drevo na podlagi podatkovnega niza vseh podatkov iz obdobja padavinskih dogodkov v letu 2006 in 2007, vprašanje pa je, koliko bi na ta način uspeli izboljšati napovedno učinkovitost takšnega modela v drugačnih, še nevidenih hidroloških in sezonskih okvirih. V nabor podatkov, na podlagi katerih bi pridobili modelno drevo, sposobno boljše napovedi dinamike spiranja nitratnega dušika v obdobjih padavinskih dogodkov, bi morali vključiti več opazovanj, ki bi pokrivala širši razpon vzajemnih hidroloških in sezonskih biogeokemijskih regulacijskih mehanizmov spiranja nitratnega dušika.

6.3 MODELIRANJE SEZONSKE DINAMIKE KONCENTRACIJE NITRATNEGA DUŠIKA

V prejšnjem poglavju smo s pridobljenim modelnim drevesom MD125 analizirali odziv koncentracije nitratnega dušika v vodotoku na spremenjene hidrološke pogoje v obdobjih opazovanih padavinskih dogodkov. Obdobja padavinskih dogodkov so sicer s stališča variabilnosti koncentracije nitratnega dušika najbolj zanimiva, vendar obsegajo manjši del celotnega obdobja, v katerem so se opravljale meritve. Da bi ugotovili, kakšna je vloga mobilizacije nitratnega dušika znotraj padavinskih dogodkov v celotni sezonski dinamiki spiranja nitratnega dušika z gozdnatih prispevnih površin, smo se odločili z uporabo modelnih dreves analizirati celoten nabor podatkov, ki so bili pridobljeni tako v obdobjih padavinskih dogodkov kot tudi s hidrološkega stališča manj zanimivih, a dolgotrajnih vmesnih sušnih obdobjih. Analiza celotnega nabora podatkov nam je nadalje omogočila ekstrapolacijo ugotovljenih soodvisnosti znotraj modelnega drevesa na širša časovna obdobja ter opredelitev količine spranega nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja v letih 2006 in 2007.

6.3.1 Nabor atributov

Celoten nabor podatkov za leto 2006, v katerem so vključene tako meritve v času padavinskih dogodkov, ki so detajlneje obdelane v predhodnem poglavju, kot tudi meritve v sušnih obdobjih, obsega 4171 primerov, v letu 2007 pa 1421 primerov. Skupno torej podatkovni niz vsebuje 5592 primerov.

V preglednici 6.3 je podan seznam atributov, ki so bili vključeni v proces generiranja modelnih dreves oz. nizov klasifikacijskih pravil. Da bi na podlagi ugotovljenih povezav med atributi lahko napovedovali koncentracijo nitratnega dušika v obdobjih, ko se zvezne meritve z multiparametrsko sondo niso izvajale, smo iz seznama atributov izločili podatke o deležu »nove vode« NV in temperaturi vode TV. Pridobljena modelna drevesa ter iz njih ekstrahirana klasifikacijska pravila, prikazana v nadaljevanju, so torej rezultat analize koncentracije nitratnega dušika v vodotoku na podlagi podanih indeksov predhodnih padavin (IPP), vsote padavin in temperaturnih razmer v predhodnih obdobjih različnih dolžin ter podatkov o pretoku v Padežu.

Preglednica 6.3: Nabor atributov, uporabljenih pri analizi celotnega nabora meritev z uporabo algoritma M5.
Table 6.3: List of attributes used for the analysis of the entire dataset by the M5 algorithm.

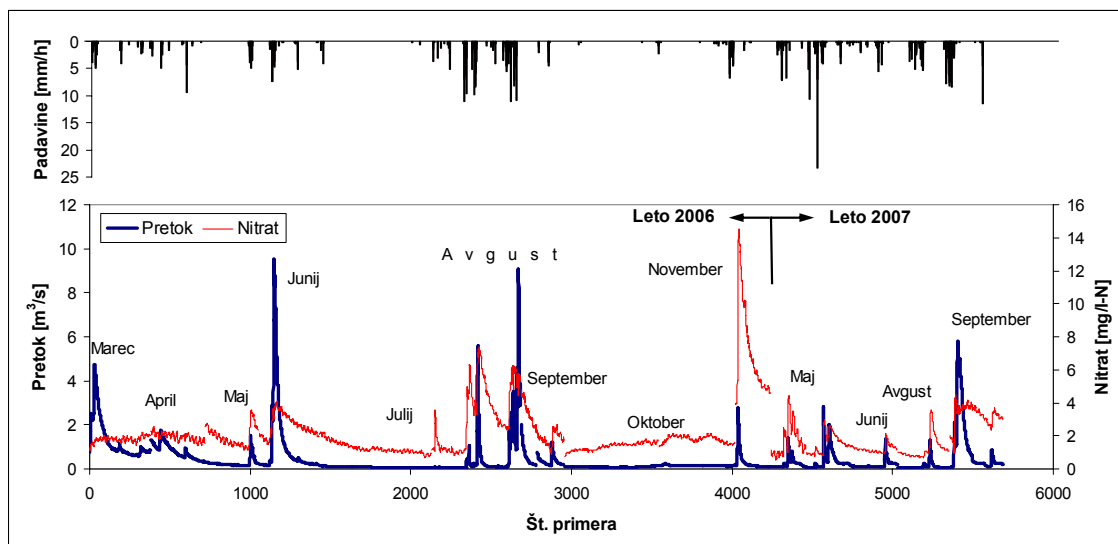
Atribut	Opis
NO ₃	Koncentracija nitratnega dušika v vodotoku v [mg/l-N].
IPP ₃	Indeks predhodnih padavin določen za obdobje 3 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
IPP ₅	Indeks predhodnih padavin določen za obdobje 5 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
IPP ₇	Indeks predhodnih padavin določen za obdobje 7 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
IPP ₁₄	Indeks predhodnih padavin določen za obdobje 14 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{3h}	Vsota padavin v obdobju 3 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{6h}	Vsota padavin v obdobju 6 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{12h}	Vsota padavin v obdobju 12 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{24h}	Vsota padavin v obdobju 24 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
Psum _{48h}	Vsota padavin v obdobju 48 ur pred pojavom konice hidrograma odtoka v [mm].
avgT ₁	Povprečna urna temperatura zraka v obdobju 1 dne pred pojavom konice hidrograma odtoka v [°C].
avgT ₃	Povprečna urna temperatura zraka v obdobju 3 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [°C].
avgT ₇	Povprečna urna temperatura zraka v obdobju 7 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [°C].
avgT ₁₄	Povprečna urna temperatura zraka v obdobju 14 dni pred pojavom konice hidrograma odtoka v [°C].
Q	Pretok v vodotoku v [m ³ /s].

6.3.2 Modelna drevesa in nizi klasifikacijskih pravil za napovedovanje koncentracije nitratnega dušika v vseh merskih obdobjih

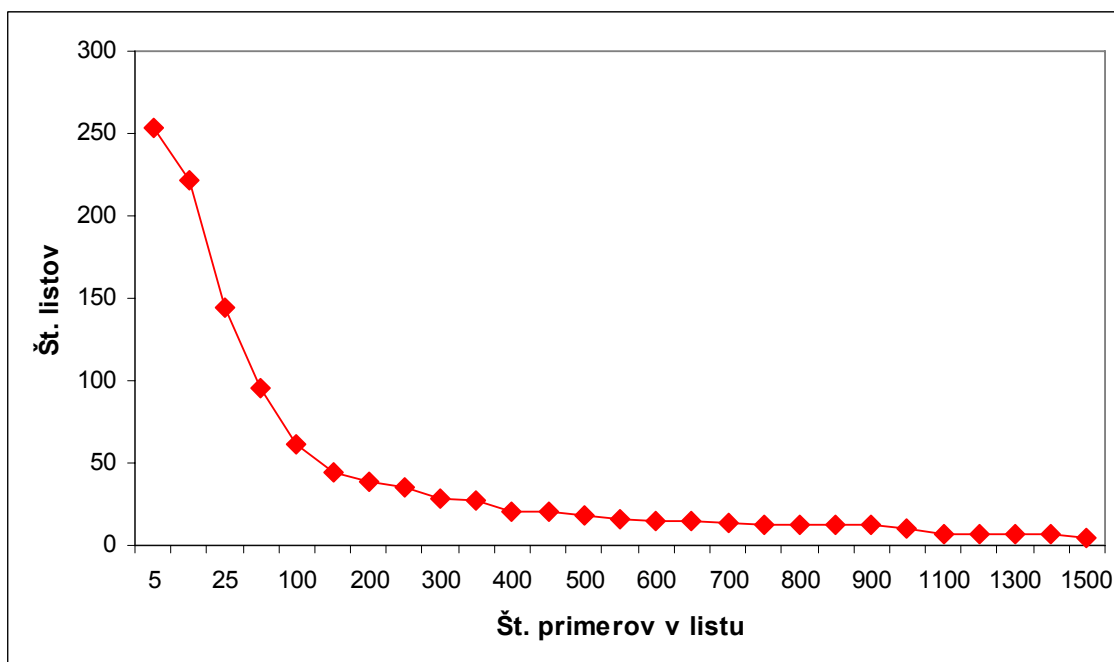
Modelna drevesa in nizi klasifikacijskih pravil, prikazani v nadaljevanju, so rezultat analize obsežnega nabora vseh podatkov o koncentraciji nitratnega dušika v vodotoku, ki smo jih pridobili v letih 2006 in 2007. Celoten nabor urnih podatkov o padavinah, pretoku in koncentraciji nitratnega dušika v vseh merskih obdobjih je prikazan na sliki 6.10. Poleg velike spremenljivosti koncentracije nitratnega dušika v času večine padavinskih dogodkov je v vmesnih sušnih obdobjih spremenljivost koncentracije nitratnega dušika, če ne upoštevamo dnevnega cikla koncentracije nitratnega dušika, zelo majhna.

Za opredelitev učnega in testnega seta primerov ter analizo kredibilnosti pridobljenih modelnih dreves in nizov klasifikacijskih pravil smo kot v primeru analize obdobj samih padavinskih dogodkov uporabili metodo 10-kratnega navzkrižnega preverjanja. Velikosti

modelnih dreves kot število listov, ki je odvisno od kriterija minimalnega števila primerov v posameznem listu, so prikazane na sliki 6.11.



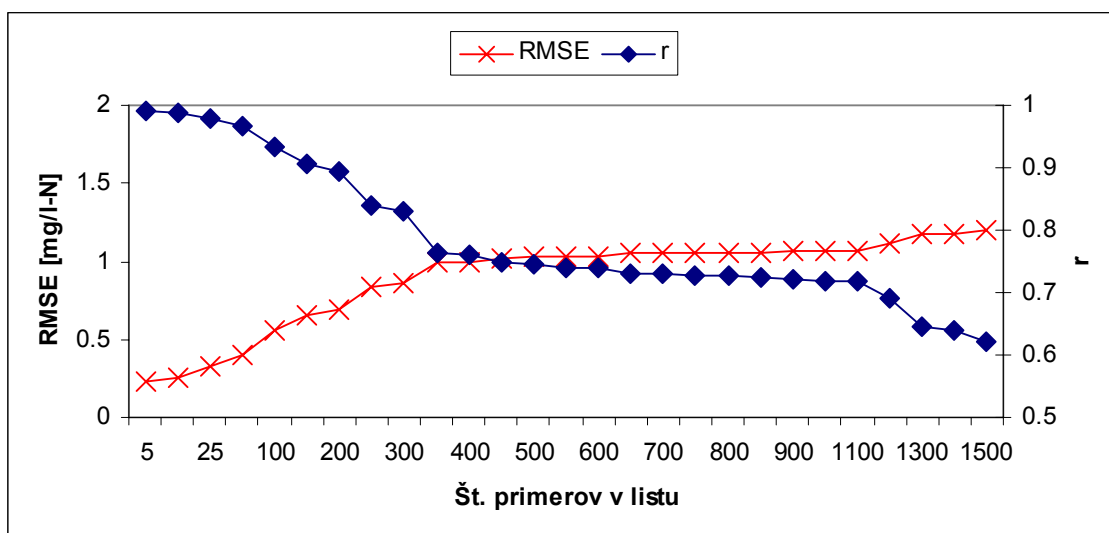
Slika 6.10: Nabor urnih podatkov za vsa merska obdobja.
Figure 6.10: Hourly data for the entire period of measurements.



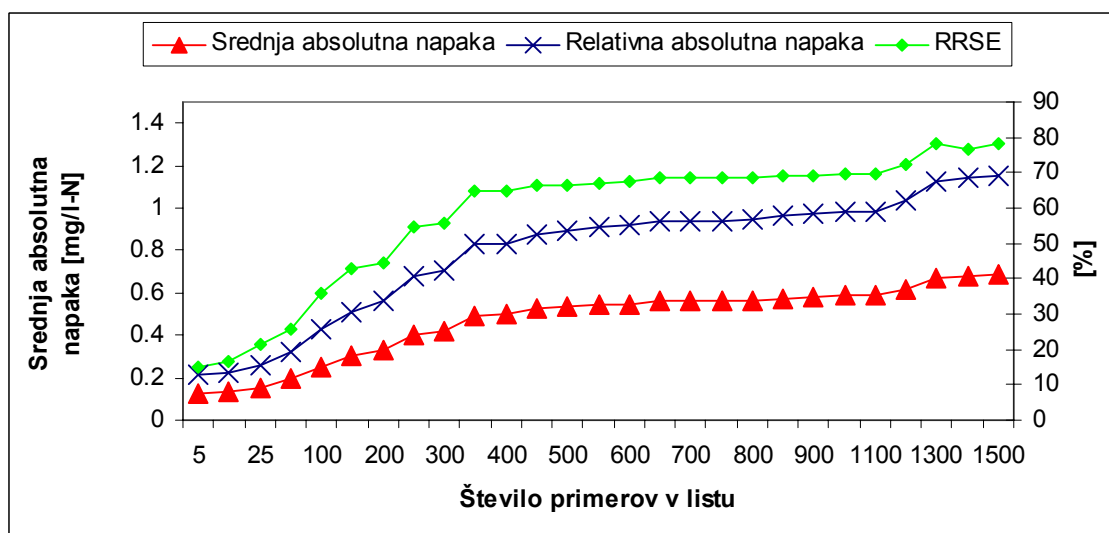
Slika 6.11: Velikost modelnih dreves v odvisnosti od števila primerov v listu.
Figure 6.11: Size of the model trees as a function of the number of instances in a leaf.

V primeru majhnega števila primerov v listu so modelna drevesa zelo velika, saj se skuša algoritem čim bolj prilagoditi opazovani dinamiki koncentracije nitratnega dušika. Z večanjem kriterija števila primerov v listu število listov hitro upada, skladno s tem pa se niža

tudi napovedna učinkovitost modelnih dreves. Kot je razvidno iz slik 6.12 in 6.13 je po začetnem hitrejšem upadu napovedne učinkovitosti z večanjem števila primerov v listu do okoli števila 300, nadaljnje upadanje napovedne učinkovitosti modelnih dreves zelo upočasnjeno. Vzrok za to so sušna obdobja znotraj podatkovnega niza z rahlo spremenljivo koncentracijo nitratnega dušika, ki jo uspejo modelna drevesa z večjim številom primerov v listu še vedno zelo uspešno napovedati, manj uspešna pa so pri napovedovanju koncentracije nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov.



Slika 6.12: Napovedna uspešnost modelnih dreves (vrednosti RMSE in r).
 Figure 6.12: Predicting performance of the model trees (values of RMSE and r).



Slika 6.13: Napovedna uspešnost modelnih dreves (vrednosti srednje absolutne napake, relativne absolutne napake in napake RRSE).
 Figure 6.13: Predicting performance of the model trees (values of mean absolute error, relative absolute error and RRSE).

Z nadaljnjim zviševanjem kriterija števila primerov v listu ostajajo modelna drevesa precej velika. Modelno drevo, generirano na podlagi kriterija 600 primerov v listu, ima še vedno 15 listov, njegova napovedna uspešnost pa je naslednja: napaka RMSE = 1,03 mg/l-N; koeficient korelacije $r = 0,74$; srednja absolutna napaka = 0,55 mg/l-N; relativna absolutna napaka = 55,08 %; napaka RRSE = 67,24 %. Modelno drevo MD600 je shematsko prikazano v preglednici 6.4 (levo). V desnem stolpcu preglednice so zapisane linearne regresijske enačbe (modeli), ki se nahajajo v listih modelnega drevesa.

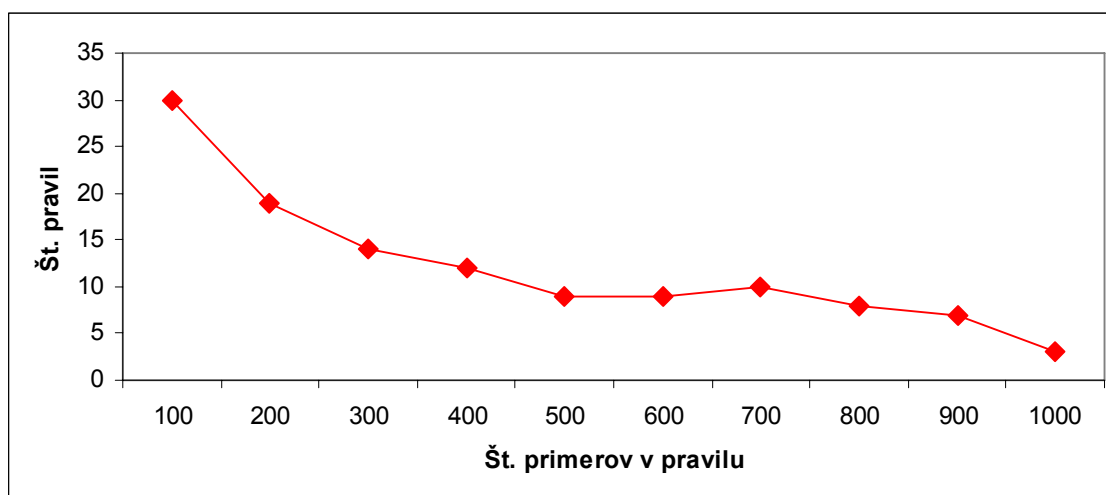
Preglednica 6.4: Shematski prikaz modelnega drevesa MD600 (levo) in seznam linearnih regresijskih enačb (modelov), ki se nahajajo v listih.

Table 6.4: Schematic representation of MD600 model tree (left) and a list of linear regression equations (models) which are in the leaves.

