

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



UNIVERZITETNI PODDIPLOMSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
VARSTVO OKOLJA
DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidatka:

MATEJA ŠKERJANEC, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.

**AVTOMATIZIRANO MODELIRANJE PRI CELOSTNEM
UPRAVLJANJU Z VODNIMI VIRI**

Doktorska disertacija števil.: 237

**AUTOMATED MODELLING FOR INTEGRATED WATER
RESOURCES MANAGEMENT**

Doctoral thesis No.: 237

Temo doktorske disertacije je odobrila Komisija za doktorski študij Univerze v Ljubljani na
20. redni seji, dne 21. septembra 2011.

Za mentorja je bil imenovan prof. dr. Boris Kompare, za somentorico doc. dr. Nataša
Atanasova.

Ljubljana, 7. april 2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Boris Kompare,
- prof. dr. Marina Pintar, UL BF,
- prof. dr. Mitja Brilly,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 20. redni seji, dne 20. aprila 2011.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Marina Pintar, UL BF,
- prof. dr. Mitja Brilly,
- prof. dr. Sašo Džeroski, IJS,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 2. redni seji, dne 26. junija 2013.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- izr. prof. dr. Jože Panjan,
- prof. dr. Marina Pintar, UL BF,
- prof. dr. Mitja Brilly,
- prof. dr. Sašo Džeroski, IJS,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 9. redni seji, dne 26. marca 2014.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **Mateja ŠKERJANEC**, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž., izjavljam, da sem avtorica doktorske disertacije z naslovom: **AVTOMATIZIRANO MODELIRANJE PRI CELOSTNEM UPRAVLJANJU Z VODNIMI VIRI.**

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

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

Ljubljana, 7. april 2014

.....
(podpis)

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	004.925:574.5:628.113(043)
Avtor:	Mateja Škerjanec, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.
Mentor:	prof. dr. Boris Kompare
Somentorica:	doc. dr. Nataša Atanasova
Naslov:	Avtomatizirano modeliranje pri celostnem upravljanju z vodnimi viri
Tip dokumenta:	Doktorska disertacija
Obseg in oprema:	132 str., 39 pregl., 50 sl., 52 en., 7 pril.
Ključne besede:	model porečja, hidrologija, obremenitev s hranili, knjižnica znanja, avtomatizirano modeliranje

Izvleček

V doktorski disertaciji predstavljamo nov pristop k modeliranju hidroloških pojavov in kakovosti voda na ravni porečij, ki omogoča avtomatsko izgradnjo modelov na podlagi domenskega znanja in merjenih podatkov. Osnovo za tovrstno modeliranje predstavlja domenska knjižnica, ki smo jo razvili v sklopu naloge. V knjižnici je zbrano znanje s področja hidrološkega modeliranja in modeliranja procesov spiranja hranil na ravni porečij, pri čemer je vsak proces predstavljen z alternativnimi enačbami. Formalizem, ki smo ga uporabili za zapis knjižnice, je kompatibilen z orodjem ProBMoT. Na podlagi domenske knjižnice in opisa izbranega porečja, ki ga poda uporabnik, ProBMoT generira vse alternativne strukture modela opazovanega sistema. Slednje so avtomatsko umerjene na meritve. Model, ki kaže najmanjše odstopanje med rezultati simulacije modela in meritvami, je izbran kot najboljši model za opis opazovanega sistema. Metodologijo smo testirali na porečju reke Quarteire (Algarve, Portugalska). Rezultati analize povprečne letne vodne bilance ter povprečnih letnih obremenitev reke Quarteire s sedimentom in hranili potrjujejo ugotovitve predhodnih raziskav, kar kaže na primernost uporabe predlaganega pristopa za potrebe hidrološkega modeliranja in modeliranja kakovosti voda na ravni porečij. Dobljeni rezultati so z vidika natančnosti primerljivi oz. boljši od rezultatov, dobljenih z orodjem SWAT. Posledično predstavlja predlagan avtomatiziran pristop pomembno alternativo obstoječim konceptualnim pristopom. S testiranjem dveh modelnih scenarijev (scenarija podnebnih sprememb in scenarija povečanja števila priključkov na čistilne naprave) smo potrdili logično odzivanje zgrajenih modelov na spremenjene vrednosti parametrov in vhodnih podatkov, kar potrjuje uporabnost tovrstnih modelov v sistemih za podporo odločanju na področju celostnega upravljanja z vodnimi viri.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 004.925:574.5:628.113(043)
Author: Mateja Škerjanec, B.Sc.
Supervisor: Prof. Boris Kompare, Ph.D.
Co-advisor: Assist. Prof. Nataša Atanasova, Ph.D.
Title: Automated modelling for integrated water resources management
Document type: Doctoral Dissertation
Notes: 132 p., 39 tab., 50 fig., 52 eq., 7 ann.
Key words: watershed model, hydrology, nutrient loading, knowledge library, automated modelling