Shema regresijskega drevesa	Linearne regresijske enačbe (modeli)
Nivo delitve (vozlišča)	
1 2 3 4 5 6	
↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	
IPP7 ≤ 15.85 :	
Q ≤ 0.1 :	
IPP14 ≤ 0.315 : <u>LM1</u>	<u>LM1</u> : $NO_3 = -0.0031 * Q + 0.0011 * P_{sum24h} - 0.0007 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0002 * IPP14 - 0.0001 * avgT1 - 0.0008 * avgT3 + 0.0003 * avgT7 - 0.0008 * avgT14 + 1.2964$
IPP14 > 0.315 :	
Psum24h ≤ 1.7 :	
avgT7 ≤ 22.065 : <u>LM2</u>	<u>LM2</u> : $NO_3 = -0.0031 * Q + 0.0011 * P_{sum24h} - 0.0007 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0004 * IPP14 - 0.0001 * avgT1 - 0.0008 * avgT3 + 0.0006 * avgT7 - 0.0008 * avgT14 + 1.0193$
avgT7 > 22.065 : <u>LM3</u>	<u>LM3</u> : $NO_3 = -0.0031 * Q + 0.0011 * P_{sum24h} - 0.0007 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0004 * IPP14 - 0.0001 * avgT1 - 0.0008 * avgT3 + 0.0006 * avgT7 - 0.0008 * avgT14 + 1.1285$
Psum24h > 1.7 : <u>LM4</u>	<u>LM4</u> : $NO_3 = -0.0031 * Q + 0.0017 * P_{sum24h} - 0.0007 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0004 * IPP14 - 0.0001 * avgT1 - 0.0008 * avgT3 + 0.0011 * avgT7 - 0.0008 * avgT14 + 1.2118$
Q > 0.1 :	
avgT14 ≤ 10.915 :	
avgT3 ≤ 8.665 : <u>LM5</u>	<u>LM5</u> : $NO_3 = -0.0025 * Q + 0.0003 * P_{sum24h} - 0.0005 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0004 * IPP14 - 0.0008 * avgT1 - 0.0013 * avgT3 + 0.0005 * avgT7 - 0.0002 * avgT14 + 1.9499$
avgT3 > 8.665 : <u>LM6</u>	<u>LM6</u> : $NO_3 = -0.0025 * Q + 0.0003 * P_{sum24h} - 0.0005 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0004 * IPP14 - 0.0008 * avgT1 - 0.0013 * avgT3 + 0.0005 * avgT7 - 0.0002 * avgT14 + 1.7767$
avgT14 > 10.915 :	
avgT1 ≤ 13.655 : <u>LM7</u>	<u>LM7</u> : $NO_3 = 0.0207 * Q + 0.0003 * P_{sum24h} - 0.0007 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0004 * IPP14 - 0.0027 * avgT1 - 0.0005 * avgT3 + 0.0005 * avgT7 - 0.0003 * avgT14 + 2.6727$
avgT1 > 13.655 :	
Q ≤ 0.115 : <u>LM8</u>	<u>LM8</u> : $NO_3 = 0.0516 * Q + 0.0003 * P_{sum24h} - 0.0012 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0004 * IPP14 - 0.0017 * avgT1 - 0.0005 * avgT3 + 0.0005 * avgT7 - 0.0003 * avgT14 + 1.3196$
Q > 0.115 :	
IPP5 ≤ 0.23 : <u>LM9</u>	<u>LM9</u> : $NO_3 = 0.0255 * Q + 0.0003 * P_{sum24h} - 0.0016 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0004 * IPP14 - 0.0017 * avgT1 - 0.0005 * avgT3 + 0.0005 * avgT7 - 0.0003 * avgT14 + 1.6336$
IPP5 > 0.23 : <u>LM10</u>	<u>LM10</u> : $NO_3 = 0.0255 * Q + 0.0003 * P_{sum24h} - 0.0012 * IPP5 + 0.0003 * IPP7 + 0.0004 * IPP14 - 0.0017 * avgT1 - 0.0005 * avgT3 + 0.0005 * avgT7 - 0.0003 * avgT14 + 1.8627$
IPP7 > 15.85 :	
avgT14 ≤ 12.915 : <u>LM11</u>	<u>LM11</u> : $NO_3 = 0.0036 * Q + 0.0004 * P_{sum24h} - 0.0002 * IPP5 + 0.0006 * IPP7 + 0.0023 * IPP14 - 0.0002 * avgT1 - 0.0002 * avgT3 + 0.0004 * avgT7 - 0.0058 * avgT14 + 5.0327$
avgT14 > 12.915 :	
IPP14 ≤ 43.145 :	
IPP14 ≤ 25.855 : <u>LM12</u>	<u>LM12</u> : $NO_3 = -0.0036 * Q + 0.0004 * P_{sum24h} - 0.0002 * IPP5 + 0.0006 * IPP7 + 0.0039 * IPP14 - 0.0002 * avgT1 - 0.0002 * avgT3 + 0.0004 * avgT7 - 0.0002 * avgT14 + 1.7438$
IPP14 > 25.855 :	
avgT14 ≤ 19.215 : <u>LM13</u>	<u>LM13</u> : $NO_3 = -0.0036 * Q + 0.0004 * P_{sum24h} - 0.0002 * IPP5 + 0.0006 * IPP7 + 0.0029 * IPP14 - 0.0002 * avgT1 - 0.0002 * avgT3 + 0.0004 * avgT7 + 0.0024 * avgT14 + 2.4739$
avgT14 > 19.215 : <u>LM14</u>	<u>LM14</u> : $NO_3 = -0.0036 * Q + 0.0004 * P_{sum24h} - 0.0002 * IPP5 + 0.0006 * IPP7 + 0.0029 * IPP14 - 0.0002 * avgT1 - 0.0002 * avgT3 + 0.0004 * avgT7 + 0.0104 * avgT14 + 3.6166$
IPP14 > 43.145 : <u>LM15</u>	<u>LM15</u> : $NO_3 = -0.0036 * Q + 0.0004 * P_{sum24h} - 0.0002 * IPP5 + 0.0006 * IPP7 + 0.004 * IPP14 - 0.0002 * avgT1 - 0.0002 * avgT3 + 0.0004 * avgT7 + 0.0015 * avgT14 + 4.2923$

Klasifikacijski kriterij, ki je bil izbran v korenskem vozlišču na prvem nivoju delitve, je IPP_7 . Glede na vrednost delitvenega atributa $IPP_7 = 15,9$ mm padavin opredeljeni veji modelnega drevesa opisujeta primere manjše hidrološke namočenosti prispevnega območja ($IPP_7 \leq 15,9$ mm) ter primere velike hidrološke namočenosti prispevnih površin ($IPP_7 > 15,9$ mm). Na drugem nivoju delitve sta kot delitvena kriterija izbrana pretok Q , in sicer vrednost $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, ter $avgT14$ pri vrednosti $12,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Pretok Q postane pomemben delitveni kriterij za napovedovanje koncentracije nitratnega dušika v sušnih obdobjih, ko je tako spremenljivost koncentracije nitratnega dušika kot tudi pretoka v vodotoku zelo majhna, z manjšanjem velikosti baznega odtoka pa upada tudi koncentracija nitratnega dušika v vodotoku. V smislu domenskega poznavanja dinamike spiranja nitratnega dušika nam modelno drevo MD600 ne nudi novih informacij glede na modelno drevo MD125, s katerim smo analizirali padavinske dogodke v prejšnjem poglavju.

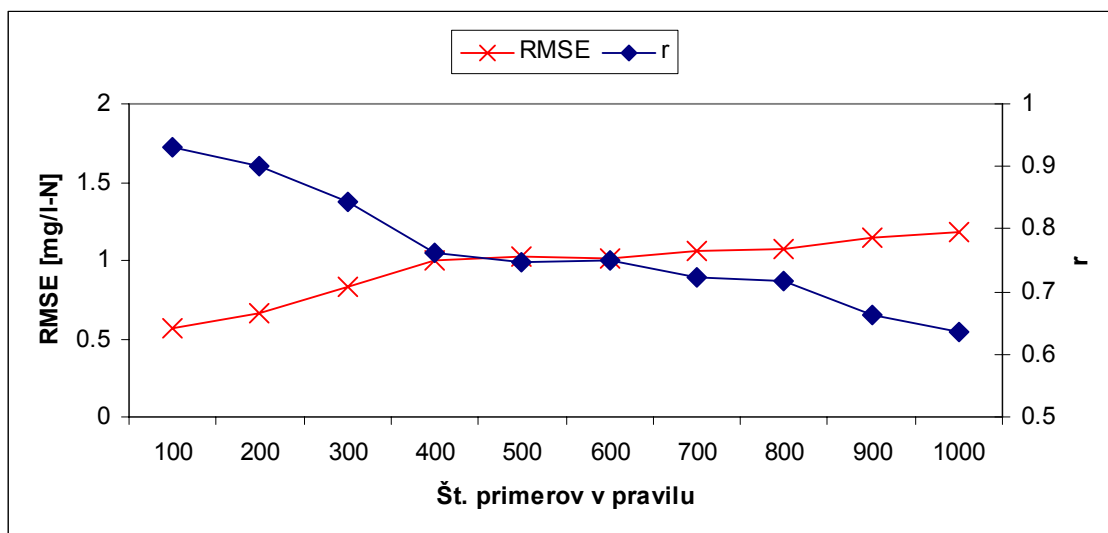
Modelno drevo MD600 je z aplikativnega vidika možnosti napovedovanja odziva koncentracije nitratnega dušika v vodotoku v različnih hidroloških in sezonskih okvirih še vedno zelo obsežno, zato smo se odločili analizirati podatkovni nabor še z različico algoritma M5, ki omogoča na podlagi modelnih dreves pridobiti nize klasifikacijskih pravil. Število klasifikacijskih pravil znotraj pridobljenih nizov v odvisnosti od kriterija števila primerov, ki jih posamezno klasifikacijsko pravilo vsebuje, je prikazano na sliki 6.14.



Slika 6.14: Število klasifikacijskih pravil v odvisnosti od števila primerov v posameznem klasifikacijskem pravilu.

Figure 6.14: Number of the classification rules related to the number of instances in a classification rule.

Za razliko od kontinuiranega zmanjševanja števila listov z naraščajočim številom primerov v posameznem listu pri pridobljenih modelnih drevesih (slika 6.11) v primeru nizov klasifikacijskih pravil vidimo, da pride tudi do naraščanja števila pravil z naraščajočim številom primerov v posameznem listu (slika 6.14). V primeru klasifikacijskih pravil, pridobljenih s kriterijem 600 primerov v pravilu (KP600), je število klasifikacijskih pravil 9, v primeru kriterija 700 primerov v pravilu pa 10. Niz klasifikacijskih pravil KP600 pa obenem predstavlja manjši lokalni maksimum napovedne učinkovitosti (sliki 6.15), saj je njegova napovedna učinkovitost boljša kot v primeru 500 oz. 700 primerov. Napovedna uspešnost niza klasifikacijskih pravil KP600 je naslednja: napaka RMSE = 1,02 mg/l-N; koeficient korelacije $r = 0,75$; srednja absolutna napaka = 0,56 mg/l-N; relativna absolutna napaka = 57,17 %; napaka RRSE = 66,13 %.



Slika 6.15: Napovedna uspešnost nizov klasifikacijskih pravil (vrednosti RMSE in r).
Figure 6.15: Predicting performance of the classification rules (values of RMSE and r).

Modelno drevo MD600 in niz klasifikacijskih pravil KP600 sta z vidika napovedne uspešnosti povsem primerljiva, vendar modelno drevo MD600 vsebuje 15 listov, niz klasifikacijskih pravil KP600 pa zgolj 9 klasifikacijskih pravil, ki so podana v preglednici 6.5. Če pozorno pogledamo linearne regresijske enačbe v modelnem drevesu MD600 in nizu klasifikacijskih pravil KP600, vidimo, da so nekatere povsem enake, saj nekatera klasifikacijska pravila dejansko predstavlja list regresijskega drevesa (npr. 1. list regresijskega drevesa in 1. klasifikacijsko pravilo v nizu klasifikacijskih pravil KP600), medtem ko večino preostalih klasifikacijskih pravil predstavlja nekakšne skupke listov v modelnem drevesu MD600.

Preglednica 6.5: Nabor niza klasifikacijskih pravil KP600 in seznam linearnih regresijskih enačb (modelov), ki napovedujejo primere znotraj posameznega pravila.

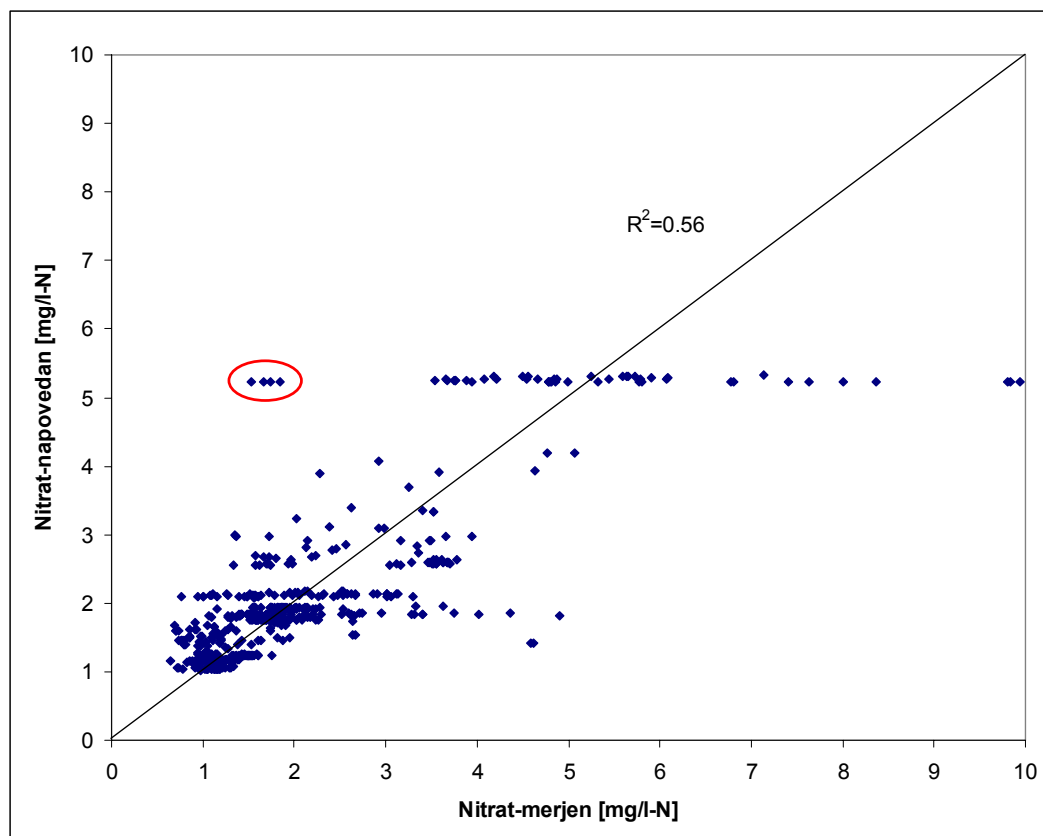
Table 6.5: List of classification rules KP600 and a list of linear regression equations (models) used for the prediction of instances classified to a particular rule.

Številka pravila	Klasifikacijski kriteriji	Linearne regresijske enačbe (modeli)
1	IPP7 <= 15.85 Q <= 0.1 IPP14 <= 0.315	NO3 = -0.0031 *Q+0.0011*Psum24h-0.0007*IPP5+0.0003*IPP7 +0.0002* IPP14-0.0001*avgT1-0.0008* avgT3+0.0003*avgT7 +0.0008 *avgT14+ 1.2964
2	IPP7 <= 15.85 Q <= 0.1 Psum24h <= 1.7 avgT7 <= 22.065	NO3 = -0.0056*Q+0.0009*Psum24h+0.0003*IPP7+0.0001*IPP14 -0.0003* avgT1-0.0007*avgT3+0.0006*avgT7-0.0009*avgT14+1.0263
3	IPP7 <= 15.85 avgT14 > 10.915 avgT1 > 13.64 Q <= 0.115	NO3 = 0.0371*Q-0.0007*IPP5+0.0002*IPP7+0.0002*IPP14-0.0018 *avgT1+ 0.0005*avgT3-0.0003*avgT14+1.2406
4	IPP7 <= 15.85 avgT14 > 10.915 IPP14 <= 6.52	NO3 =1.2011*Q+0.0001*IPP7+0.0018*IPP14-0.0006*avgT3-0.0001 *avgT14+ 1.504
5	avgT7 > 9.705 IPP14 > 25.855 IPP14 <= 44.155	NO3 =0.0388*Psum24h+0.0024*IPP14+0.0008*avgT7-0.0029*avgT14 +2.5028
6	avgT7 > 9.705 avgT14 > 11.34 IPP5 <= 31.285	NO3 = 0.0024*IPP5-0.0008*avgT3+0.0014*avgT7-0.0103* avgT14 +1.7771
7	avgT7 <= 10.69	NO3 = -0.0101*avgT3+0.005*avgT7+0.0693*avgT14+1.4566
8	avgT14 > 10.6 avgT14 <= 15.405	NO3 = 0.0069*avgT14+3.3727
9	Ostali primeri	NO3 = 0.0058*avgT14+5.2327

Za klasifikacijo in napovedovanje koncentracije nitratnega dušika niso bili uporabljeni vsi atributi, ki smo jih vključili v začetni nabor. Med atributi, s katerimi smo skušali opisati lastnosti posameznih padavinskih dogodkov, se pojavi zgolj vsota padavin Psum_{24h} ter pretok Q. Pri napovedovanju koncentracij nitratnega dušika z nizom klasifikacijskih pravil KP600 imajo pomembno vlogo vrednosti IPP₅ do IPP₁₄ ter temperaturne razmere v predhodnih obdobjih.

Primerjava med merjenimi koncentracijami nitratnega dušika in koncentracijami, napovedanimi z nizom klasifikacijskih pravil KP600, na podlagi navzkrižnega preverjanja je predstavljena na sliki 6.16. Niz klasifikacijskih pravil uspešno napoveduje nizke do srednje koncentracije nitratnega dušika (do 4 mg/l-N), čeprav lahko tudi v tem območju koncentracije pride do znatnih napak (rdeči krogec na sliki 6.16). Napovedna uspešnost višjih koncentracij

nitratnega dušika drastično pade, kar je razvidno iz raztrosa merjenih koncentracij napram napovedanim koncentracijam nitratnega dušika in vpliva na nižjo vrednost koeficienta korelacije ($r = 0,75$).



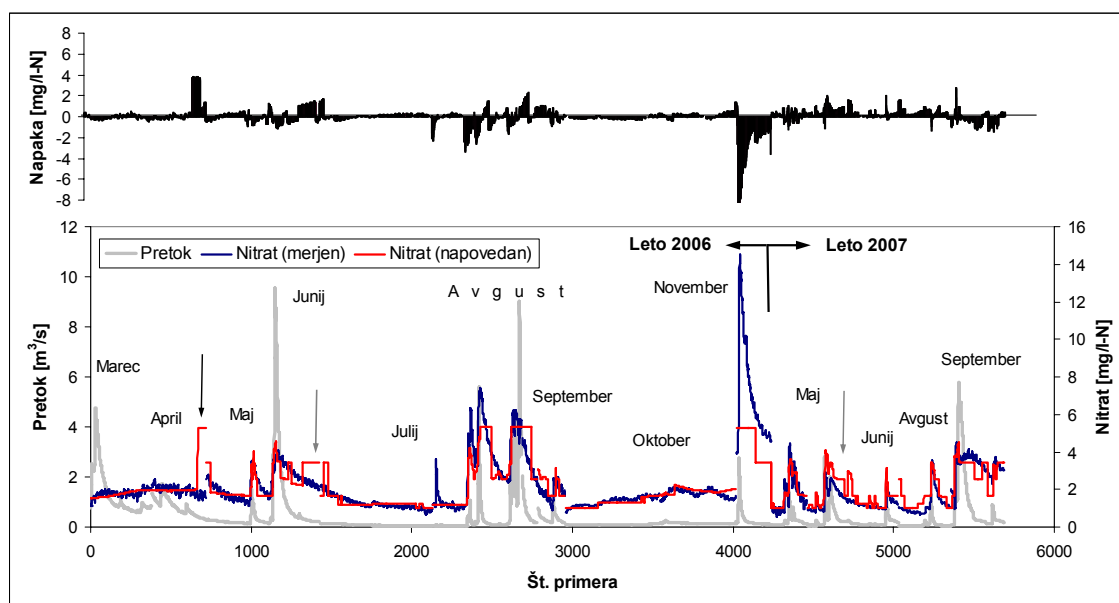
Slika 6.16: Merjene koncentracije nitratnega dušika napram koncentracijam napovedanim z nizom klasifikacijskih pravil KP600.

Figure 6.16: Measured nitrate concentrations vs. predicted nitrate concentrations by classification rules KP600.

Podobno kot v primeru modelnega drevesa MD125, s katerim smo v prejšnjem poglavju napovedovali koncentracijo nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov, je napovedna uspešnost niza klasifikacijskih pravil KP600 najslabša v obdobjih najvišjih koncentracij nitratnega dušika, ki so prisotne zelo kratek čas znotraj celotnega merskega obdobja. Posledično je število primerov, na podlagi katerih algoritem M5 napoveduje konične koncentracije nitratnega dušika, majhno. Največje napake se pojavijo v času padavinskega dogodka v novembru 2006, vzroki za to pa so enaki kot v primeru aplikacije modelnega drevesa MD125 za napovedovanje koncentracije nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov. Klasifikacijski niz, pridobljen na podlagi kriterija 600 primerov v pravilu je preveč robusten, da bi uspešneje napovedoval variabilnost najvišjih merjenih koncentracij nitratnega

dušika, saj uspe napovedati maksimalno koncentracijo le okoli 5,3 mg/l-N. Z nižjim kriterijem števila primerov v posameznem klasifikacijskem pravilu bi sicer dosegli izboljšanje napovedne uspešnosti v času padavinskih dogodkov, vendar bi hkrati dopustili večje prilagajanje oz. pretreniranost algoritma na specifične hidrološke razmere. Ob tem pa bi bilo bolj vprašljivo obnašanje takšnega niza klasifikacijskih pravil ali modelnega drevesa v primeru drugačnih padavinskih dogodkov, kar je bilo razvidno iz aplikacije modelnega drevesa MD125 v drugačnih sezonskih in hidroloških okvirih.

V hidrološko in biogeokemijsko manj burnih obdobjih je napovedna uspešnost niza klasifikacijskih pravil dobra, napaka, določena kot razlika med napovedano in merjeno koncentracijo nitratnega dušika, le redko preseže 2 mg/l-N (slika 6.17). V sušnih obdobjih ter večini hladnejšega obdobja v zgodnjepomladanskem času, v katerem sprememba hidroloških razmer ni imela bistvenega vpliva na spremenljivost koncentracije nitratnega dušika v vodotoku, je napaka pod 1 mg/l-N. Hkrati pa lahko na sliki 6.17 vidimo, da model predvidi nenadne spremembe v koncentraciji nitratnega dušika, ki so z vidika domenskega poznavanja hidrološko pogojene dinamike spiranja nitratnega dušika nelogične. Te spremembe v napovedani koncentraciji nitratnega dušika so posledica razmer znotraj posameznih primerov, ki ob določeni vrednosti atributa privedejo do njihove nepravilne klasifikacije ter posledične umestitve v, z domenskega vidika, napačno klasifikacijsko pravilo. Najbolj izstopajoč takšen primer je konec merskega obdobja v aprilu 2006 (črna puščica na sliki 6.18 ter primeri znotraj rdečega kroga na sliki 6.16). Na podlagi klasifikacijskih kriterijev so bili primeri iz omenjenega obdobja umeščeni v neprimerno klasifikacijsko pravilo. V konkretnem primeru je na spremembo klasifikacije ter posledično slabo napoved koncentracije nitratnega dušika v obravnavanem obdobju aprila 2006 vplivala sprememba temperature $avgT_7$, ki je presegla vrednost 10,7 °C, ki je upoštevana v 7. klasifikacijskem pravilu (preglednica 6.5).



Slika 6.17: Primerjava merjenih koncentracij nitratnega dušika v letih 2006 in 2007 ter koncentracij, napovedanih z nizom klasifikacijskih pravil KP600.

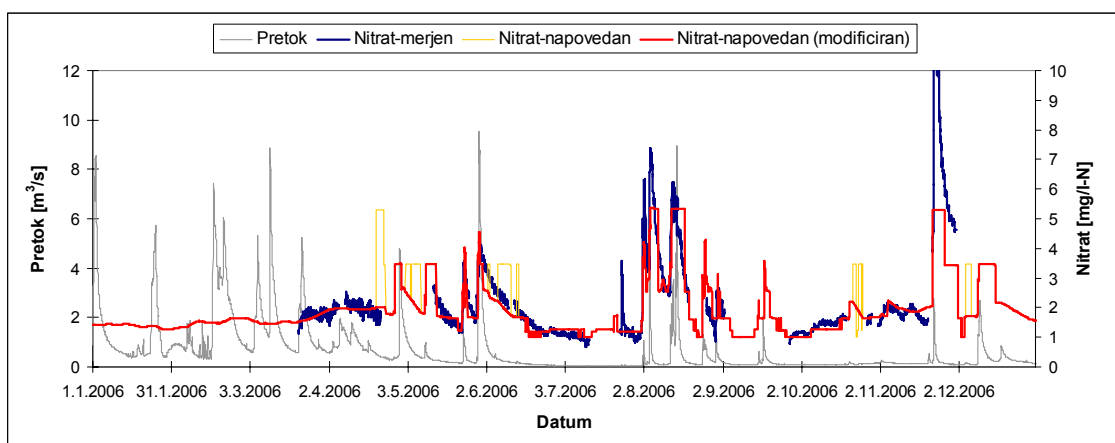
Figure 6.17: Comparison of measured nitrate concentrations in 2006 and 2007 and nitrate concentrations predicted by classification rules KP600.

Podobne nenadne preskoke v napovedani koncentraciji nitratnega dušika, ki pa niso tako izraziti kot v aprilu 2006, lahko opazimo tudi v padajočih delih hidrograma v mesecu juniju 2006 in maju 2007 (sivi puščici na sliki 6.17). Da bi pridobili bolj verodostojne podatke o količini spranega nitratnega dušika s prispevnega območja Padeža v daljših časovnih okvirih, bi bilo smiselno na podlagi domenskega poznavanja hidrološko in sezonsko pogojene dinamike spiranja takšne očitno nepravilne napovedi koncentracije izločiti. Najpreprosteje je dvomljive napovedi koncentracije nitratnega dušika prilagoditi glede na objektivno realnejše napovedi v predhodnem ali sledečem obdobju z linearno interpolacijo, kar smo naredili v nadaljevanju.

6.3.3 Maska bilanca spranega nitratnega dušika

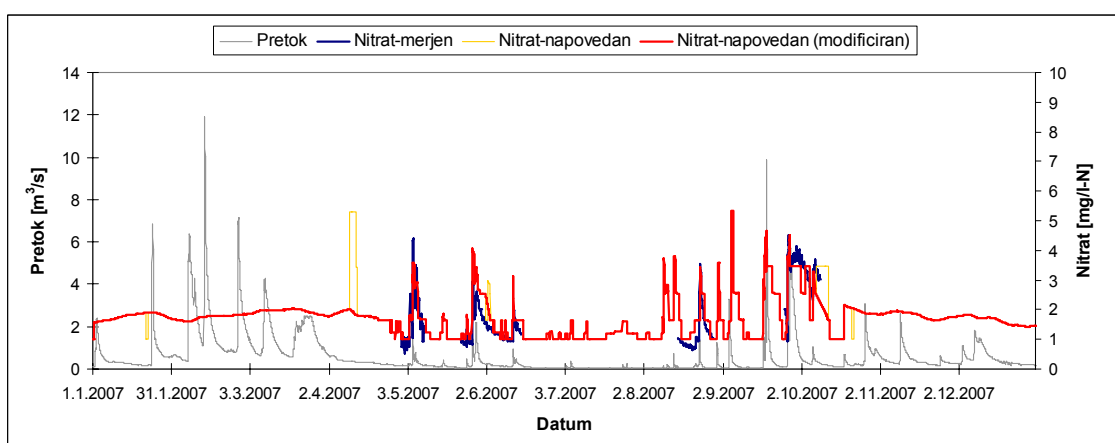
Na osnovi pridobljenega niza klasifikacijskih pravil KP600 (preglednica 6.5) predstavljamo v nadaljevanju opredelitev masne bilance spranega nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja Padeža v letih 2006 in 2007, za katera imamo na razpolago hidrološke in meteorološke podatke, ki omogočajo aplikacijo niza klasifikacijskih pravil. Niz klasifikacijskih pravil nam navkljub svoji robustnosti, ki je razvidna predvsem v času velike hidrološke spremenljivosti, omogoča dobro napoved koncentracije nitratnega dušika v

različnih sezonskih in hidroloških okvirih. Dodatno nam poznavanje pričakovane dinamike spiranja na podlagi obsežnega nabora merjenih odzivov koncentracije nitratnega dušika znotraj teh okvirjev omogoča identifikacijo jasnih nepravilnosti v napovedi, ki so posledica nenadnih prehodov med striktno definiranimi mejami klasifikacijskimi pravili. Na slikah 6.18 in 6.19 so prikazane pretočne razmere v strugi Padeža in merjene koncentracije nitratnega dušika v vodotoku znotraj celotnega obdobja let 2006 in 2007. V rdeči barvi so prikazane napovedane koncentracije nitratnega dušika v vodotoku z nizom klasifikacijskih pravil KP600, ob čemer so očitne nepravilnosti v napovedi (rumeno obarvane) prilagojene glede na predhodne in sledeče realnejše napovedi koncentracije nitratnega dušika.



Slika 6.18: Pretočne razmere, merjene in napovedane koncentracije nitratnega dušika znotraj celotnega obdobja leta 2006.

Figure 6.18: Stream discharges, measured and predicted nitrate concentrations within 2006.

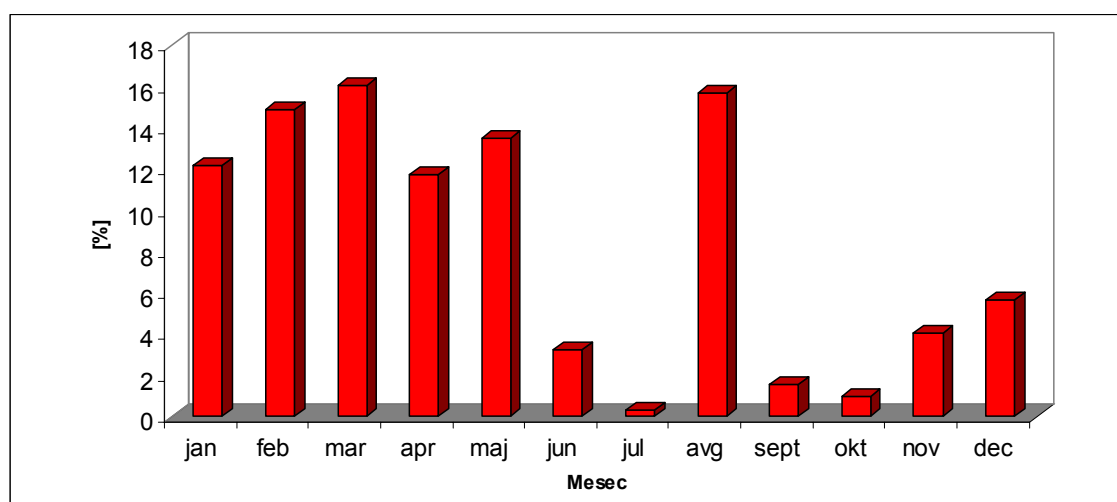


Slika 6.19: Pretočne razmere, merjene in napovedane koncentracije nitratnega dušika znotraj celotnega obdobja leta 2007.

Figure 6.19: Stream discharges, measured and predicted nitrate concentrations within 2007.

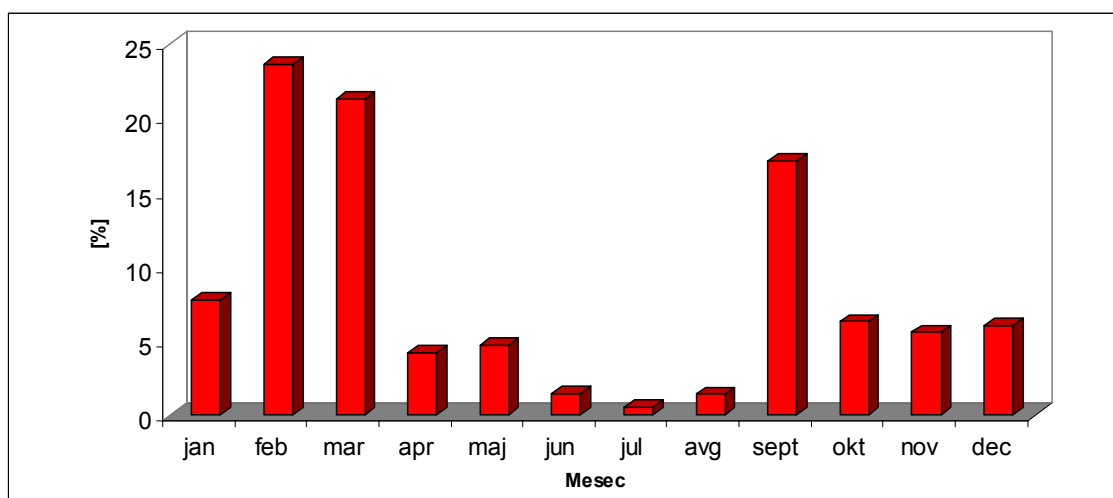
Kot je razvidno iz slik 6.18 in 6.19, predvidi uporabljeni niz klasifikacijskih pravil KP600 zelo majhno odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene pretočne razmere v zimskem času, navkljub veliki dinamiki pretočnih razmer. V zimskem obdobju se koncentracija nitratnega dušika giblje okoli 1,5 mg/l-N. Dejansko je glede na strukturo uporabljenega niza klasifikacijskih pravil celotno zimsko obdobje upoštevano s klasifikacijskim pravilom št. 7 (preglednica 6.5), v katerem kot spremenljivke nastopajo zgolj temperature zraka v predhodnih obdobjih.

Na podlagi napovedanih koncentracij nitratnega dušika znaša skupna masna bilanca nitratnega dušika, spranega po strugi Padeža, v letu 2006 10,2 kg/ha, v letu 2007 pa 8,8 kg/ha. Bilanca spranega nitratnega dušika po posameznih mesecih, izražena v deležih letne masne bilance, je prikazana na slikah 6.20 in 6.21. Visoke deleže k skupnemu letnemu odtoku nitratnega dušika v letu 2006 so prispevali zimski in zgodnjеспomladanski meseci (januar, februar in marec) pa tudi meseca april in maj. V letu 2007 sta visoke deleže prispevala predvsem februar in marec. Ta obdobja so bila izrazito namočena, niz klasifikacijskih pravil KP600 je v teh obdobjih predvidel majhno odzivnost koncentracije nitratnega dušika na zelo spremenljive pretočne razmere. Žal ta obdobja niso bila detajlno pokrita z zveznimi meritvami, kot je bilo to v primeru spomladanskih, poletnih in jesenski mesecev, kar bi omogočilo realnejšo oceno praznjenja zaloge nitratnega dušika od jesenskega in zimskega obdobja proti zgodnje spomladanskem obdobju.



Slika 6.20: Deleži letne masne bilance spranega nitratnega dušika po posameznih mesecih v letu 2006.

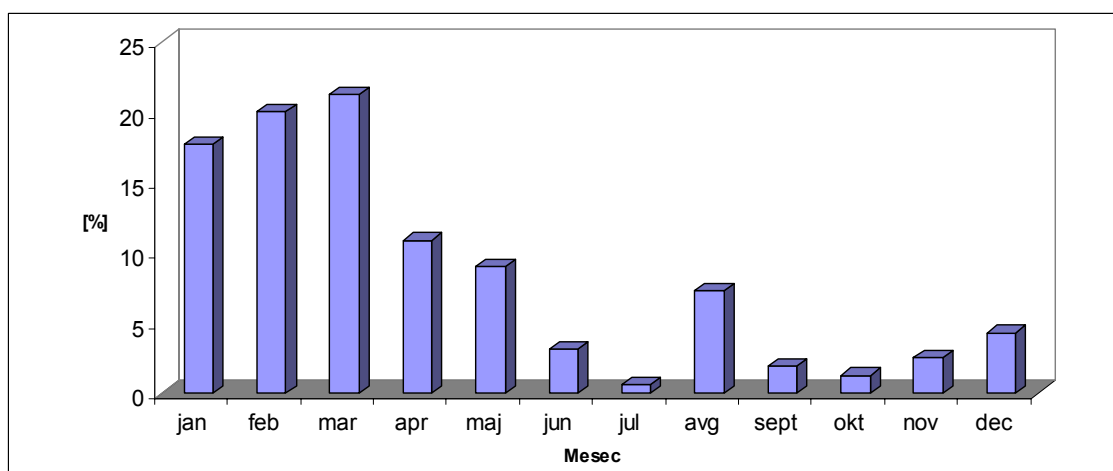
Figure 6.20: Monthly shares of flushed nitrate annual flux in 2006.