Abstract

We introduce a new approach to hydrologic and water quality modelling on a watershed scale, which automatically induces suitable models from domain modelling knowledge and measured data. A central component of the proposed methodology is the domain knowledge library, which was developed within this dissertation. The knowledge encoded in the library comprises hydrological and nutrient loading processes on a watershed scale. For each conceptual process, the library contains various alternative formulations. The library is written in a formalism compliant with the equation discovery tool ProBMoT. Given a user specification of the modelling task, ProBMoT searches the space of alternative candidate models encoded in the library. The generated models are optimized against provided measured data. The best fitted model is proposed to the user as the best model of the observed system. The methodology was applied to the Quarteira river catchment (Algarve, Portugal). Analysis of the average annual water balance, sediment yields and nutrient loadings to the Quarteira river supports the findings of the previous research work, justifying the use of the proposed methodology for hydrological and water quality modelling at the watershed scale. In terms of accuracy, ProBMoT results are comparable or better than the results obtained with SWAT. Consequently, the proposed methodology presents a worthy alternative to the existing conceptual modelling approaches. By testing two different scenarios (climate change scenario and scenario of the increased wastewater treatment plant utilization), we confirmed that the generated hydrological and water quality models are logically responding to the modified parameter values and input data. Therefore, such models could be incorporated into decision support systems in the field of integrated water resources management.

ZAHVALA

Najprej iskrena zahvala doc. dr. Primožu Banovcu, ki me je kot mlado raziskovalko iz gospodarstva zaposlil v svojem podjetju Inštitut za vodarstvo, d.o.o.

Za pomoč in podporo pri nastajanju doktorske disertacije se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Borisu Komparetu in somentorici doc. dr. Nataši Atanasovi.

Posebna zahvala gre prof. dr. Sašu Džeroskemu in Darku Čerepnalkoskemu z Odseka za tehnologije znanja Inštituta Jožef Stefan za prijetno sodelovanje ter vpeljavo v modeliranje z orodjem ProBMoT.

Dr. Pedru Rangeu in dr. Radhouanu Ben-Hamadouju s Centra pomorskih znanosti Univerze Algarve se zahvaljujem za posredovanje podatkov o porečju reke Quarteire.

Ne nazadnje se zahvaljujem tudi Andreju, svojim staršem, prijateljem in sodelavcem, ki so me skozi vsa leta podiplomskega študija bodrili in mi stali ob strani.

Moj doktorski študij je finančno podprla Javna agencija za tehnološki razvoj Republike Slovenije, po pogodbi št. P-MR-08/23.

KAZALO VSEBINE

Stran za popravke	I
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	II
Bibliographic-documentalistic information and abstract	III
Zahvala	III
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VIII
Kazalo slik	XI
Seznam prilog	XV
Index of tables	XVI
Index of figures	XVIII
List of appendices	XXII
Okrajšave	XXIII
Simboli	XXV
Slovar manj znanih besed in tujk	XXVIII
Angleško-slovenski slovar	XXIX
1 UVOD	1
1.1 Modeliranje hidroloških procesov in kakovosti voda na ravni porečij	2
1.2 Razmah modularnega modeliranja in oblikovanje knjižnic	3
1.3 Hipoteze	5
1.4 Cilji	6
2 IZHODIŠČA	7
2.1 Osnove modeliranja	7
2.2 Matematična formulacija okoljskih procesov na ravni porečij	9
2.2.1 Hidrološki procesi	10
2.2.1.1 Površinski odtok (efektivne padavine)	10
2.2.1.2 Evapotranspiracija	14
2.2.1.3 Podpovršinski tok vode	17
2.2.2 Spiranje hranil	19
2.2.2.1 Raztopljena hranila	19
2.2.2.2 Hranila v vezani obliki	20
3 FORMALIZACIJA DOMENSKEGA ZNANJA	28
3.1 Predstavitev komponent	28
3.2 Oblikovanje domenske knjižnice	30
3.3 Priprava konceptualnega modela	34
3.4 Omejitve ProBMoT formalizma in potrebne prilagoditve	36
4 AVTOMATIZIRANO MODELIRANJE Z ORODJEM ProBMoT	39
4.1 Osnove modeliranja z orodjem ProBMoT	39
4.1.1 Koren povprečne kvadratne napake	40
4.1.2 Diferencialna evolucija	41