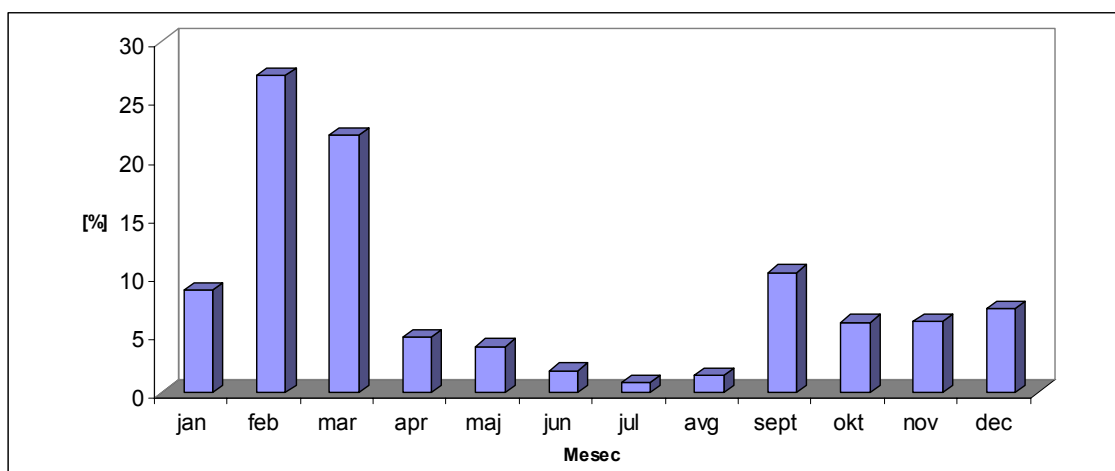
Slika 6.21: Deleži letne masne bilance spranega nitratnega dušika po posameznih mesecih v letu 2007.
Figure 6.21: Monthly shares of flushed nitrate annual flux in 2007.

Medtem ko je prispevek sušnih poletnih mesecev k skupni količini spranega nitratnega dušika praktično zanemarljiv, pa v primeru izdatnejših padavin v poletnem obdobju prispevek posameznega meseca k skupni količini spranega nitratnega dušika izrazito naraste (primer avgusta leta 2006 in septembra leta 2007).

Pomemben prispevek padavinskih dogodkov v poletnem in jesenskem času k skupni količini spranega nitratnega dušika je dodatno razviden iz primerjave deležev mesečnih količin spranega nitratnega dušika v celotni letni količini spranega nitratnega dušika (sliki 6.20 in 6.21) ter deležev mesečnih količin odtoka v skupni letni količini odtoka vode po strugi Padeža (sliki 6.22 in 6.23) za leti 2006 in 2007.



Slika 6.22: Deleži letne masne bilance odtoka vode po Padežu za posamezne mesece v letu 2006.
Figure 6.22: Monthly shares of annual Padež stream outflow in 2006.



Slika 6.23: Deleži letne masne bilance odtoka vode po Padežu za posamezne mesece v letu 2007.

Figure 6.23: Monthly shares of annual Padež stream outflow in 2007.

Za zimske in zgodnjеспomladanske mesece v obravnavanem obdobju je ob precejšnjih količinah padavin ter majhnih padavinskih izgubah posledično tudi prispevek teh obdobj k skupni količini spranega nitratnega dušika velik. Po drugi strani je delež spranega nitratnega dušika v mesecu avgustu 2006 v skupni letni količini 16 % (slika 6.20), delež odtoka v skupnem letnem odtoku vode po strugi pa zaradi velikih padavinskih izgub v poletnem času zgolj 7 % (slika 6.22). Podobno je mesec september v letu 2007 k skupnemu letnemu odtoku prispeval 10 % delež (slika 6.23), njegov delež v skupni letni bilanci spranega nitratnega dušika pa je 17 % (slika 6.21).

Kot je bilo omenjeno že pri obravnavi hidroloških karakteristik merskega obdobja v 4. poglavju, je bil navkljub nekoliko manjši količini padavin v letu 2006 (1055 mm) napram letu 2007 (1106 mm) odtok s prispevnega območja Padeža v letu 2006 večji kot v letu 2007. Razliko v letnih količinah spranega nitratnega dušika v letih 2006 in 2007 lahko delno pripišemo različni količini odtoka s prispevnega območja, nedvomno pa ima na spremenljivost letne količine spranega nitratnega dušika velik vpliv sezonska razporeditev padavin. V letu 2006 so bila sezonsko biogeokemijsko najaktivnejša obdobja (poznospomladansko in poletno obdobje) občutno bolj namočena kot v letu 2007.

Glede na dejstvo, da sta bili opazovani leti 2006 in 2007 relativno sušni, spremenljivost letne količine padavin majhna in da na podlagi meritev lahko prepoznamo splošno pozitivno, sicer močno sezonsko spremenljivo soodvisnost med količino odtoka in koncentracijo nitratnega

dušika v vodotoku, lahko sklepamo, da se bo v primeru večjih letnih količin padavin ter posledično večjega odtoka s prispevnega območja sprala večja količina nitratnega dušika. Dodatno lahko k povečanju količine spranega nitratnega dušika prispeva sezonska razporeditev padavin v sezonsko biogeokemijsko aktivnih obdobjih, torej predvsem izdatnejši padavinski dogodki v pozno spomladanskem, poletnem in jesenskem času.

7 ZAKLJUČEK

V okviru naloge smo obravnavali časovno dinamiko spiranja nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja potoka Padež. V letih 2006 in 2007 smo spremljali hidrometeorološke razmere na prispevnem območju (količino padavin, temperaturne razmere, odtok s prispevnega območja), ki smo jih periodično dopolnili z zveznimi meritvami koncentracije nitratnega dušika v vodotoku. Osrednji del naloge tako predstavljajo terenske meritve, katerih rezultat je obsežen nabor podatkov.

Na osnovi rezultatov in analize meritev je razviden signifikanten vpliv hidroloških razmer na dinamiko sproščanja hranil z obravnavanega prispevnega območja znotraj sezonskih biogeokemijskih okvirjev, kar potrjuje hipotezo, postavljeno v uvodnem poglavju naloge. Visoka časovna frekvenca zajema podatkov o koncentracijah nitratnega dušika nam je omogočila vpogled v hidrološko pogojeno mobilizacijo nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov v različnih sezonskih biogeokemijskih razmerah, ki odločilno vplivajo na velikost zaloge nitratnega dušika. Ob tem smo prispevno območje Padeža obravnavali kot hidrološko in biogeokemijsko celoto, prevladujoč poudarek v raziskavi je bil na časovni dinamiki dogajanja.

Z zveznimi meritvami koncentracije nitratnega dušika v vodotoku v času padavinskih dogodkov smo razkrili precejšnjo, a spremenljivo odzivnost koncentracije nitratnega dušika na nestalne hidrološke razmere. Navkljub pestrosti opazovanih hidroloških razmer se v merjenih koncentracijah nitratnega dušika odraža sezonski značaj, ki ima prevladujočo vlogo pri regulaciji intenzivnosti biogeokemijskih transformacij dušikovih spojin, katerih produkti se v času padavinskih dogodkov lahko mobilizirajo. Sezonsko pogojena dinamika izpiranja nitratnega dušika s prispevnih površin, ki jih pokriva gozd, je bila do sedaj v literaturi precej podrobno obdelana. Ob tem je analiza sezonskih vplivov na vsebnost raztopljenega nitratnega dušika v vodotoku večinoma omejena na hidrološko manj spremenljiva in s hidrološkega vidika manj zanimiva obdobja. Redke so raziskave, katerih namen je analizirati spremenljivost intenzitete izpiranja in spiranja produktov mineralizacije in nitrifikacije v

obdobjih posameznih padavinskih dogodkov, pri čemer večinoma manjka umestitev ter interpretacija rezultatov meritev v smislu širših sezonskih biogeokemijskih okvirjev. Med pomembnejše prispevke naloge lahko štejemo prav povezavo in združitev detajlnih časovnih opazovanj koncentracije raztopljenega nitratnega dušika v vodotoku v času posameznih padavinskih dogodkov s časovno širšim sezonskim dogajanjem.

Pridobljene podatke o dinamiki spiranja nitratnega dušika smo uporabili pri aplikaciji metod strojnega učenja, s pomočjo katerih smo napovedovali koncentracijo nitratnega dušika med posameznimi padavinskimi dogodki ter opredelili bilanco spranega nitratnega dušika v letih 2006 in 2007.

Posamezne ugotovitve so podrobneje povzete v nadaljevanju.

7.1 SEZONSKA SPREMENLJIVOST DINAMIKE SPIRANJA NITRATNEGA DUŠIKA V ČASU PADAVINSKIH DOGODKOV

Na podlagi zveznih meritev koncentracije nitratnega dušika v potoku Padež smo posredno pridobili vpogled v sezonsko spremenljivost zaloge nitratnega dušika v gozdnih tleh, kar vpliva na razpoložljivost nitratnega dušika za hidrološko mobilizacijo v obdobjih padavinskih dogodkov. V primeru zgodnjеспomladanskih padavinskih dogodkov se koncentracija nitratnega dušika ni odzivala na spremenjene hidrološke razmere, opažena dnevna dinamika izpiranja nitratnega dušika je ostala skoraj nespremenjena. Zaloga nitratnega dušika v gozdnih tleh je v tem obdobju očitno zelo majhna. V času od jesenskih, preko zimskih pa vse do zgodnje spomladanskih padavinskih dogodkov prihaja do konstantnega izpiranja nitratnega dušika, akumuliranega v gozdnih tleh. V pozno spomladanskem ter poletnem času prihaja ob dolgotrajnejši odsotnosti hidroloških mobilizacijskih mehanizmov in ugodnih biogeokemijskih temperaturnih in vlažnostnih razmerah do akumulacije nitratnega dušika v gozdnih tleh. Ob pojavu padavinskih dogodkov v teh obdobjih se nitratni dušik začne intenzivno spirati v strugo vodotoka, kar privede do precejšnje spremenljivosti koncentracij nitratnega dušika v vodotoku. Največje povečanje koncentracije nitratnega dušika smo zaznali v času jesenskega padavinskega dogodka. Gozdnato prispevno območje torej v kontekstu hidroloških mehanizmov mobilizacije nitratnega dušika sezonsko prehaja iz razmer manjšanja

zaloge nitratnega dušika v zimskem ter zgodnjеспomladanskem času v razmere viška zaloge nitratnega dušika v gozdnih tleh (pozno spomladi, poleti ter predvsem jeseni), ki očitno presega mobilizacijsko sposobnost hidroloških mehanizmov, aktivnih v obdobjih posameznih padavinskih dogodkov.

7.2 FORMACIJA HIDROGRAMOV ODTOKA NAPRAM FORMACIJI KONIČNIH KONCENTRACIJ NITRATNEGA DUŠIKA V VODOTOKU

Čeprav se opazovani padavinski dogodki močno razlikujejo tako z vidika predhodnih hidroloških razmer, količine padavin ter sezonskih biogeokemijskih razmer, je bil opažen zanimiv časovni vzorec pojavnosti koničnih koncentracij nitratnega dušika za konicami hidrogramov odtoka. Domnevamo, da opažen časovni zamik kaže na vpliv topografskih lastnosti prispevnega območja na njegovo hidrološko odzivnost in sposobnost časovne regulacije spiranja nitratnega dušika. Hidrološki odziv prispevnega območja Padeža je zelo hiter, kar se odraža na kratkih časih koncentracije padavinskega odtoka in hitri formaciji hidrogramov odtoka. Zaradi nizke hidravlične prepustnosti tal se lahko ob dodatnih količinah padavin vršijo zelo hitre spremembe nivoja zasičene cone tal. Z vzpostavitvijo območij zasičenega talnega profila se delež »nove vode« ob hitri formaciji hidrogramov odtoka občutno poveča, privede do občasnih razredčenj visokih koncentracij nitratnega dušika v obdobjih konic hidrogramov, posledično se zakasnitveni čas koničnih koncentracij nitratnega dušika v vodotoku za konicami hidrogramov odtoka podaljšuje. V konceptualni opredelitvi spiranja nitratnega dušika s prispevnega območja smo omenjeno časovno zakasnitev navezali na časovno spremenljivost prostorske razsežnosti območij zasičenega talnega profila.

7.3 SEZONSKA SPREMENLJIVOST DNEVNEGA CIKLA IZPIRANJA NITRATNEGA DUŠIKA V OBDOBJIH BREZ PADAVIN

Obdobja brez padavin so s hidrološkega vidika manj zanimiva, prav tako pa je z vidika časovne spremenljivosti na prvi pogled tudi dinamika koncentracije nitratnega dušika v teh obdobjih nezanimiva. Iz zveznih meritev koncentracije nitratnega dušika v vodotoku je razvidno, da ima izpiranje nitratnega dušika z baznim odtokom določen dnevni cikel s pojavnostjo minimalnih koncentracij nitratnega dušika pozno popoldne oz. zvečer ter maksimalnih koncentracij v jutranjem oz. dopoldanskem času. Dnevni cikel je sezonsko

spremenljiv, saj je tako časovna pojavnost dnevni minimalnih in maksimalnih koncentracij nitratnega dušika kot tudi amplituda dnevne spremenljivosti koncentracije nestalna. Z vidika določitve masnih bilanc spranega nitratnega dušika je dnevna spremenljivost koncentracije nitratnega dušika povsem zanemarljiva, po drugi strani pa kaže na tesno povezanost med vodnim telesom in nestalnimi hidrološkimi in sezonskimi biogeokemijskimi razmerami, prisotnimi na obdajajočih gozdnatih prispevnih površinah, ki regulirajo intenziteto spiranja nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov.

7.4 MODELIRANJE DINAMIKE KONCENTRACIJE NITRATNEGA DUŠIKA

Rezultat zveznega spremljanja hidrometeoroloških razmer ter kemizma vode v Padežu je obsežna baza podatkov, ki smo jo z aplikacijo metod rudarjenja po podatkih uporabili za dopolnitev ter izboljšanje našega domenskega poznavanja dinamike spiranja nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja in napovedovanje koncentracije nitratnega dušika v vodotoku. V prvi fazi smo algoritem za generiranje modelnih dreves M5 uporabili za pridobitev modela, na podlagi katerega smo skušali z naborom atributov napovedovati spremenljivost koncentracije nitratnega dušika izključno v obdobjih padavinskih dogodkov. Modelno drevo smo pridobili na osnovi analize podatkov, pridobljenih v letu 2006, nakar smo ga preizkusili v drugačnih hidroloških in sezonskih biogeokemijskih razmerah, kakršne so bile prisotne v obdobjih zabeleženih padavinskih dogodkov v letu 2007. Modelno drevo je sicer dobro prepoznalo sezonsko dinamiko ter časovne vzorce dinamike spiranja nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov, vendar opazovanja v letu 2006, na podlagi katerih smo modelno drevo pridobili, niso omogočila kvalitetne napovedi koncentracij nitratnega dušika v letu 2007. Očitno se hidrološke in sezonske biogeokemijske razmere v letu 2006 v primerjavi z razmerami v letu 2007 razlikujejo do te mere, da dinamike spiranja nitratnega dušika v obdobjih padavinskih dogodkov, prepoznane na osnovi opazovanj v letu 2006, ni mogoče direktno aplicirati na leto 2007.

V drugi fazi aplikacije metod rudarjenja po podatkih smo na osnovi celotnega nabora podatkov, ki so bili pridobljeni tako v času padavinskih dogodkov kot tudi v obdobjih brez padavin, pridobili niz klasifikacijskih pravil, ki smo ga uporabili za določitev letnih masnih

bilanc spranega nitratnega dušika v letih 2006 in 2007. Za leto 2006 znaša količina spranega nitratnega dušika po strugi vodotoka, določena z aplikacijo niza klasifikacijskih pravil, 10,2 kg/ha, za leto 2007 pa 8,8 kg/ha. V času opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006 znaša količina spranega nitratnega dušika, določena na podlagi zveznih meritev, 4 kg/ha, v letu 2007 pa 1,3 kg/ha nitratnega dušika. Izračunane količine spranega nitratnega dušika kažejo na potencialno velike prispevke gozdnatega prispevnega območja k vnosu hranil v vodotok ter s tem tudi potencialni vnos hranil v predvidena akumulacijo na potoku Suhorka. S porečij, ki jih pokriva listnati gozd s specifično vegetacijsko sestavo (vloga jelše pri fiksaciji atmosferskega dušika), se lahko v vodotoke sprostijo znatne količine dušika. Potemtakem je prispevek listnatih gozdov k vnosu dušika v vodne ekosisteme v zmernotoplem pasu pogosto podcenjen.

Največji delež k letni količini spranega nitratnega dušika so v opazovanem merskem obdobju prispevali najbolj namočeni meseci (zimski in zgodnjepomladanski meseci). S pojavnostjo večjih količin padavin v poletnem času, ko je odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene hidrološke razmere velika, postane prispevek poletnih mesecev k skupni količini spranega nitratnega dušika v posameznem letu znaten. Izrazito povečana intenziteta spiranja nitratnega dušika v poletnem času je razvidna zlasti iz primerjave prispevkov posameznih poletnih mesecev k skupni letni količini spranega nitratnega dušika in prispevkov teh mesecev k skupni letni količini odtoka vode s prispevnega območja. Na podlagi splošne pozitivne, a močno sezonsko pogojene spremenljivosti intenzitete spiranja nitratnega dušika v odvisnosti od pretočnih razmer v vodotoku lahko sklepamo, da večja količina odtoka s prispevnega območja pomeni večjo količino spranega nitratnega dušika. Ob tem pa lahko k znatnemu povečanju količine spranega nitratnega dušika prispevajo padavine v sezonsko biogeokemijsko aktivnih obdobjih, predvsem izdatnejši padavinski dogodki v poznospomladanskem, poletnem in jesenskem času. Glede na pričakovane temperaturne trende v prihodnosti ter pogostejšo pojavnost ekstremnih padavinskih dogodkov v sezonsko biogeokemijsko najaktivnejših obdobjih lahko pričakujemo povečanje količin dušika, ki se z gozdnatih prispevnih območij sprostijo v vodotoke.

7.5 USMERITVE ZA NADALJNJE DELO

Rezultati meritev, opravljenih v okviru naloge, so razkrili veliko, sezonsko pogojeno odzivnost koncentracije nitratnega dušika na padavinske dogodke. Detajlna preučitev vzajemnih sezonskih biogeokemijskih ter hidroloških mehanizmov je možna le na podlagi dolgotrajnejšega zveznega spremljanja hidroloških, meteoroloških ter biogeokemijskih razmer. Obstoječe zvezne nize meritev bi bilo potrebno nadaljevati, saj bi le na ta način bilo možno preveriti, dopolniti in izboljšati tako konceptualno razumevanje spiranja nitratnega dušika kot tudi napovedno učinkovitost metod rudarjenja po podatkih izven, morda celo specifičnih hidroloških in sezonskih biogeokemijskih okvirov, v katerih so bili obstoječi podatki pridobljeni. Možnosti neposredne ekstrapolacije rezultatov meritev ter na njihovi podlagi določenih količin spranega nitratnega dušika na druga prispevna območja zunaj območja Brkinov so zaradi kompleksnosti ter medsebojnega vzajemnega delovanja številnih regulacijskih mehanizmov vprašljive.

Obstoječe razumevanja spiranja nitratnega dušika bi bilo treba na prispevnem območju detajlneje preučiti z analizo sezonske spremenljivost pedoloških karakteristik tal, ki bi na območjih specifičnega gozdnega sestoja črne jelše odgovorila tudi na vprašanje potencialnega velikega vira nitratnega dušika. Detajlna pedološka analiza tal s podrobnejšo analizo vlažnostnih razmer v tleh na prispevnem območju pa obenem nedvomno presega obstoječi hidrološki okvir obravnave spiranja nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja. V okviru naloge smo glede na časovne in finančne zmožnosti opravili eno detajlno pedološko analizo talnega profila v spomladanskem času, ki v navezavi na rezultate raziskav iz literature nakazuje na predlagan koncept hidrološke mobilizacije nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja.

S hidrološkega vidika ponuja nove možnosti za nadaljnje delo navezava ugotovitev na podlagi meritev ter aplikacije metod strojnega učenja na katerega od obstoječih hidroloških modelov (npr. TOPMODEL), katerega hidrološka konceptualna zasnova se v osnovi ujema s predlaganim konceptualnim razumevanjem hidrološke mobilizacije nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja.

POVZETEK

Doktorska disertacija obravnava časovno dinamiko sproščanja hranil z gozdnatega prispevnega območja s poudarkom na opredelitvi in analizi hidroloških mehanizmov, odgovornih za uravnavanje opazovanih odzivov koncentracije nitratnega dušika v vodotoku, ter količin spranega nitratnega dušika. Zaradi kompleksnosti regulacijskih dejavnikov obtoka dušika v ekosistemu gozda smo navkljub prevladujočemu poudarku na hidrološki perspektivi dogajanja časovno dinamiko spiranja nitratnega dušika navezali na širše sezonske biogeokemijske razmere na opazovanem gozdnatem prispevnem območju.

Detajlna analiza hidroloških kontrolnih mehanizmov dinamike sproščanja nitratnega dušika z upoštevanjem vpliva sezonskih biogeokemijskih okvirjev v obdobjih padavinskih dogodkov je možna le, če zvezni zajem podatkov o koncentraciji nitratnega dušika sledi zveznemu časovnemu zajemu podatkov o sezonskih meteoroloških in hidroloških razmerah. Na območju obravnave, gozdnatem prispevnem območju potoka Padež, smo v letih 2006 in 2007 zvezno spremljali hidrometeorološke razmere na več dežemerih in vodomernih postajah ter meteorološki postaji. Zvezne meritve hidrometeoroloških razmer smo periodično dopolnili z zveznimi meritvami kemizma vode v vodotoku (v nalogi je poudarek na koncentraciji nitratnega dušika in elektroprevodnosti vode) v različnih letnih časih, ki so se izvajale tako v hidrološko manj zanimivih časovnih obdobjih brez padavin kot tudi v obdobjih padavinskih dogodkov. Prostorsko enovite hidrogeološke in pedološke karakteristike prispevnega območja Padeža, katerega več kot 80 % površin porašča gozd, so nam omogočile obravnavo tega območja kot hidrološke in biogeokemijske celote, prevladujoči poudarek v raziskavi je bil na časovni dinamiki dogajanja.

Zvezne meritve koncentracije nitratnega dušika v vodotoku v času padavinskih dogodkov razkrivajo precejšnjo, a spremenljivo odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spreminjajoče se hidrološke razmere. Navkljub pestrosti opazovanih hidroloških razmer se v merjenih koncentracijah nitratnega dušika odraža sezonski značaj, ki ima prevladujočo vlogo pri regulaciji intenzivnosti biogeokemijskih transformacij dušikovih spojin, njihovi nadaljnji razpoložljivosti za mobilizacijo pod vplivom hidroloških mehanizmov ter s tem odzivnosti na

padavinske dogodke. V obdobjih baznega odtoka je bila spremenljivost koncentracije, če izvzamemo dnevno dinamiko koncentracije nitratnega dušika v vodotoku, majhna. Povprečne koncentracije nitratnega dušika v obdobjih brez padavin so se gibale okoli 1,5 mg/l-N, najnižje koncentracije pod 1 mg/l-N so bile izmerjene v času izjemno nizkih odtokov v poletnem času. V obdobjih zgodnjespomladanskih padavinskih dogodkov v marcu in aprilu so se povprečne koncentracije nitratnega dušika gibale med 1,5 in 2 mg/l-N. Odzivnost koncentracije nitratnega dušika na padavinske dogodke se je začela občutneje kazati v času opazovanih padavinskih dogodkov v pozno spomladanskem času (maja in v začetku junija), ko se je koncentracija nitratnega dušika v vodotoku povzpela na okoli 4 mg/l-N. Intenzivnejša odzivnost koncentracije nitratnega dušika na spremenjene hidrološke razmere je bila zaznana med poletnimi padavinskimi dogodki v avgustu, maksimalne zabeležene koncentracije nitratnega dušika so se gibale med 6 in 7 mg/l-N. Največji porast v koncentraciji nitratnega dušika znotraj celotnega merskega obdobja je bil izmerjen v času jesenskega padavinskega dogodka novembra 2006, ko je koncentracija nitratnega dušika dosegla vrednost 14 mg/l-N.

Na osnovi opazovanih odzivov koncentracije nitratnega dušika v obdobjih padavinskih dogodkov v različnih letnih časih ter njihove umestitve v širši časovni okvir hidrološkega in sezonskega biogeokemijskega dogajanja lahko sklepamo, da obravnavano gozdnato prispevno območje v kontekstu hidroloških mehanizmov mobilizacije nitratnega dušika sezonsko prehaja iz razmer majhne zaloge nitratnega dušika v zimskem ter zgodnjespomladanskem času v razmere viška zaloge nitratnega dušika v gozdnih tleh (pozno spomladi, poleti ter predvsem jeseni), ki očitno presega mobilizacijsko sposobnost hidroloških mehanizmov, aktivnih v obdobjih posameznih padavinskih dogodkov. Čeprav se opazovani padavinski dogodki močno razlikujejo tako z vidika predhodnih hidroloških razmer, količine padavin ter sezonskih biogeokemijskih razmer, opažena časovna razporeditev hidrološke odzivnosti prispevnega območja napram hidrološko spodbujeni odzivnosti koncentracije nitratnega dušika v vodotoku nakazuje na morebitni regulacijski mehanizem topografije prispevnega območja, ki do neke mere presega tako hidrološke kot tudi sezonske biogeokemijske razmere, znotraj katerih se posamezen padavinski dogodek pojavi. Opažena dnevna dinamika izpiranja nitratnega dušika s prispevnega območja v obdobjih brez padavin je sicer s hidrološkega vidika manj zanimiva, a razkriva tesno povezanost med vodnim telesom in biogeokemijskim dogajanjem na gozdnem prispevnem območju. Dnevni cikel je sezonsko spremenljiv, saj je

tako časovna pojavnost dnevnih minimalnih in maksimalnih koncentracij nitratnega dušika kot tudi amplituda dnevne spremenljivosti koncentracije nestalna. Z namenom razlage opaženih kompleksnih vzorcev vzajemnih hidroloških in sezonskih biogeokemijskih razmer, ki kontrolirajo dinamiko spiranja nitratnega dušika v obdobjih spremenljivih hidroloških pogojev, smo nadalje rezultate lastnih meritev združili s spoznanji in opažanji iz literature v konceptualni opredelitvi časovne in prostorske dinamike spiranja nitratnega dušika z obravnavanega gozdnatega prispevnega območja. V okviru koncepta opredelitve spiranja nitratnega dušika smo zaznane časovne vzorce formacije hidrogramov odtoka ter koničnih koncentracij nitratnega dušika v vodotoku navezali na časovno frekvenco nihanj zasičene cone talnega profila in s tem povezane spremenljivosti prostorske razsežnosti območij zasičenega talnega profila.

Obsežno bazo podatkov, pridobljenih v okviru zveznih meritev hidrometeoroloških razmer in kemizma vode, smo uporabili za aplikacijo metod rudarjenja po podatkih. Z algoritmom M5, ki na podlagi analize numeričnih podatkov omogoča izgradnjo modelnih dreves oz. pridobitev nizov klasifikacijskih pravil, smo skušali po eni strani izboljšati in dopolniti naše domensko poznavanje spiranja nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja, po drugi strani pa na podlagi ugotovljenih zvez med izbranimi atributi, s katerimi smo upoštevali hidrološke in sezonske biogeokemijske razmere, napovedati koncentracijo nitratnega dušika v vodotoku. Z analizo obdobja opazovanih padavinskih dogodkov v letu 2006 smo pridobili modelno drevo, ki je sicer uspešno prepoznalo časovne vzorce spiranja nitratnega dušika, vendar je bila njegova napovedna učinkovitost v drugačnih hidroloških in sezonskih biogeokemijskih okvirih leta 2007 slabša, kar pripisujemo predvsem razlikam med hidrološkimi ter sezonskimi biogeokemijskimi razmerami v obeh letih. Z analizo celotnega nabora meritev v letih 2006 in 2007 smo nadalje pridobili niz klasifikacijskih pravil, na podlagi katerega smo določili masno bilanco spranega nitratnega dušika. V letu 2006 znaša količina spranega nitratnega dušika z gozdnatega prispevnega območja Padeža 10,2 kg/ha, v letu 2007 pa 8,8 kg/ha, kar kaže na to, da se lahko z gozdnatih prispevnih območij sprostijo v vodotoke znatne količine dušika, ob tem pa so letne količine spranega nitratnega dušika lahko precej spremenljive v odvisnosti od hidroloških in sezonskih biogeokemijskih razmer.

SUMMARY

The doctoral dissertation deals with the temporal dynamics of the nutrient mobilization from a forested watershed with the emphasis on the definition and analysis of the hydrological mechanisms responsible for the regulation of observed responses of the streamwater nitrate concentrations and the amounts of the flushed nitrate. The prevailing hydrological perspective of the temporal dynamics of the nitrate flushing was due to the complexity of the regulating factors of the nitrogen cycle in the forest ecosystem tied to the broader seasonal biogeochemical conditions on the studied forested watershed.

A detailed analysis of the hydrological controlling mechanisms responsible for nitrate mobilization with consideration of the influence of seasonal biogeochemical framework during the rainfall events is feasible, if the measurements of the nitrate concentration follow a continuous gathering of meteorological and hydrological data. In the studied area, the Padež stream forested watershed, we have continuously measured hydro-meteorological conditions on several rain gauges, limnigraphs and a meteorological station in 2006 and 2007. Continuous hydro-meteorological measurements were periodically supplemented by continuous measurements of the streamwater chemistry (the main emphasis in the dissertation is on the streamwater nitrate concentration and electrical conductivity) in different seasons. The measurements of the water chemistry were carried out in the hydrologically less interesting, dry periods as well as during the hydrological events. Spatially uniform hydrogeological and pedological characteristics of the Padež watershed, with more than 80% of the area covered by forest, enabled us to study the area as a hydrological and biogeochemical integrity and to give a prevailing emphasis on the temporal dynamics of the observations.

Continuous measurements of the streamwater nitrate concentration during the rainfall events disclosed substantial, however a changeable responsiveness of the concentration on the variable hydrological conditions. In spite of variegated hydrological conditions, the measured streamwater nitrate concentrations reflect a seasonal character which has a prevailing role on the regulation of the intensity of the nitrogen compound biogeochemical transformations,

their further availability for hydrological mobilization and consequently on the rainfall, event-induced responses. Without considering the diurnal streamwater nitrate concentration oscillations, the changeability of the nitrate concentration in the periods of the baseflow was low. Average streamwater nitrate concentration in the periods without rainfall was around 1.5 mg/l-N, the lowest concentrations below 1 mg/l-N were recorded during the periods of extremely low discharges in the summer time. During the early spring rainfall events in March and April, the average streamwater nitrate concentrations were in the range 1.5–2 mg/l-N. The increase in the responsiveness of the nitrate concentration to rainfall events was becoming more evident during the late spring hydrographs in May and June when the streamwater nitrate concentration reached 4 mg/l-N. Even more intensive pulses of the nitrate owing to rainfall events were recorded in the summer time in August when maximum nitrate concentrations ranged between 6 and 7 mg/l-N. The greatest increase in the streamwater nitrate concentration was recorded during the November hydrograph in 2006 when the concentration reached 14 mg/l-N.

Based on the observed responses of the streamwater nitrate concentration during the rainfall events appearing in different seasons and their instalment into broader temporal framework of hydrological and seasonal biogeochemical conditions, we can infer that the Padež stream forested watershed seasonally traverses from the source-limited state in winter and early spring to the flush-limited state in the late spring, summer and autumn when the pool of the nitrate obviously exceeds the hydrological mobilizing capacity acting during particular rainfall events. Although the observed rainfall events differ substantially from the perspective of the preceding hydrological conditions, quantities of rainfall and seasonal biogeochemical conditions, the observed temporal arrangement of hydrological responsiveness of the watershed compared to the hydrologically induced responsiveness of the streamwater nitrate concentration indicates plausible, watershed topography induced regulating mechanism which, to a certain point, exceeds both, the hydrological and seasonal biogeochemical conditions within which a rainfall event occurs. The observed diurnal oscillations in streamwater nitrate concentration during dry periods are from the hydrological perspective less interesting, however they disclose a tight connection between the stream and the biogeochemical surrounding of the forested watershed. The diurnal cycle of the concentration oscillations is seasonally changeable; furthermore, the temporal occurrence of daily minimum

and maximum streamwater nitrate concentrations and the amplitude of daily oscillations are unsteady. Moreover, with an intention to explain the observed complex patterns of mutual hydrological and seasonal biogeochemical conditions responsible for the regulation of nitrate mobilization during the rainfall events, we have combined our observations with observations found in the literature within the conceptual explanation of temporal and spatial dynamics of the nitrate mobilization from the studied watershed. In the framework of the conceptual explanation of the nitrate flushing, the temporal patterns of the hydrograph and peak nitrate concentration formation were explained through a temporal frequency of the oscillations in the soil saturation deficit and associated changeability of the spatial extension of the variable saturated areas.

An extensive database obtained through the continuous measurements of hydro-meteorological conditions and water chemistry was used for the application of the data mining methods. Using the algorithm M5 which, based on the recognised relations between the data, builds the model trees and the classification rules, we have tried to supplement our domain knowledge of the nitrate flushing from the forested watershed. Furthermore, we have used the recognised relations between given attributes describing the hydrological and seasonal biogeochemical settings to predict the streamwater nitrate concentration. Analysing the rainfall events in 2006, we have obtained a model tree which successfully recognised the temporal patterns of the nitrate flushing; however, the model tree performance was worse when we applied the model to predict the nitrate flushing in a different hydrological and seasonal biogeochemical setting of 2007 which could be identified as the main cause for worse performance. By analysing the whole dataset of measurements in 2006 and 2007 we have further obtained a list of classification rules which enabled us to determine the annual mass flux of the nitrate flushed from the studied watershed. In 2006, the total mass flux amounted 10.2 kg/ha and in 2007 8.8 kg/ha, respectively. According to the measurements and calculations we can conclude that the forested watershed can contribute substantial amounts of nitrate to the streams, however, these amounts can vary substantially depending on given hydrological and seasonal biogeochemical conditions.

LITERATURA

Aber, J.D., Goodale, C.L., Ollinger, S.V., Smith, M., Magill, A.H., Martin, M.E., Hallett, R.A., Stoddard, J.L. 2003. Is Nitrogen Deposition Altering the Nitrogen Status of Northeastern Forests? *BioScience*, 53, 4: 375–389.

Aber, J.D., Ollinger, S.V., Driscoll, C.T., Likens, G.E., Holmes, R.T., Freuder, R.J., Goodale, C.L. 2002. Inorganic Nitrogen Losses from a Forested Ecosystem in Response to Physical, Chemical, Biotic, and Climatic Perturbations. *Ecosystems*, 5: 648–658.

Aber J.D., Ollinger, S.V., Driscoll, C.T. 1997. Modeling nitrogen saturation in forest ecosystems in response to land use and atmospheric deposition. *Ecological Modelling*, 101: 61–78.

Aber, J.D., Melillo, J.M., Nadelhoffer, K.J., Pastor, J., Boone, R.D. 1991. Factors controlling nitrogen cycling and nitrogen saturation in northern temperate forest ecosystems. *Ecological Application*, 1: 303–315.

Alexander, R.B., Johnes, P.J., Boyer, E.W., Smith, R.A. 2002. A comparison of models for estimating the riverine export of nitrogen from large watersheds. *Biogeochemistry*, 57/58: 295–339.

Amin, I.E., Campana, M.E. 1996. A general lumped parameter model for the interpretation of tracer data and transit time calculation in hydrologic systems. *Journal of Hydrology*, 179: 1–21.