4.2	Priprava vhodnih datotek	43
4.2.1	Konceptualni model (.pbm)	43
4.2.1.1	Konceptualni model s popolno strukturo	43
4.2.1.2	Konceptualni model z nepopolno strukturo	45
4.2.2	Podatkovna datoteka (.data)	45
4.2.3	Datoteka z nastavitvami (.xml)	46
5	APLIKACIJA DOMENSKE KNJIŽNICE IN ORODJA ProBMoT NA TESTNEM PRIMERU	50
5.1	Opis izbranega porečja	50
5.1.1	Topografija	50
5.1.2	Raba zemljišč	52
5.1.3	Tla in hidrogeologija	53
5.1.4	Hidrometeorološki podatki	57
5.1.5	Kakovost	59
5.1.6	Statistični podatki	60
5.1.7	Odvzemi vode	62
5.2	Modeliranje hidroloških procesov	62
5.2.1	Priprava konceptualnega modela in določitev vrednosti uporabljenih konstant	63
5.2.2	Priprava datotek z vhodnimi podatki	65
5.2.3	Iskanje najboljše strukture hidrološkega modela (obdobje 2000–2004)	68
5.2.4	Validacija hidrološkega modela (obdobje 2009–2010)	76
5.3	Modeliranje kakovosti voda	78
5.3.1	Priprava konceptualnega modela in določitev vrednosti uporabljenih konstant	78
5.3.2	Priprava datoteke z vhodnimi podatki	81
5.3.3	Umerjanje parametrov (obdobje 2000–2004)	84
5.3.4	Validacija modela kakovosti voda (obdobje 2009–2010)	91
5.4	Preigravanje različnih scenarijev	93
5.4.1	Scenarij 1: Podnebne spremembe	94
5.4.2	Scenarij 2: Sprememba števila priključkov na obstoječe čistilne naprave	95
6	REZULTATI	97
6.1	Osnovni scenarij	97
6.2	Scenarij 1	102
6.3	Scenarij 2	103
7	DISKUSIJA	105
7.1	Komentar domenske knjižnice in izbranega formalizma	105
7.2	Modeliranje z orodjem ProBMoT in vloga modelarja	107
7.3	Primerjava predlaganega pristopa z ostalimi, že uveljavljenimi pristopi	108
7.4	Komentar testnega primera in rezultatov	109
8	ZAKLJUČKI	114
8.1	Oblikovanje domenske knjižnice	114
8.2	Aplikacija domenske knjižnice in orodja ProBMoT na testnem primeru	115
8.3	Nadaljnje delo	115

9	POVZETEK	117
10	SUMMARY	120
VIRI		123

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Hidrološke skupine tal (prirejeno po NRCS, 1986).	12
Preglednica 2: Vrednosti parametra CN za urbane površine (prirejeno po NRCS, 1986).	13
Preglednica 3: Vrednosti parametra CN za kmetijske obdelovalne površine (prirejeno po NRCS, 1986).	14
Preglednica 4: Vrednosti parametra CN za ostale kmetijske površine (prirejeno po NRCS, 1986).	15
Preglednica 5: Okvirne vrednosti parametra CV (prirejeno po Haith in sod., 1992).	17
Preglednica 6: Vrednosti parametra AWF (prirejeno po NRCS, 1998).	18
Preglednica 7: Vrednosti parametrov, ki jih uporabljamo za izračun obremenitve iztoka iz greznice (prirejeno po Haith in sod., 1992).	20
Preglednica 8: Vrednosti dejavnika pokrovnosti tal C_{USLE} (prirejeno po Stewart in sod., 1975, ter Novotny in Chesters, 1981).	22
Preglednica 9: Vrednosti dejavnika zaščitnih ukrepov P_{USLE} (prirejeno po Wischmeier in Smith, 1978).	23
Preglednica 10: Vrednosti eksponentnega faktorja m (prirejeno po Wischmeier in Smith, 1978).	23
Preglednica 11: Vrednosti Manningovega koeficienta površinske hrapavosti n_{ov} (prirejeno po Engman, 1983).	25
Preglednica 12: Vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti struge n_{ch} (prirejeno po Chow, 1959).	25
Preglednica 13: Vrednosti parametra n_{acc} , ki predstavlja hitrost akumulacije izbranega hranila na urbanih površinah (prirejeno po Kuo in sod., 1988).	26
Preglednica 14: Vrednosti USGS regresijskih koeficientov za izračun spiranja hranil z urbanih površin (prirejeno po Driver in Tasker, 1990).	27
Preglednica 15: ProBMoT ukazi.	48
Preglednica 16: Lastnosti terena in rečnih odsekov po posameznih podporečjih porečja reke Quarteire.	51
Preglednica 17: Raba zemljišč po posameznih podporečjih porečja reke Quarteire (v procentih površine podporečja).	53
Preglednica 18: Tip tal po posameznih podporečjih porečja reke Quarteire (v procentih površine podporečja).	55
Preglednica 19: Opis obravnavanih hidrometeoroloških postaj na območju pokrajine Algarve (Portugalska).	58
Preglednica 20: Število prebivalcev, priključenih na čistilne naprave oz. greznice (po posameznih podporečjih porečja reke Quarteire).	61
Preglednica 21: Podatki o čistilnih napravah, ki se nahajajo v porečju reke Quarteire.	62

Preglednica 22: Uporabljene vrednosti oz. razponi vrednosti konstant po posameznih podrazdelkih.	64
Preglednica 23: Seznam neodvisnih spremenljivk, ki smo jih obravnavali v posameznem podrazdelku konceptualnega modela, namenjenega opisu hidrološkega stanja v porečju reke Quarteire.	66
Preglednica 24: Seznam meteoroloških postaj, ki smo jih uporabili za določitev vrednosti meteoroloških spremenljivk v posameznih podrazdelkih.	67
Preglednica 25: Prikaz rangiranja hidroloških modelov na osnovi generirane vrednosti RMSE, vrednosti izbranih statističnih kriterijev ter izrazov, uporabljenih za izračun referenčne evapotranspiracije po posameznih podrazdelkih.	69
Preglednica 26: Ocena napovedne sposobnosti hidrološkega modela na podlagi vrednosti izbranih statističnih kriterijev (prirejeno po Moriasi in sod., 2007 ter Van Liew in sod., 2003).	75
Preglednica 27: Ocena uspešnosti hidroloških modelov SWAT in ProBMoT pri napovedovanju pretokov reke Quarteire na iztoku iz porečja, na podlagi primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev.	76
Preglednica 28: Primerjava vrednosti statističnih kriterijev za izbrani hidrološki model, posebej za obdobji umerjanja (2000–2004) in validacije (2009–2010).	77
Preglednica 29: Vrednosti konstant modela kakovosti voda (po posameznih podrazdelkih).	79
Preglednica 30: Seznam neodvisnih spremenljivk, ki smo jih obravnavali v posameznem podrazdelku konceptualnega modela, namenjenega opisu stanja kakovosti voda v porečju reke Quarteire.	82
Preglednica 31: Vpliv stopnje čiščenja na čistilni napravi na učinkovitost odstranitve hranil (v %; prirejeno po Lin, 2001).	83
Preglednica 32: Primerjava štirih testnih struktur modela kakovosti voda, ki za opis izbranih procesov uporabljajo različne kombinacije matematičnih izrazov.	84
Preglednica 33: Ocena napovedne sposobnosti modela kakovosti voda na podlagi vrednosti izbranih statističnih kriterijev (prirejeno po Moriasi in sod., 2007 in Van Liew in sod., 2003).	89
Preglednica 34: Ocena napovedne sposobnosti štirih testnih modelov kakovosti voda na podlagi primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev, posebej za sediment, celotni dušik in celotni fosfor.	90
Preglednica 35: Primerjava vrednosti statističnih kriterijev za izbrani model kakovosti voda, posebej za obdobji umerjanja (2000–2004) in validacije (2009–2010).	93
Preglednica 36: Podatki o kapacitetah čistilnih naprav v porečju reke Quarteire, ocenjenem številu priključenih prebivalcev in procentu izkoriščenosti naprav (za obdobje 2000–2004).	96
Preglednica 37: Povprečna letna obremenitev reke Quarteire s sedimentom, celotnim dušikom in celotnim fosforjem, izračunana na osnovi rezultatov ProBMoT modela.	100
Preglednica 38: Učinek pričakovanih podnebnih sprememb na vodno bilanco porečja reke Quarteire; sprememba povprečnih letnih količin vode glede na osnovni scenarij (v %).	102

Preglednica 39: Učinek povečanja števila priključkov na čistilne naprave; sprememba povprečnih letnih obremenitev reke Quarteire s celotnim dušikom in celotnim fosforjem glede na osnovni scenarij (v %). 104

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz procesov, ki se odvijajo na ravni porečij. Modre puščice predstavljajo hidrološke procese, rjave pa procese spiranja hranil (prirejeno po Škerjanec et al., 2014).	10
Slika 2: Določitev vrednosti parametra CN v odvisnosti od predhodne vlažnosti tal (v mm; prirejeno po Haith, 1985).	13
Slika 3: Graf za določitev koeficienta odplavljanja (povzeto po Vanoni, 1975).	21
Slika 4: Evropska karta erodibilnosti tal (povzeto po Panagos in sod., 2012).	22
Slika 5: Hierarhični prikaz predlog A) entitet in B) procesov, vsebovanih v knjižnici za modeliranje procesov na ravni povodij oz. porečij.	29
Slika 6: Primer specifikacije predloge razdelka.	31
Slika 7: Specifikacija predlog entitet. Primera A in B sta v hierarhičnem razmerju. Primer A predstavlja nadrejeno predlogo entitete z definiranim nizom spremenljivk. V primeru B je podana specifikacija predloge entitete, ki je podrejena entiteti iz primera A. Primer C prikazuje specifikacijo predloge entitete z definiranim nizom konstant.	31
Slika 8: Specifikacija predlog procesov. Primer A predstavlja osnovno specifikacijo predloge procesa z argumenti (v oklepaju) ter nizom konstant in enačb. Primer B podaja specifikacijo nadrejene predloge procesa v hierarhiji procesov, medtem ko sta v primerih C in D definirani dve alternativni predlogi njej podrejenih procesov.	33
Slika 9: Specifikacija predloge procesa, ki omogoča izmenjavo informacij med posameznimi (pod)razdelki. Primer A podaja specifikacijo predloge procesa, ki nastopa na nivoju podrazdelka, primer B pa specifikacijo predloge procesa, ki nastopa na nivoju razdelka. Slednji proces omogoča seštevanje vrednosti več spremenljivk, ki se izračunajo v posameznih podrazdelkih obravnavanega razdelka.	34
Slika 10: Primer specifikacije primerka razdelka.	34
Slika 11: Specifikacija primerkov entitet. Primer A predstavlja primerke entitete z definiranim nizom spremenljivk, primer B pa primerke entitete z definiranim nizom konstant.	35
Slika 12: Specifikacija primerka procesa z definiranim nizom konstant.	36
Slika 13: Specifikacija primerka procesa, ki omogoča izmenjavo informacij med posameznimi (pod)razdelki.	36
Slika 14: Prikaz modeliranja z orodjem ProBMoT. Na podlagi domenske knjižnice in konceptualnega modela, ki ga poda uporabnik, se generirajo različne kandidatne strukture modela. Posamezne strukture so najprej prevedene v nize enačb in nato umerjene napram meritvam, s ciljem določitve najboljšega modela oz. modela, ki kar najbolje opiše obnašanje opazovanega sistema. V shematskem prikazu modelov predstavljajo ovali entitete, pravokotniki pa procese. Obarvani pravokotniki ponazarjajo različne matematične formulacije posameznega procesa.	40
Slika 15: Prikaz algoritma diferencialne evolucije (prirejeno po Worden in Manson, 2012).	42