Andersson, L., Lepisto, H. 1998. Links between runoff generation, climate and nitrate–N leaching from forested catchments. *Water, Air and Soil Pollution*, 105: 227–237.

Arheimer, B., Andersson, L., Lepisto, A. 1996. Variation of nitrogen concentration in forest streams – influences of flow, seasonality and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 179: 281–304.

ARSO, 2001. Mesečni bilten. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje, 8, 12: 68 str.

Atanasova, N., Todorovski, L., Džeroski, S., Kompare, B. 2006. Constructing a library of domain knowledge for automated modelling of aquatic ecosystems. *Ecological Modelling*, 194, 1–3: 14–36.

Band, L.E., Tague, C.L., Groffman, P., Belt, K. 2001. Forest ecosystem processes at the watershed scale: hydrological and ecological controls of nitrogen export. *Hydrological Processes*, 15, 10: 2013–2028.

Band, L.E. 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research*, 22, 1: 15–24.

Beachtold, J.C., Edwards, R.T., Naiman, R.J. 2003. Biotic versus hydrologic control over seasonal nitrate leaching in a floodplain forest. *Biogeochemistry*, 63, 53–72.

Becker, A., Guntner, A., Katzenmaier, D. 1999. Required integrated approach to understand runoff generation and flow-path dynamics in catchments. V: Leibundgut, C., McDonnell, J.J., Schultz, G., (ur.). *Integrated Methods in Catchment Hydrology – Tracer, Remote Sensing and New Hydrometric Techniques*, Wallingford, IAHS Publication, 258: 3–9.

Bengtsson, G., Bengtson, P., Mansson, K.F. 2003. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry*, 35: 143–154.

Bernhardt, E.S., Hall, R.O.Jr., Likens, G.E. 2002. Whole-system Estimates of Nitrification and Nitrate Uptake in Streams of the Hubbard Brook Experimental Forest. *Ecosystems*, 5: 419–430.

- Bernston, G.M., Aber, J.D. 2000. Fast nitrate immobilization in N saturated temperate forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 151–156.
- Beven, K. 1997. TOPMODEL: A Critique. *Hydrological Processes*, 11, 9: 1069–1087.
- Binkley, D., Ice, G.G., Kaye, J., Williams, C.A. 2004. Nitrogen and phosphorus concentrations in forest streams of the United States. *Journal of the American Water Resource Association*, 10: 1277–1292.
- Binkley, D., Son, Y., Valentine, D.W. 2000. Do Forests Receive Occult Inputs of Nitrogen? *Ecosystems*, 3: 321–331.
- Bishop, K., Seibert, J., Kohler, S., Laudon, H. 2004. Resolving the double paradox of rapidly mobilized old water with highly variable responses in runoff chemistry. *Hydrological Processes*, 18, 1: 185–189.
- Blöschl, G. 2001. Scaling in hydrology. *Hydrological Processes*, 15: 709–711.
- Blöschl, G., Sivapalan M. 1995. Scale issues in hydrological modelling – a review. *Hydrological Processes*, 9: 251–290.
- Bonell, M. 1993. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology*, 150: 217–275.
- Boyer, E. W., Hornberger, G. M., Bencala, K. E., McKnight, D. M. 1997. Response characteristics of DOC flushing in an alpine catchment, *Hydrological Processes*, 11, 12: 1635–1647.
- Brammer, D.D., McDonnell, J.J. 1996. An evolving perceptual model of hillslopes flow at the Maimai catchment. V: Anderson, M.G., Brooks, S.M. (ur.): *Advances in Hillslope Hydrology*, New York, John Wiley and Sons: 35–60.
- Breiman, L., Freidman, J., Olshen, R., Stone, C. 1984. *Classification and regression trees*, Wadsworth, USA, Belmont (CA): 358 str.
- Brilly, M., Rusjan, S., Vidmar, A. 2006. Monitoring the impact of urbanisation on the Glinscica stream, *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 17: 1089–1096.
- Brilly, M., Šraj, M. 2005. *Osnove hidrologije*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.
- Brilly, M., Toman, M.J., Rusjan, S. 2004. The study site monitoring of the Glinščica catchment. V: Tropeano, D. (ur.): *Progress in surface and subsurface water studies at the plot and small basin scale*. Torino, ERB2004 – Euromediterranean conference: 79–82.
- Burns, D.A. 2004. The effects of atmospheric nitrogen deposition in the Rocky Mountains of Colorado and southern Wyoming, USA – a critical review. *Environmental Pollution*, 127: 257–269.
- Burns, D.A. 2002. Stormflow-hydrograph separation based on isotopes: The thrill is gone – What's next? *Hydrological Processes*, 16, 7: 1515–1517.
- Burns, D.A., 1998. Retention of NO₃⁻ in an upland stream environment: A mass balance approach. *Biogeochemistry*, 40: 73–96.
- Burt, T.P., Matchett, L.S., Goulding, K.W.T., Webster, C.P. and Haycock, N.E. 1999. Denitrification in riparian buffer zones: the role of floodplain sediments. *Hydrological Processes*, 13: 1451–1463.
- Buser, S., Grad, K., Pleničar, M. 1970. Tolmač lista Postojna. *Osnovna geološka karta SFRJ 1: 10 000*, Zvezni geološki zavod Beograd: 62 str.
-

- Buttle, J.M., 1994. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Prog. Phys. Geogr.*, 18: 16–41.
- Caissie, D., Pollock, T.L., Cunjak, R.A. 1996. Variation in stream water chemistry and hydrograph separation in a small drainage basin, *Journal of Hydrology*, 178:137–157.
- Clark, M.J., Cresser, M.S., Smart, R., Chapman, P.J., Edwards, A.C. 2004. The influence of catchment characteristics on the seasonality of carbon and nitrogen species concentrations in upland rivers of Northern Scotland. *Biogeochemistry*, 68: 1–19.
- Cirno, C.P., McDonnell, J.J. 1997. Linking the hydrologic and biogeochemical controls of nitrogen transport in near-stream zones of temperate-forested catchments: a review. *Journal of Hydrology*, 199: 88–120.
- Compton, J.E., Church, M.R., Larned, S.T., Hogsett, W.E. 2003. Nitrogen Export from Forested Watersheds in the Oregon Coast Range: The Role of N₂-fixing Red Alder. *Ecosystems* 6: 773–785.
- CORINE, 2000. Pokrovnost tal CORINE land cover Slovenija. Evropska agencija za okolje (EEA), podatkovna baza. <http://terrestrial.eionet.europa.eu/CLC2000/> (21. 9. 2006)
- Cote, B., Camire, C. 2005. Nitrogen cycling in dense plantings of hybrid poplar and black alder. *Plant and Soil*, 87, 1: 195–208.
- Creed I.F., Band L.E. 1998a. Export of nitrogen from catchments within a temperate forest: evidence for a unifying mechanism regulated by variable source area dynamics. *Water Resources Research*, 34: 3105–3120.
- Creed, I.F., Band, L.E. 1998b. Exploring functional similarity in the export of nitrate-N from forested catchments: a mechanistic modeling approach. *Water Resources Research* 34: 3079–3093.
- Creed, I.F., Band, L.E., Foster, N.W., Morisson, I.K., Nicolson, J.A., Semkin, R.S., Jeffries, D.S. 1996. Regulation of nitrate N release from temperate forests: A test of the N flushing hypothesis. *Water Resources Research*, 32, 11: 3337–3354.
- CUAHSI, 2006. Advancing Biogeochemical Research in the Field Hydrological Sciences: The CUAHSI Hydrological Measurement Facility – Biogeochemical Component. Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science, Inc.: 25 str.
- Currie W.S., Aber, J.D. 1997. Modeling leaching as a decomposition process in humid montane forests. *Ecology*, 78, 6: 1844–1860.
- De Waal, L. C., A. R. G. Large & P. M. Wade (ur.), 1998. Rehabilitation of rivers. Principles and implementation. Landscape Ecology Series, Chichester, John Wiley & Sons: 350 str.
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the EC*. 22. 12. 2000: 72 str.
- Dise, N.B., Matzner, E., Forsius, M. 1998. Evaluation of organic horizon C:N ratio as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe. *Environmental Pollution*, 102: 453–456.
- Drobne, F., Marin, M., Rogelj, J. 1976. Geološke in geotehnične raziskave k idejni študiji »Akumulacija Padež«, Ljubljana, Geološki zavod Ljubljana.
- Džeroski, S. 2001a. Applications of symbolic machine learning to ecological modelling. *Ecological Modelling* 146: 263–273.
- Džeroski, S. 2001b. Data mining in a nutshell. V: S. Džeroski, N. Lavrač, (ur.): *Relational Data Mining*, Berlin, Springer: 3–27.
-

- Eshlemann, K.N., Fiscus, D.A., Castro, N.M., Webb, J.R., Herlihy, A.T. 2004. Regionalization of disturbance-induced nitrogen leakage from mid-Appalachian forests using a linear systems model. *Hydrological Processes*, 8, 14: 2713–2725.
- Fayyad, U. 1997. Editorial, *Data Min. Knowl. Disc.* 1: 5–10.
- Fitzhugh, R.D., Lovett, G.M., Venterea, R.T. 2003. Biotic and abiotic immobilization of ammonium, nitrite and nitrate in soils developed under different tree species in the Catskill Mountains, New York, USA. *Global Change Biology*, 9: 1591–1601.
- Flum, T., Nodvin, S.C. 1995. Factors Affecting Stream Water Chemistry in the Great Smoky Mountains, USA. *Water Air and Soil Pollution*, 85: 1707–1712.
- Fogg, J., Wells, G. 1998. *Stream Corridor Restoration, Principles, Processes, and Practices*, U.S. Department of Agriculture, U.S. Environmental Protection Agency, Tennessee Valley Authority, Federal Emergency Management Agency, U.S. Department of Commerce, U.S. Department of Housing and Urban Development, U. S. Department on the Interior: 536 str.
- Gabrovec, M., Kastelec, D. 1998. Sončno obsevanje. *Geografski atlas Slovenije*, Ljubljana, DZS: 104 – 105.
- Geoinženiring, 2004. Geološke osnove za potrebe projekta: Ureditev oskrbe prebivalstva s pitno vodo Slovenske Istre in zalednega kraškega območja, Projektna naloga, Geoinženiring, IG-1394, Ljubljana: 30 str.
- Golladay, S.W., Webster, J.R., Benfield, E.F., Swank, W.T. 1992. Changes in stream stability following forest clearing as indicated by storm nutrient budgets. *Hydrobiology*, 90: 1–33.
- Goodale, C.L., Aber, J.D., Vitousek, P.M.: 2003. An Unexpected Nitrate Decline in New Hampshire Streams. *Ecosystems*, 6: 75–86.
- Goodale, C.L., Lajhta, K., Nadelhoffer, K.J., Boyer, E.W., Jaworski, N.A. 2002. Forest nitrogen sinks in large eastern U. S. watersheds: estimates from forest inventory and an ecosystem model. *Biogeochemistry*, 57/58: 239–266.
- Goodale C.L., Aber J.D. 2001. The long-term effects of land-use history on nitrogen cycling in northern hardwood forests. *Ecological Application*, 11: 253–267.
- Goodale, C.L., Aber, J.D., McDowell, W.H. 2000. The long-term effects of disturbance on organic and inorganic nitrogen export in the White Mountains, New Hampshire. *Ecosystems*, 3: 433–450.
- Gundersen, P., Callesen, I., de Vries, W. 1998. Nitrate leaching in forest ecosystems is controlled by forest floor C/N ratio. *Environmental Pollution* 102: 403–407.
- Grayson, R.B., Western, A.W., Chiew, F.H.S., Bloschl G. 1997. Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls, *Water Resources Research*, 33: 2897–2908.
- GURS, 2002. Digitalni model višin, DMV25. Geodetska uprava Republike Slovenije. Kartografsko gradivo v digitalni obliki.
- Hackl, E., Bachmann, G., Zechmeister, S.B. 2004. Microbial nitrogen turnover in soils under different types of natural forest. *Forest Ecology and Management* 188: 101–112.
- Hall, M. J., Minns, A. W., Ashrafuzzaman, A. K. M. 2002. The application of data mining techniques for the regionalization of hydrological variables, *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 6: 685–694.
- Hall, M., Holmes, G., Frank, E. 1999. Generating Rule Sets from Model Trees. *Proceedings of the Twelfth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Sydney, Australia. Springer-Verlag: 1–12.
-

- Hamilton, S.K., Tank, J.L., Raikow, D.F., Wollheim, W.M., Peterson, B.J., Webster, J.R. 2001. Nitrogen uptake and transformation in a Midwestern U.S. stream: A stable isotope enrichment study. *Biogeochemistry*, 54: 297–340.
- Han, J., Kamber, M. 2001. *Data Mining: Concepts and Techniques*. Burlington, Morgan Kaufmann Publishers: 550 str.
- Hart, S.C., Binkley, D., Perry, D.A. 1997. Influence of red alder on soil nitrogen transformations in two conifer forests of contrasting productivity. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 7: 1111–1123.
- Heggen, J.R. 2001. Normalized Antecedent Wetness Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6, 5: 377–381.
- Hewlett, J.D., Hibbert, A.R. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. V: Sopper, W.E., Lull, H.W. (ur.): *Forest hydrology*. University Park, Pennsylvania, Proc. Int. Symp. on Forest Hydrol., Penn. State Univ.: 275–290.
- Hewlett, J.D. 1961. Soil moisture as a source of baseflow from steep mountain watersheds, USDA, SE Forest Experimental station Paper No. 132: 10 str.
- Hibbert, A.R., Troendle, C.A. 1988. *Streamflow Generation by Variable Source Area*. V: Swank, W.T., Crossley, D.A (ur.). *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*. New York, Springer-Verlag: 111–129.
- Hill, A.R., Kemp, W. A., Buttle J. M., Goodyear, D. 1999. Nitrogen chemistry of subsurface storm runoff on forested Canadian Shield hillslopes, *Water Resources Research*, 5, 3: 811–821.
- Hill, A.R., Labadia, C.F., Sanmugadas, K. 1998. Hyporheic zone hydrology and nitrogen dynamics in relation to the streambed topography of a N-rich stream. *Biogeochemistry*, 42: 285–310.
- Hillman, M., Brierley, G. 2005. A critical review of catchment-scale stream rehabilitation programmes, *Progress in Physical Geography*, 29, 1: 50–70.
- Hood, E.W., Williams, M.W., Caine, M. 2003. Landscape Controls on Organic and Inorganic Nitrogen Leaching across an Alpine/Subalpine Ecotone, Green Lakes Valley, Colorado Front Range. *Ecosystems*, 6: 31–45.
- Hornberger, G.M., Bencala, K.E., McKnight, D.M., 1994. Hydrological controls on dissolved organic carbon during snowmelt in the Snake River near Montezuma, Colorado. *Biogeochemistry*, 25: 147–165.
- Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of American Geophysical Union*, 14: 446–460.
- Inamdar, S.P., Christopher, S. and Mitchell, M.J. 2004. Flushing of DOC and nitrate from a forested catchment: Role of hydrologic flow paths and water sources. *Hydrological Processes*, 18, 14: 2651–2661.
- Jakeman, A. J., Hornberger, G.M, 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, 29: 2637–2650.
- Janssen, B.H. 1996. Nitrogen mineralization in relation to C/N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil*, 181: 39–45.
- Joerin, C., Beven, K.J., Iorgulescu, I., Musy, A. 2002. Uncertainty in hydrograph separation based on geochemical mixing models. *Journal of Hydrology*, 255: 90–106.
- Johnson, D.W., Susfalk, R.B., Dahlgren R.A. 1997. Nutrient fluxes in forests of the eastern Sierra Nevada Mountains, United States of America. *Global Biogeochemical Cycles*, 11: 673–681.
-

Jurkovšek, B., Toman, M., Ogorelec, B., Šribar, L., Drobne, K., Poljak, M. 1996. Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-Komenske planote. Kredne in paleogenske karbonatne kamnine, Ljubljana, Geološki zavod Slovenije: 143 str. in geološka karta.

Kendall, C., McDonnell, J.J., Gu, W. 2001. A look inside black box hydrograph separation models: a study at the Hydrohill catchment. *Hydrological Processes*, 15, 10: 1877–1902.

Kendall, C., Campbell, D.H., Burns, D.A., Shanley, J.B., Silva, S.R., Chang, C.Y. 1995. Tracing sources of nitrate in snowmelt runoff using the oxygen and nitrogen isotopic compositions of nitrate. V: Tonnessen, K.A., Williams, M.W. & Tranter, M. (ur.). *Biogeochemistry of Seasonally Snow-Covered Catchments*. Wallingford, IAHS Publication, 228: 339–347.

Kirchner, J.W., Feng, X., Neal, C., Robson, A.J. 2004. The fine structure of water quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future, *Hydrological Processes*, 18, 7: 1353–1359.

Kirchner, J. W. 2003. A double paradox in catchment hydrology and geochemistry. *Hydrological Processes*, 17: 871–874,

Kirkby, M.J. 1993. *Network Hydrology and Geomorphology*. V: Beven, K., Kirkby, M.J. (ur.): *Channel Network Hydrology*, Chichester, Wiley: 1–11.

Kirkby, M.J., Chorley, R.J. 1967. Throughflow, overland flow and erosion. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 12: 5–21.

Klemenčič, V. 1959. *Pokrajina med Snežnikom in Slavnikom*. Ljubljana, Slovenska akademija znanosti in umetnosti: 197 str.

Klimatografija Slovenije, Temperature 1961 – 90. 1995. Ljubljana, Hidrometeorološki zavod Slovenije.

Klimatografija Slovenije, Padavine 1961 – 1990. 1995. Ljubljana, Hidrometeorološki zavod Slovenije.

Knighton, D. 1998. *Fluvial Forms and Processes. A New Perspective*. London, Arnold: 383 str.

Knoepp, J.D., Swank, W.T. 2002. Using soil temperature and moisture to predict forest soil nitrogen mineralization. *Biol. Fertil. Soils*, 36: 177–182.

Kohavi, R. 1995. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection, *IJCAI-95*, San Mateo, Morgan Kaufmann: 1137–1143.

Kompare, B., Steinman, F., Cerar, U., Džeroski, S. 1997. Prediction of rainfall runoff from catchment by intelligent data analysis with machine learning tools within the artificial intelligence tools. *Acta hydrotehnica*, 16/17: 79–94.

KSH, 2006. Hidrološko poročilo za akumulacijo Padež. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko, poročilo 4-KSH/d-107/d-106: 44 str.