- Slika 16: Generiranje različnih struktur modela na osnovi konceptualnega modela z A) popolno in B) nepopolno strukturo. Ovali na sliki predstavljajo entitete, pravokotniki pa procese. Obarvani pravokotniki ponazarjajo različne matematične formulacije posameznega procesa. 44
- Slika 17: Izsek iz datoteke z vhodnimi podatki (.data). V prvi vrstici so podana imena spremenljivk, v vseh nadaljnjih vrsticah pa njihove vrednosti, izmerjene v posameznem časovnem koraku, razmejene z vejico. Če v posameznem časovnem koraku nimamo meritev, lahko izpustimo celotno vrstico (primer: manjkajoča vrstica v časovnem koraku 3). 45
- Slika 18: Specifikacija povezav do knjižnice, konceptualnega modela in datoteke z vhodnimi podatki. 46
- Slika 19: Specifikacija spremenljivk v datoteki .xml. Podani so primeri specifikacije A) spremenljivke, ki ponazarja čas, B) neodvisne spremenljivke, C) spremenljivke, na osnovi katere umerjamo model in D) odvisne spremenljivke. 47
- Slika 20: Specifikacija metod za A) umerjanje parametrov in B) simulacijo. 48
- Slika 21: Lokacija izbranega testnega območja. 50
- Slika 22: Topografija porečja reke Quarteire. 51
- Slika 23: Raba zemljišč v porečju reke Quarteire. 52
- Slika 24: Pedološka karta porečja reke Quarteire. 54
- Slika 25: Hidrološka klasifikacija tal v porečju reke Quarteire (prirejeno po Agência Portuguesa do Ambiente, 2013b). 55
- Slika 26: Hidrogeološka karta porečja reke Quarteire (prirejeno po Agência Portuguesa do Ambiente, 2013b). 56
- Slika 27: Prikaz ocenjenega pronicanja na območju vodonosnika Querença-Silves (v odstotkih padavin) ter lokacij črpališč za javno vodooskrbo, kraških izvirov, opazovalnih vrtin in namakalnih površin (povzeto po Stigter in sod., 2009). 56
- Slika 28: Lokacije vseh hidrometeoroloških postaj na območju pokrajine Algarve (Portugalska). Meje podporečij reke Quarteire so označene z rdečimi linijami. 57
- Slika 29: Meteorološka postaja São Brás de Alportel (Portugalska) – povprečne mesečne padavine (mm) in temperature (°C) za obdobje 1940–1998. 58
- Slika 30: Hidrološka postaja Ponte Rodoviária (Portugalska) – povprečni mesečni pretoki (m³/s) na iztoku iz porečja reke Quarteire, za obdobje 1991–2011. 59
- Slika 31: Merilna mesta za določanje kakovosti površinskih in podzemnih voda v porečju reke Quarteire. 60
- Slika 32: Poseljenost porečja reke Quarteire po posameznih statističnih enotah, z lokacijami čistilnih naprav. 61
- Slika 33: Oblikovanje hidroloških odzivnih enot na območju reke Quarteire, na osnovi združevanja različnih tipov rabe zemljišč. 64
- Slika 34: Oblikovanje Thiessenovih poligonov na območju reke Quarteire, za obdobje umerjanja (2000–2004). Uporabljene oznake meteoroloških postaj se navezujejo na preglednico 19. 66

- Slika 35: Primerjava povprečnih dnevni pretokov, izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, z rezultati simulacije hidrološkega modela z najnižjo (levo) in najvišjo (desno) izračunano vrednostjo RMSE, za obdobje 2000–2004. 72
- Slika 36: Primerjava izmerjenih povprečnih dnevni pretokov (m^3/s) in padavin (mm) z rezultati izbranega ProBMoT modela, za obdobje 2000–2004. 72
- Slika 37: Rezultati križne korelacije med padavinami, izmerjenimi na izbranih meteoroloških postajah, in pretokom reke Quarteire, izmerjenim na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, za obdobje 2000–2004. 74
- Slika 38: Primerjava povprečnih dnevni pretokov (m^3/s), izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, z rezultati modelov ProBMoT in SWAT, za obdobje 2000–2004. 75
- Slika 39: Primerjava povprečnih dnevni pretokov (m^3/s), izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, z rezultati validacije izbranega ProBMot modela, za obdobje 2009–2010. 77
- Slika 40: Primerjava rezultatov štirih testnih modelov kakovosti voda in dnevni obremenitev s suspendiranim sedimentom (v t/dan), izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, za obdobje 2000–2004. 85
- Slika 41: Prikaz povprečnih dnevni pretokov (m^3/s) in koncentracij suspendiranega sedimenta (mg/l), izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, v obdobju med letoma 2000 in 2004. 86
- Slika 42: Primerjava rezultatov štirih testnih modelov kakovosti voda in dnevni obremenitev s celotnim dušikom (kg/dan), izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, v obdobju 2000–2004. 87
- Slika 43: Primerjava rezultatov štirih testnih modelov kakovosti voda in dnevni obremenitev s celotnim fosforjem (v kg/dan), izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, za obdobje 2000–2004. 88
- Slika 44: Primerjava rezultatov validacije izbranega modela kakovosti voda z dnevnimi obremenitvami s suspendiranim sedimentom (t/dan), celotnim dušikom (kg/dan) in celotnim fosforjem (kg/dan). Obremenitve so bile izmerjene na postaji Ponte Rodoviária, v obdobju 2009–2010. 92
- Slika 45: Napovedane spremembe povprečnih temperatur na Iberskem polotoku – primerjava projekcij različnih globalnih klimatskih modelov (prirejeno po Santos in sod., 2001). 94
- Slika 46: Povprečni letni vodni bilanci porečja reke Quarteire (levo) in depresije Nave do Barão (desno), za obdobje 2000–2004. 98
- Slika 47: Primerjava povprečnih letni vodni bilanc po posameznih podrazdelkih za obdobje 2000–2004. Podrazdelki ponazarjajo hidrološke odzivne enote porečja reke Quarteire s homogeno rabo zemljišč. 99
- Slika 48: Prispevki posameznih podrazdelkov k pretoku reke Quarteire (v %). 99
- Slika 49: Prispevki posameznih podrazdelkov k obremenitvi reke Quarteire s celotnim dušikom in celotnim fosforjem (v %). 100
- Slika 50: Prispevki površinskega (s_r) in baznega odtoka (g_w), spiranja delcev s površja (s_{ed}) ter iztokov iz greznic (s_{ept}) k obremenitvi površinskih voda na območju kmetijskih

(*sub1.rural*, zgoraj) in naravnih površin porečja reke Quarteire (*sub1.natural*, spodaj)
s celotnim dušikom (levo) in celotnim fosforjem (desno), v %.

101

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: HIERARHIČNI PRIKAZ PREDLOG A) ENTITET IN B) PROCESOV,
VSEBOVANIH V KNJIŽNICI (V ANGLEŠČINI)

PRILOGA B: DOMENSKA KNJIŽNICA

PRILOGA C: PARAMETRI, VKLJUČENI V KNJIŽNICO ZA MODELIRANJE POREČIJ

PRILOGA D: KONCEPTUALNI MODEL, NAMENJEN MODELIRANJU HIDROLOŠKIH
POJAVOV V POREČJU REKE QUARTEIRE

PRILOGA E: PRIMERJAVA HIDROLOŠKIH MODELOV POREČJA REKE QUARTEIRE,
GENERIRANIH Z ORODJEM ProBMoT

PRILOGA F: KONCEPTUALNI MODEL, NAMENJEN MODELIRANJU KAKOVOSTI VODA
V POREČJU REKE QUARTEIRE

PRILOGA G: PRIMERJAVA UMERJENIH VREDNOSTI PARAMETROV ŠTIRIH TESTNIH
MODELOV, NAMENJENIH MODELIRANJU KAKOVOSTI VODA V POREČJU
REKE QUARTEIRE

INDEX OF TABLES

Table 1: Hydrologic soil groups (adapted from NRCS, 1986).	12
Table 2: Runoff curve numbers for urban areas (adapted from NRCS, 1986).	13
Table 3: Runoff curve numbers for cultivated agricultural lands (adapted from NRCS, 1986).	14
Table 4: Runoff curve numbers for other agricultural lands (adapted from NRCS, 1986).	15
Table 5: Approximate values for CV (adapted from Haith et al., 1992).	17
Table 6: Available water fraction values (adapted from NRCS, 1998).	18
Table 7: Parameter values for the calculation of septic tank effluent loadings (adapted from Haith et al., 1992).	20
Table 8: Values of the cover and management factor C_{USLE} (adapted from Stewart et al., 1975, and Novotny and Chesters, 1981).	22
Table 9: Values of the supporting practice factor P_{USLE} (adapted from Wischmeier and Smith, 1978).	23
Table 10: Values of the exponential term m (adapted from Wischmeier and Smith, 1978).	23
Table 11: Values of the Manning's roughness coefficient n_{ov} for the overland flow (adapted from Engman, 1983).	25
Table 12: Values of the Manning's roughness coefficient n_{ch} for the channel flow (adapted from Chow, 1959).	25
Table 13: Values of the parameter n_{acc} representing nutrient accumulation rates in urban areas (adapted from Kuo et al., 1988).	26
Table 14: Values of the USGS urban regression coefficients for the calculation of nutrient wash-off in urban areas (adapted from Driver and Tasker, 1990).	27
Table 15: ProBMoT commands.	48
Table 16: Terrain and river stretch characteristics for each subcatchment of the Quarteira river catchment.	51
Table 17: Land use distribution per each subcatchment of the Quarteira river catchment (in percentage shares of the subcatchment area).	53
Table 18: Soil type per each subcatchment of the Quarteira river catchment (in percentage shares of the subcatchment area).	55
Table 19: Description of the selected hydrometeorological stations within the Algarve region (Portugal).	58
Table 20: Number of inhabitants connected to wastewater treatment plants or septic tanks (per each subcatchment of the Quarteira river catchment).	61
Table 21: Information about the wastewater treatment plants located within the Quarteira river catchment.	62
Table 22: Values/ranges of constants that were used in specific subcompartments.	64