Lajtha, K., Crow, S.E., Kaushal, S.S., Yano, Y., Sulzman, E., Sollins, P., Spears, J.D.H. 2004. Detrital controls on soil solution N and dissolved organic matter in soils: a field experiment. *Biogeochemistry*, 76: 261–281.

Lajtha, K., Seely, B. and Valiela, I. 1995. Retention and leaching losses of atmospherically-derived nitrogen in the aggrading coastal watershed of Waquoit Bary, MA. *Biogeochemistry*, 28: 33–54.

Laudon, H., Slaymaker, O. 1997. Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example. *Journal of Hydrology*, 201: 82–101.

Lawrence, G.B., Lovett, G.M., Baevsky, Y.H. 2000. Atmospheric deposition and watershed nitrogen export along an elevational gradient in the Catskill Mountains, New York. *Biogeochemistry*, 50: 21–43.

Lewis, W.M., Melack, J.M., McDowell, W.H., McClain, M., Richey, J.E. 1999. Nitrogen yields from undisturbed watersheds in the Americas. *Biogeochemistry*, 46: 149–162.

Likens, G.E., Bormann, F.H. 1995. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. 2nd edition. New York, Springer-Verlag: 159 str.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, L.H. 1982. *Hydrology for engineers*. 3rd edition. New York, McGraw Hill: 512 p.

Lovett, G. M., Weathers, K.C., Arthur, M.A. 2002. Control of nitrogen loss from forested watersheds by soil carbon: Nitrogen ratio and tree species composition. *Ecosystems*, 5: 712–718.

Lovett, G.L., Weathers, K.C., Sobczak, W.V. 2000. Nitrogen saturation and retention in forested watersheds of the Catskill Mountains, New York. *Ecological Application*, 10: 73–84.

Lovett, G.L., Rueth, H. 1999. Soil nitrogen transformations in beech and maple stands along a nitrogen deposition gradient. *Ecological Application*, 9: 1330–1334.

Lyon, S.W., Walter, M.T., Marchant, P.G., Steenhuis, T.S. 2004. Using a topographic index to distribute variable source area runoff predicted with the SCS curve-number equation. *Hydrological Processes*, 18: 2757–2771.

MacDonald, J.A., Dise, N.B., Matzner, E., Armbruster, M., Gundersen, P., Forsius, M. 2002. Nitrogen input together with ecosystem nitrogen enrichment predict nitrate leaching from European forests. *Global Change Biology*, 8: 1028–1033.

Magill, A.H., Aber, J.D., Berntson, G.M., McDowell, W.H., Nadelhoffer, K.J., Melillo, J.M. and Steudler, P. 2000. Long-Term Nitrogen Additions and Nitrogen Saturation in Two Temperate Forests. *Ecosystems*, 3: 238–253.

McDonnell, J.J., Tanaka, T. 2001. Hydrology and biogeochemistry of forested catchments, *Hydrological Processes*, 15: 1673–2073.

McDonnell J.J. 1990. A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. *Water Resources Research*, 26: 2821–2832.

McGlynn, B.L., McDonnell, J.J. 2003. Role of discrete landscape units in controlling catchment dissolved organic carbon dynamics. *Water Resources Research*, 39, 4, doi: 10.1029/2002WR001525.

McHale, M.R., Cirimo, C.P, Mitchell, M.J., McDonnell, J.J. 2004. Wetland nitrogen dynamics in an Adirondack forested watershed. *Hydrological Processes*, 18, 10: 1853–1870.

McHale, M.R., McDonnell, J.J., Mitchell, M.J., Cirimo, C.P. 2002. A field-based study of soil water and groundwater nitrate release in an Adirondack forested watershed. *Water Resources Research*, 38, 4: 1031–1047.

McHale, M.R., Mitchell, M.J., McDonnell, J.J., Cirimo, C.P. 2000. Nitrogen solutes in an Adirondack forested watershed: Importance of dissolved organic nitrogen. *Biogeochemistry*, 48: 165–184.

McNamara, J.P., Chandler, D., Seyfried, M., Achet, S. 2005. Soil moisture states, lateral flow, and streamflow generation in a semi-arid, snowmelt-driven catchment. *Hydrological Processes*, 19, 20: 4023–4038.

Meixner, T., Brown, A., Bales, R.C. 1998. Importance of biogeochemical processes in modeling stream chemistry in two watersheds in the Sierra Nevada, California. *Water Resources Research*, 34, 11: 3121–3133.

Meteorološki letopis 1999. Ljubljana, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, Arhivsko gradivo.

- Michalski, R.S., Bratko, I., Kubat, M. (ur.). 1998. Machine Learning and data Mining: Methods and Applications, New York, John Wiley & Sons: 3–69.
- Mitchell, M.J. 2001. Linkages of nitrate losses in watersheds to hydrological processes. *Hydrological Processes*, 15, 17: 3305–3309.
- Mitchell, T.M. 1997. Does Machine Learning Really Work, *The American Association for Artificial Intelligence*: 11–20. <http://www.aaai.org> (24. 8. 2007).
- Moldan, B., Černý, J. 1994. Biochemistry of small catchments, A tool for Environmental research. Chichester, Wiley: 419 str.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., King, K.W. 2002a. Soil and Water Assessment Tool, Technical documentation. Grassland, Soil and water research laboratory, Temple, Texas: 506 str.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., King, K.W., 2002b. Soil and Water Assessment Tool, User`s manual. Grassland, Soil and water research laboratory, Temple, Texas: 472 str.
- Nicolardot, B., Fauvet, G., Cheneby, D. 1994. Carbon and nitrogen cycling through soil microbial biomass at various temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 26: 253–261.
- O'Brien, A.K., Eshleman, K.N. and Pollard, J.S. 1994. Interactions between groundwater and surface water in a Virginia coastal plain watershed. 2. Acid-base chemistry, *Hydrological Processes*, 8: 411–427.
- Ogrin, D. 1993. (Sub)mediteransko podnebje v Sloveniji. *Časopis za kritiko znanosti*, 21, 158–159.
- Ohte, N., Tokuchi, N., Suzuki, M. 1997. An in situ lysimeter experiment on soil moisture influence on inorganic nitrogen discharge from forest soil. *Journal of Hydrology*, 195, 1–4, 78–98.
- Ollinger, S.V., Smith, M.L., Martin, M.E., Hallett, R.A., Goodale, C.L., Aber, J.D., 2002. Regional variation in foliar chemistry and N cycling among forests of diverse history and composition. *Ecology*, 83: 339–355.
- Onda, Y., Komatsu, Y., Tsujimura, M., Fujihara, J. 2001. The role of subsurface runoff through bedrock on storm flow generation. *Hydrological Processes*, 15, 10, 1693–1707.
- Osnovna geološka karta SFRJ, 1972. List Ilirska Bistrica, merilo 1 : 100 000. Geološki zavod Slovenije.
- Quinlan J.R. 1992. Learning with continuous classes, V: *Proceedings of the Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Singapore, World Scientific: 343–348.
- Quinn, P. 2004. Scale appropriate modelling: representing cause and effect relationships in nitrate pollution at the catchment scale for the purpose of catchment scale planning, *Journal of Hydrology*, 291, 3–4: 197–217.
- Quinn, P.F., Beven, K.J., Lamb, R. 1995. The $\ln(a/\tan)$ index: How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. *Hydrological Processes*, 9: 161–182.
- Pardo, L.H., Kendell, C., Pett-Ridge, J., Chang, C.C.Y. 2004. Evaluating the source of streamwater nitrate using ^{15}N and ^{18}O in nitrate in two watersheds in New Hampshire, USA. *Hydrological Processes*, 18, 14: 2699–2712.
- Pastor, J., Binkley, D. 1998. Nitrogen fixation and the mass balances of carbon and nitrogen in ecosystems. *Biogeochemistry*, 43: 63–78.
- Pedološka karta Slovenije v merilu 1 : 25.000. 2002. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Center za pedologijo in varstvo okolja.
- Peijl, M.J. van der, Verhoeven, J.T.A. 2000. Carbon, nitrogen and phosphorus cycling in river marginal wetlands; a model examination of landscape geochemical flows. *Biogeochemistry*, 50: 45–71.
-

Poor, C.J., McDonnell, J.J. 2007. The effects of land use on stream nitrate dynamics. *Journal of Hydrology*, 332: 54–68.

Prasad, A.M., Iverson, L. R., Liaw, A. 2006. Newer Classification and Regression Tree Techniques: Bagging and Random Forests for Ecological Prediction, *Ecosystems*, 9: 181–199.

Reeburgh, W.S. 1997. Figures summarizing the global cycles of biogeochemically important elements. *Bull Ecol. Soc. Am.*, 78: 260–7.

Reich, P.B., Grigal, D.F., Aber, J.D., Gower, S.T. 1997. Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. *Ecology*, 78: 335–347.

Ritter, D.F., Kochel, C.R., Miller, J.R. 2002. *Process Geomorphology*, 4th edition, New York, McGraw-Hill: 576 str.

Rushton, K.R., Eilers, V.H.M., Carter, R.C. 2006. Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation. *Journal of Hydrology*, 318: 379–399.

Seitzinger, S.P., Styles, R.V., Boyer, E.W., Alexander, R.B., Billen, G., Howarth, R.W., Mayer, B., Bremen, N. 2002. Nitrogen retention in rivers: model development and application to watersheds in the northeastern U.S.A. *Biogeochemistry*, 57/58: 199–237.

Shultz, G.A. 1999. A call for hydrological models based on remote sensing, tracers and other modern hydrometric techniques. V: Leubundgut, C., McDonnell, J., Schultz, G., (ur.): *Integrated Methods in Catchment Hydrology – Tracer, Remote sensing and New Hydrometric Techniques*, Wallingford, IAHS Publications, 258: 223–231.

Sickman, J.O., Leydecker, A., Chang, C.C.Y., Kendall, C., Melack, J.M., Lucero, D.M., Schimel, J. 2003. Mechanisms underlying export of N from high-elevation catchments during seasonal transitions. *Biogeochemistry*, 64: 1–24.

Sidle, R.C., Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Laursen, K. 2001. A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: evidence of self-organization. *Hydrological Processes*, 15, 10: 1675–1693.

Sivapalan, M. 2005. Pattern, Process and Function: Elements of a Unified Theory of Hydrology at the Catchment Scale. V: Andersson, M.G., (ur.): *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Chichester, John Wiley & Sons: 193–219.

Sivapalan, M., Grayson, R., Woods R. 2004. Scale and scaling in hydrology. *Hydrological Processes*, 18, 8: 1369–1371.

Sivapalan, M. 2003. Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: is there a connection? *Hydrological Processes*, 17, 5: 1037–1041.

Sklash, M.G., Farvolden, R.N. 1979. The role of groundwater in storm runoff, *Journal of Hydrology*, 43: 45–65.

Soulsby, C., Dunn, S.M. 2003. Towards integrating tracer studies in conceptual rainfall-runoff models: recent insights from a sub-arctic catchment in the Cairngorm Mountains, Scotland. *Hydrological Processes*, 17, 2: 403–416.

Soulsby, C., Gibbins, C., Wade, A.J., Smart, R., Helliwell, R. 2002. Water quality in the Scottish uplands: a hydrological perspective on catchment hydrochemistry. *The Science of the Total Environment*, 294: 73–94.

Stanford, J.A. 1996. *Landscape and Catchment Basins*. V: Hauer, F.R., Lamberti, G.A. (ur.). *Methods in Stream Ecology*, London, Academic Press Inc.: 3–23.

Stieglitz, M., Shaman, J., McNamara, J., Engel, V., Shanley, J., Kling, G.W. 2003. An approach to understanding hydrologic connectivity on the hillslope and the implications for nutrient transport. *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 4, doi: 10.1029/2003GB002041.

Stoddard, J.L. 1994. Long term changes in watershed retention of nitrogen: Its causes and consequences. V: Baker, L.A., (ur.), *Environmental Chemistry of Lakes and Reservoirs, Advances in Chemistry Series 237*, Washington, D. C., Am. Chem. Soc.: 223–283.

Swank, W.T., Meyer, J.L., Crossley, D.A. 2001. Long-term Ecological Research: Coweeta History and Perspectives. V: Barrett, G.W., Barrett, T.L., *Holistic Science*, New York, Taylor and Francis: 143–163.

Swank, W.L. 1988. Stream Chemistry Response to Disturbance. V: Swank, W.T., Crossley, D.A (ur.). *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*. New York, Springer-Verlag: 339–359.

Šebenik, I. 1996. Brkini in Ilirskobistriška kotlina. Regionalnogeografska monografija Slovenije, 4. del: Submediteranski svet, Ljubljana, Inštitut za geografijo: 48–68.

Šraj, M. 2000. Uporaba šifranta padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije za pripravo hidroloških modelov. Magistrska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 109 str.

Štravs, L., Brilly, M. 2007. Development of a low-flow forecasting model using M5 machine learning method, *Hydrolog. Sci. J.*, 52: 466–478.

Tarboton, D.G. 1997. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models, *Water Resources Research*, 33, 2: 309–319.

Turner, R.E., Rabalais, N.N., Justic, D., Dortch, Q. 2003. Global patterns of dissolved N, P and Si in large rivers. *Biogeochemistry* 64: 297–317.

Uhlenbrook, S., McDonnell, J.J., Leibundgut, C. 2003. Runoff generation and implications for river basin modelling, *Hydrological Processes*, 17, 2: 197–198.

Uhlenbrook, S., Leibundgut, C. 2002. Process-oriented catchment modelling and multiple-response validation. *Hydrological Processes*, 16, 2: 423–440.

Uljan, M. 2000. Novejši regionalni razvoj občine Ilirska Bistrica. Diplomaska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, Poglavlje Podnebeje: 14–20.

Vanderbilt, C.L., Lajhta, K., Swanson, F.J. 2003. Biogeochemistry of unpolluted forested watersheds in the Oregon Cascades: Temporal patterns of participation and stream nitrogen fluxes. *Biogeochemistry*, 62: 87–117.

Vidon, P., Hill, A.R. 2004. Denitrification and patterns of electron donors and acceptors in eight riparian zones with contrasting hydrogeology. *Biogeochemistry*, 71: 259–283.

Viney, N.R., Sivapalan, M., Deely, D. 2000. A conceptual model of nutrient mobilization and transport applicable at large catchment scales. *Journal of Hydrology*, 240: 23–44.

Vitousek, P.M., Cleveland, C., Crews, T., Field, C.B., Grimm, N.B., Howarth, R.W., Marino, R., Martinelli, L., Rastetter, E.B., Spret, J.I. 2002. Towards an ecological understanding of biological nitrogen fixation. *Biogeochemistry*, 57/58: 1–45.

Vitousek, P.M., Aber, J.D., Howarth, R.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger, W.H., Tilman, D.G. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Application*, 7: 737–750.

Vitvar, T., Gurtz, J., Lang, H. 1999. Application of GIS-based distributed hydrological modelling for estimation of water residence times in small Swiss pre-alpine catchment Rietholzbach. V: Leibundgut, C., McDonnell, J.J.,

Schultz, G., (ur.): *Integrated Methods in Catchment Hydrology – Tracer, Remote Sensing and New Hydrometric Techniques*, Wallingford, IAHS Publication 258: 241–248.

Wang, Y., Witten, I. H. 1997. Induction of model trees for predicting continuous classes. V: *Proceedings of the poster papers of the European Conference on Machine Learning*, Prague, University of Economics, Faculty of Informatics and Statistics.

Wang, Z., Fernandez, I. 1999. Soil type and forest vegetation influences on forest floor nitrogen dynamics at the Bear Brook Watershed in Maine (BBWM). *Environ. Monitor. Assessm.*, 55, 221–234.

Ward, A.D., Elliot, W.J. 1995. *Environmental hydrology*. New York, Lewis publishers: 462 str.

Weiler, M., McDonnell, J.J. 2006. Testing nutrient flushing hypotheses at the hillslope scale: A virtual experiment approach. *Journal of Hydrology*, 319: 339–356.

Weiler, M., McGlynn, B.L., McGuire, K.J., McDonnell, J.J. 2003. How does rainfall become runoff? A combined tracer and runoff transfer function approach. *Water Resources Research*, 39, 11: 1315–1328.

Weiler, M., Scherrer, S., Naef, F., Burlando, P. 1999. Hydrograph separation of runoff components based on measuring hydraulic state variables, tracer experiments and weighting methods. V: Leibundgut, C., McDonnell, J.J., Schultz, G., (ur.): *Integrated Methods in Catchment Hydrology – Tracer, Remote Sensing and New Hydrometric Techniques*, Wallingford, IAHS Publication 258: 249–257.

West, J.A., Stuart, E.G., Findlay, S.E.G., Douglas, A. Burns, D.A, Kathleen, C., Weathers, K.C., Lovett, G.M. 2001. Catchment-Scale Variation in the Nitrate Concentrations of Groundwater Seeps in the Catskill Mountains, New York, U.S.A. *Water, Air, & Soil Pollution*, 132, 3–4: 389–400.

White, A.P., Liu, W.Z. 1994. Bias in information-based measures in decision tree induction. *Machine Learning*, 15: 321–329.

Witten, I. H., Frank, E. 2005. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (Second edition)*, Morgan Kaufmann: 525 str.

Worall, F., Swank, W.T., Burt, T.P. 2003. Changes in stream nitrate concentrations due to land management practices, ecological succession, and climate: Developing a systems approach to integrated catchment response. *Water Resources Research*, 39, 7: 1177–1191.

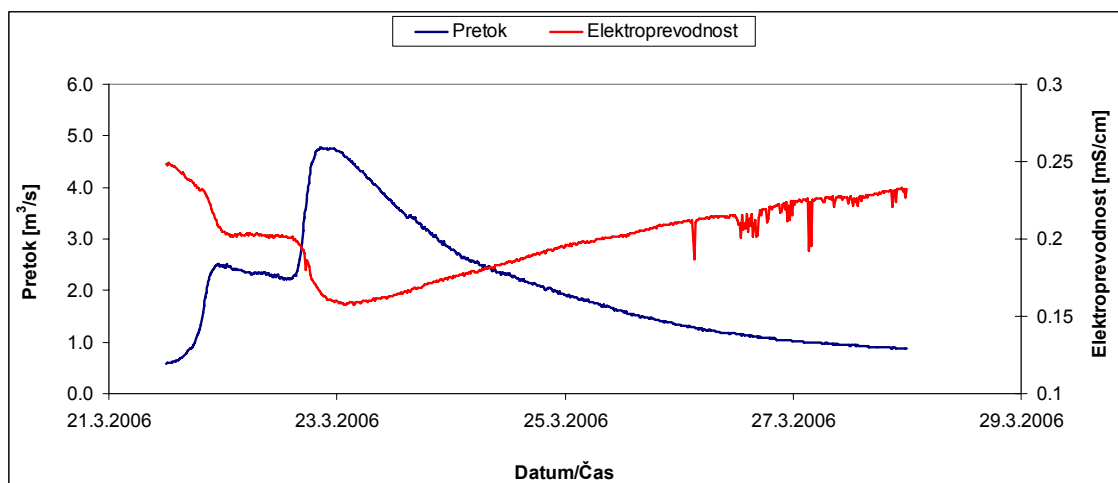
Worall, F., Burt, T.P. 1999. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models. *Journal of Hydrology*, 221: 75–90.