Table 23: List of all the exogenous variables that we took into account in a single subcompartment of the conceptual model used to describe the Quarteira river catchment hydrology.	66
Table 24: List of meteorological stations that were used for the determination of meteorological variables in each subcompartment.	67
Table 25: Ranking of hydrological models based on the generated RMSE values, together with the values of the selected statistical indicators and the formulations used for the calculation of reference evapotranspiration in each subcompartment.	69
Table 26: Hydrological model performance ratings for the selected statistical indicators (adapted from Moriasi et al., 2007, and Van Liew et al., 2003).	75
Table 27: Assessment of the ability of hydrological models SWAT and GWLF to predict Quarteira river flow rates at the catchment outlet, based on the comparison of the selected statistical indicator values.	76
Table 28: Comparison of the statistical indicator values calculated for the selected hydrological model, separately for the calibration (2000–2004) and validation period (2009–2010).	77
Table 29: Parameter values of the water quality model (per each subcompartment).	79
Table 30: List of all the exogenous variables that we took into account in a single subcompartment of the conceptual model used to describe water quality conditions within the Quarteira river catchment.	82
Table 31: Influence of the wastewater treatment plant stages on the nutrient removal efficiencies (in %; adapted from Lin, 2001).	83
Table 32: Comparison of four water quality model structures using different combinations of mathematical expressions to describe the selected processes.	84
Table 33: Water quality model performance ratings for the selected statistical indicators (adapted from Moriasi et al., 2007, and Van Liew et al., 2003).	89
Table 34: Assessment of the ability of the four water quality models under study to predict sediment, total nitrogen and total phosphorus loads, based on the comparison of the selected statistical indicator values.	90
Table 35: Comparison of the statistical indicator values obtained for the selected water quality model, for the calibration (2000–2004) and validation period (2009–2010)	93
Table 36: Capacities of wastewater treatment plants located within the Quarteira river catchment, estimated number of connected inhabitants, and treatment plant utilization rates (for the period 2000–2004).	96
Table 37: Average annual sediment, total nitrogen and total phosphorus loads transferred to the Quarteira river, calculated based on the ProBMoT model results.	100
Table 38: Projected climate change impact on the water balance of the Quarteira river catchment; changes in average annual water quantities, as compared to the baseline scenario (in %).	102
Table 39: Impact of an increase in the number of connections to the waste water treatment plants; changes in the average annual total nitrogen and total phosphorus loads, transferred to the Quarteira river, as compared to the baseline scenario (in %).	104

INDEX OF FIGURES

Figure 1: Schematic presentation of watershed processes. Blue arrows represent major fluxes of the water cycle, while green arrows symbolize nutrient fluxes (adapted from Škerjanec et al., 2014).	10
Figure 2: Curve number determination based on the antecedent moisture condition (in mm; adapted from Haith, 1985).	13
Figure 3: Graph used for the determination of sediment delivery ratio (adapted from Vanoni, 1975).	21
Figure 4: European soil erodibility map (adapted from Panagos et al., 2012).	22
Figure 5: Hierarchical organization of template A) entities and B) processes encoded in the watershed modelling library.	29
Figure 6: Specification of a compartment template – an example.	31
Figure 7: Specification of entity templates. Examples A and B are in a hierarchical relationship. The entity template in example A defines a parent entity with a list of variables, while example B defines its sub-entity. Example C shows the specification of an entity template that contains constants only.	31
Figure 8: Specification of process templates. Example A presents a basic template process specification with a list of arguments (in brackets), a list of constants, and a list of equations. Example B shows the definition of a template super-process in the process hierarchy, while examples C and D define two alternative template sub-processes.	33
Figure 9: Specification of an inter-compartmental process template. Example A provides a template process specification, acting at the sub-compartment level. Example B provides the definition of a template process that is calculated at the compartment level. The latter process enables the aggregation of several variables, which are calculated in the sub-compartments of the observed compartment.	34
Figure 10: Specification of a compartment instance – an example.	34
Figure 11: Specification of entity instances. Example A defines an entity instance with a list of variables, while example B presents the specification of an entity instance that contains constants only.	35
Figure 12: Specification of a process instance with a list of constants.	36
Figure 13: Specification of an inter-compartmental process instance.	36
Figure 14: Schematic representation of the ProBMoT modelling approach. Candidate model structures are generated from the modelling library and a user-specified conceptual model of an observed system. The candidate models are transformed to equations and calibrated against measurements to obtain the best model of the system, i.e., the model that fits the measurements best. In the schematic representation of the models, ovals and rectangles are used to depict the entities and processes respectively. Coloured rectangles represent different process formulations.	40