Zaffron, M. 2005. Credible classification for environmental problems. *Environ. Modell. Softw.*, 20: 1003–1012.

Zasaditveni načrti na območju krajevnih enot Kozina in Ilirska Bistrica 2000. Zavod za gozdove Slovenije, Ljubljana, Interno gradivo.

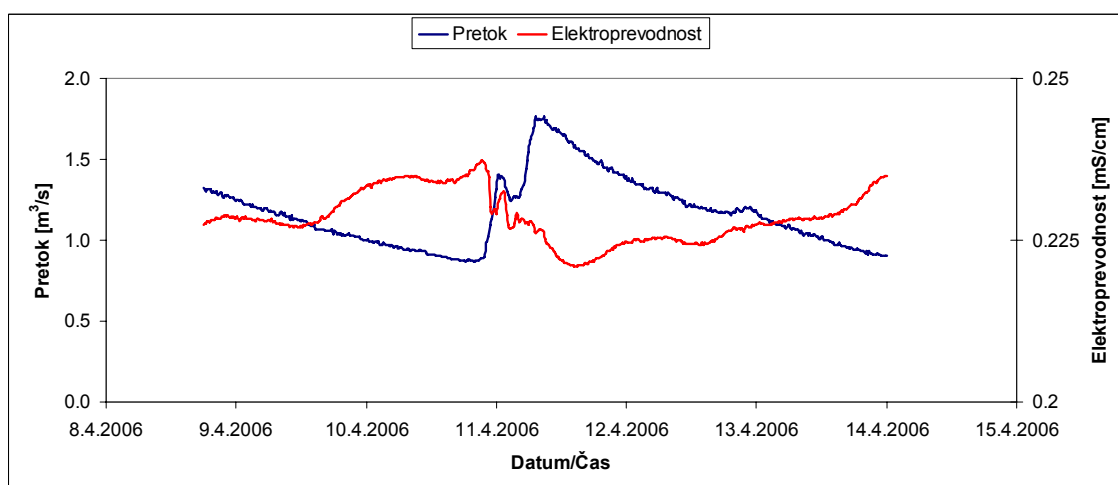
Zitzer, S.F., Dawson, J.O., Gertner, G.Z. 1989. Seasonal changes in nitrogen fixation activity of European black alder and Russian olive. *Seventh Central Hardwood Forest Conference*, Carbondale, Illinois: 134–140.

PRILOGA A Zvezne meritve elektroprevodnosti vode v vodotoku v obdobjih padavinskih dogodkov v letu 2006.



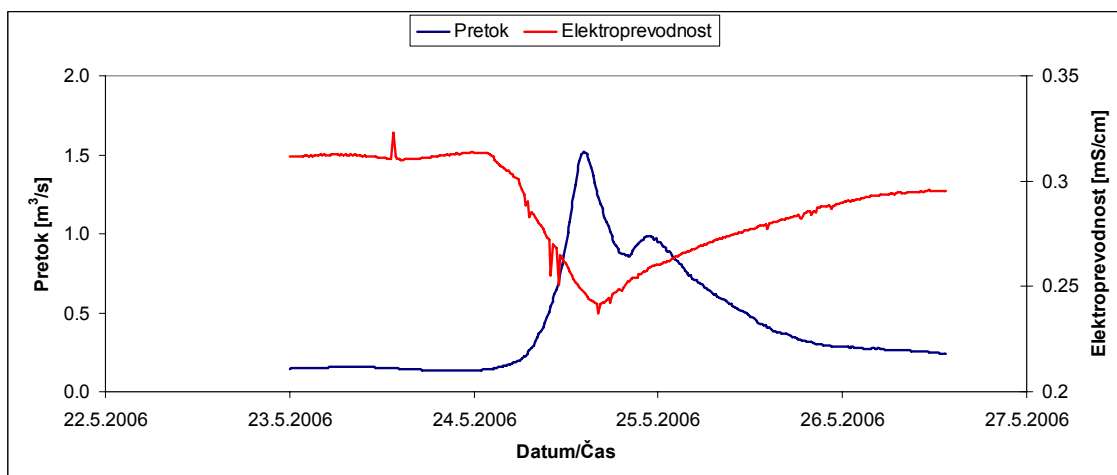
Slika 1: Padavinski dogodek v marcu.

Figure 1: Rainfall event in March.

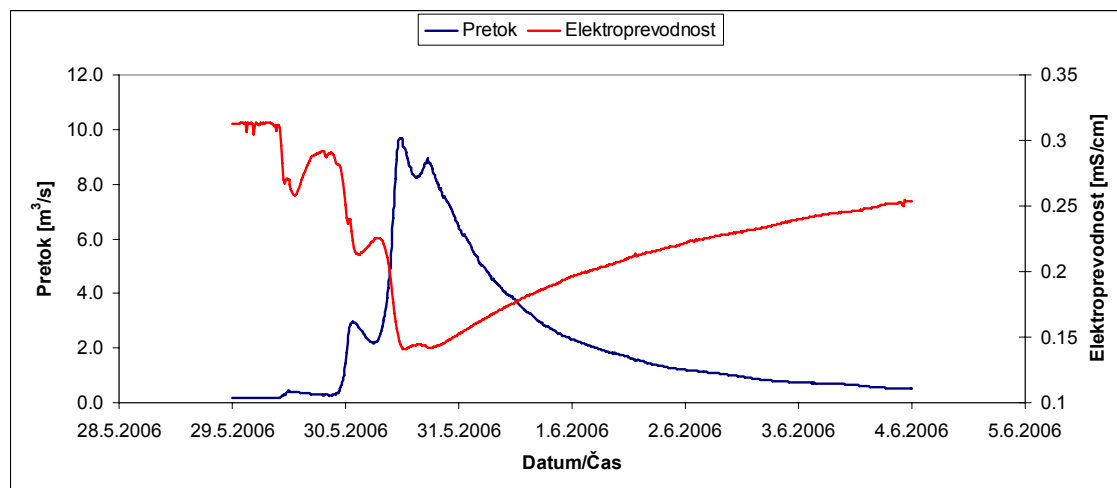


Slika 2: Padavinski dogodek v aprilu.

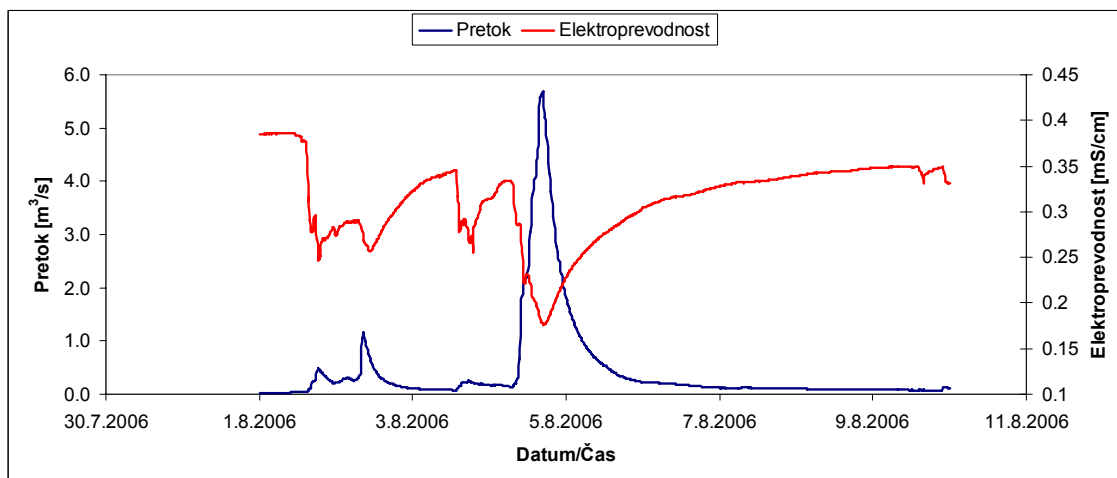
Figure 2: Rainfall event in April.



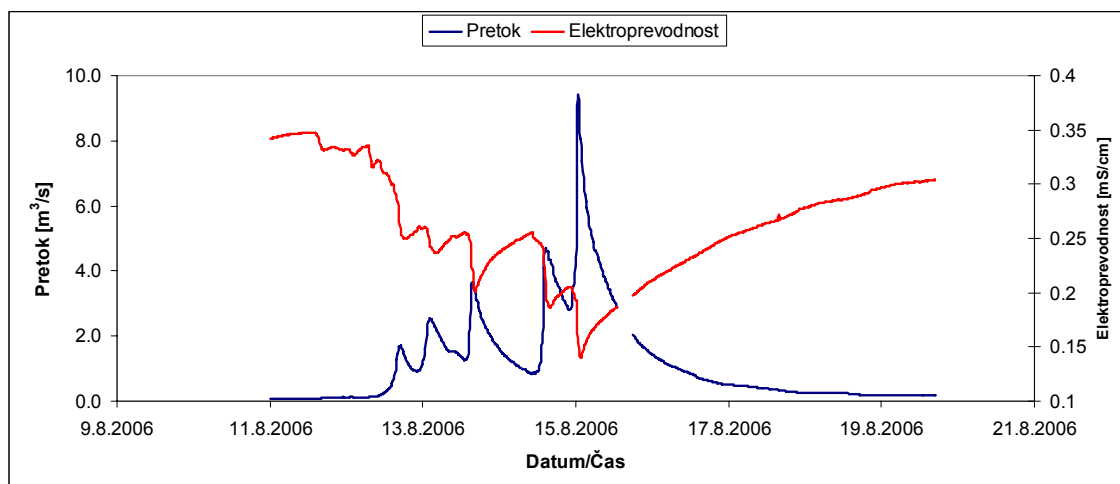
Slika 3: Padavinski dogodek v maju.
Figure 3: Rainfall event in May.



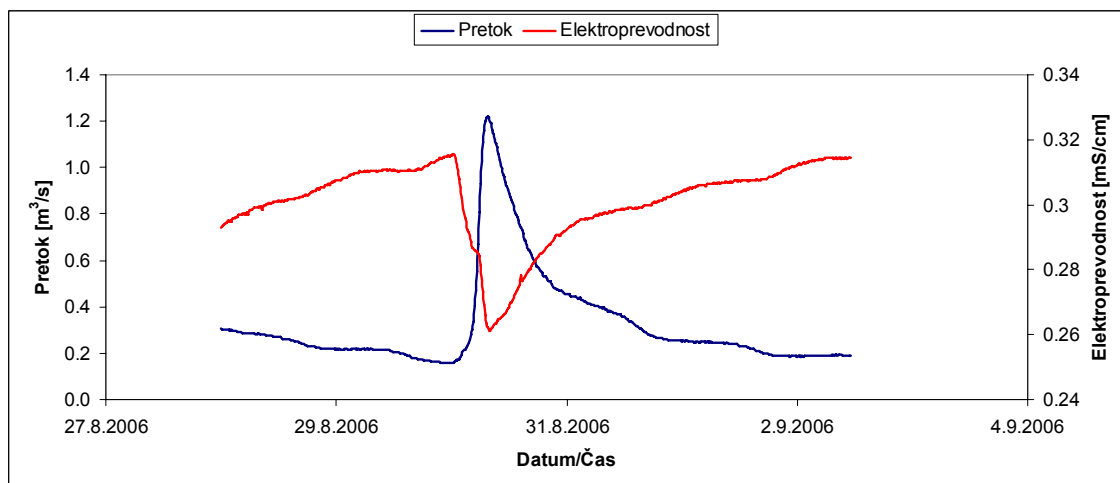
Slika 4: Padavinski dogodek maj–junij.
Figure 4: Rainfall event May–June.



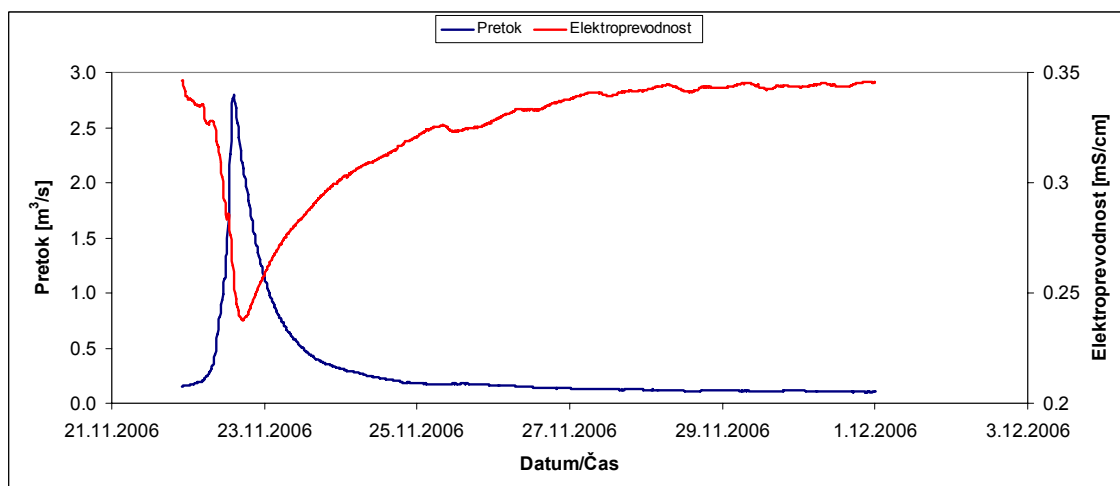
Slika 5: Padavinski dogodek avgust I.
Figure 5: Rainfall event August I.



Slika 6: Padavinski dogodek avgust II.
Figure 6: Rainfall event August II.



Slika 7: Padavinski dogodek avgust III.
Figure 7: Rainfall event August III.



Slika 8: Padavinski dogodek v novembru.
Figure 8: Rainfall event in November.

PRILOGA B Shematski prikaz strukture modelnih dreves glede na kriterij minimalnega števila primerov v posameznem listu.

Modelno drevo, pridobljeno na podlagi kriterija 50 primerov v posameznem listu:	Modelno drevo, pridobljeno na podlagi kriterija 100 primerov v posameznem listu:
<p>API5 <= 17.914 :</p> <ul style="list-style-type: none"> avgT3 <= 10.118 : Psum12h <= 0.3 : avgT14 <= 7.331 : LM1 avgT14 > 7.331 : LM2 Psum12h > 0.3 : Q <= 0.217 : LM3 Q > 0.217 : avgT3 <= 6.791 : LM4 avgT3 > 6.791 : LM5 avgT3 > 10.118 : Psum48h <= 22.3 : API14 <= 23.564 : avgT7 <= 15.398 : DEW <= 0.008 : LM6 DEW > 0.008 : LM7 avgT7 > 15.398 : Q <= 0.152 : LM8 Q > 0.152 : LM9 API14 > 23.564 : LM10 Psum48h > 22.3 : LM11 API5 > 17.914 : avgT14 <= 11.633 : avgT1 <= 9.899 : LM12 avgT1 > 9.899 : TW <= 8.115 : Q <= 0.397 : LM13 Q > 0.397 : LM14 TW > 8.115 : LM15 avgT14 > 11.633 : Psum48h <= 38.937 : API14 <= 32.007 : LM16 API14 > 32.007 : API5 <= 34.812 : avgT14 <= 20.125 : LM17 avgT14 > 20.125 : LM18 API5 > 34.812 : avgT7 <= 18.035 : TW <= 14.535 : LM19 TW > 14.535 : LM20 avgT7 > 18.035 : LM21 Psum48h > 38.937 : Psum24h <= 13.952 : API14 <= 49.454 : LM22 API14 > 49.454 : LM23 Psum24h > 13.952 : Psum48h <= 57.93 : avgT7 <= 14.707 : LM24 avgT7 > 14.707 : LM25 Psum48h > 57.93 : LM26 	<p>API5 <= 17.914 :</p> <ul style="list-style-type: none"> avgT3 <= 10.118 : Psum12h <= 0.3 : avgT14 <= 7.331 : LM1 avgT14 > 7.331 : LM2 (95/9.592%) Psum12h > 0.3 : LM3 avgT3 > 10.118 : Psum48h <= 22.3 : API14 <= 23.564 : avgT7 <= 15.398 : LM4 avgT7 > 15.398 : LM5 API14 > 23.564 : LM6 Psum48h > 22.3 : LM7 API5 > 17.914 : avgT14 <= 11.633 : avgT1 <= 9.899 : LM8 avgT1 > 9.899 : LM9 avgT14 > 11.633 : Psum48h <= 38.937 : API14 <= 32.007 : LM10 API14 > 32.007 : LM11 Psum48h > 38.937 : Psum24h <= 13.952 : LM12 Psum24h > 13.952 : Psum48h <= 57.93 : LM13 Psum48h > 57.93 : LM14

Modelno drevo, pridobljeno na podlagi kriterija 200 primerov v posameznem listu:	Modelno drevo, pridobljeno na podlagi kriterija 500 primerov v posameznem listu:
API5 <= 17.914 : avgT3 <= 10.118 : Psum12h <= 0.3 : LM1 Psum12h > 0.3 : LM2 avgT3 > 10.118 : Psum48h <= 22.3 : LM3 Psum48h > 22.3 : LM4 API5 > 17.914 : avgT14 <= 11.633 : LM5 avgT14 > 11.633 : Psum48h <= 38.937 : API14 <= 32.007 : LM6 API14 > 32.007 : LM7 Psum48h > 38.937 : LM8	API5 <= 17.914 : avgT3 <= 10.118 : LM1 avgT3 > 10.118 : LM2 API5 > 17.914 : avgT14 <= 11.633 : LM3 avgT14 > 11.633 : Psum48h <= 38.937 : LM4 Psum48h > 38.937 : LM5