Figure 15: Schematic representation of the differential evolution algorithm (adapted from Worden and Manson, 2012).	42
Figure 16: Generation of candidate model structures by using A) a complete and B) an incomplete conceptual model. Ovals represent entities while the rectangles depict processes. Coloured rectangles represent different process formulations.	44
Figure 17: Input data file (.data) fragment. Names of the variables are given in the first row, followed by the rows containing values of the selected variables measured at specific time steps. These values are separated with commas. If we do not have measurements for a given time step, we can remove the entire data row (example: missing row at the time step 3).	45
Figure 18: Specification of links to files containing a library, a conceptual model and an input data.	46
Figure 19: Specification of variables within the .xml file. Examples represent the specification of A) a time variable, B) an exogenous variable, C) a calibration variable and D) an endogenous variable.	47
Figure 20: Specification of the A) optimization and B) simulation method.	48
Figure 21: Location of the selected study area.	50
Figure 22: Topography of the Quarteira river catchment.	51
Figure 23: Land use within the Quarteira river catchment.	52
Figure 24: Soil map of the Quarteira river catchment.	54
Figure 25: Hydrologic soil classification within the Quarteira river catchment (adapted from Agência Portuguesa do Ambiente, 2013b).	55
Figure 26: Hydrogeological map of the Quarteira river catchment (adapted from Agência Portuguesa do Ambiente, 2013b).	56
Figure 27: Spatial distribution of recharge within the Querença-Silves aquifer (expressed as percentage of precipitation), together with the locations of public supply wells, springs, observation wells and irrigated areas (adapted from Stigter et al., 2009).	56
Figure 28: Hydrometeorological stations located within the Algarve region (Portugal). Red lines represent the boundaries of the Quarteira river subcatchments.	57
Figure 29: Meteorological station São Brás de Alportel (Portugal) – average monthly rainfall (mm) and temperatures (°C) for the period 1940–1998.	58
Figure 30: Hydrological station Ponte Rodoviária (Portugal) – mean monthly discharges (m ³ /s) at the outlet of the Quarteira river catchment for the period 1991–2011.	59
Figure 31: Surface water and groundwater quality monitoring stations located within the Quarteira river catchment.	60
Figure 32: Population densities within the Quarteira river catchment (per statistical units), together with the wastewater treatment plant locations.	61
Figure 33: Formation of hydrological response units within the Quarteira river catchment based on the aggregation of different land use types.	64

- Figure 34: Quarteira river catchment delineation by using Thiessen polygons, for the period 2000–2004. The numbers used to annotate the meteorological stations are explained in Table 19. 66
- Figure 35: Comparison of the average daily flow rates, measured at the Ponte Rodoviária hydrological station, and the simulation results of the hydrological model with the lowest (left) and the highest (right) generated RMSE value, for the period 2000–2004. 72
- Figure 36: Comparison of the average daily flow rates (m^3/s), precipitation measurements (mm), and the selected ProBMoT model results, for the period 2000–2004. 72
- Figure 37: Results of the cross-correlation analysis between the precipitation data, measured at the selected meteorological stations, and the Quarteira river flow data, measured at the Ponte Rodoviária hydrological station, for the period 2000–2004. 74
- Figure 38: Comparison of average daily flow rates (m^3/s), measured at the Ponte Rodoviária hydrological station, and simulation results, obtained with ProBMoT and SWAT, for the period 2000–2004. 75
- Figure 39: Comparison of average daily flow rates (m^3/s), measured at the Ponte Rodoviária hydrological station, and validation results of the selected ProBMoT model, for the period 2009–2010. 77
- Figure 40: Comparison between the results of the four water quality models and the daily suspended sediment loads (in t/day), measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2000–2004. 85
- Figure 41: Average daily flow rates (m^3/s) and suspended sediment concentrations (mg/l), measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2000–2004. 86
- Figure 42: Comparison between the results of the four water quality models and the daily total nitrogen loads (kg/day), measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2000–2004. 87
- Figure 43: Comparison between the results of the four water quality models and the daily total phosphorus loads (in kg/day), measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2000–2004. 88
- Figure 44: Comparison between the validation results for the selected hydrological model and the daily suspended sediment (t/day), total nitrogen (kg/day) and total phosphorus (kg/day) loads, measured between 2009 and 2010 at the Ponte Rodoviária station. 92
- Figure 45: Predicted evolution of the mean temperature in the Iberian Peninsula – comparison of the projections made by different global climate models (adapted from Santos et al., 2001). 94
- Figure 46: Average annual water balances for the Quarteira river catchment (left) and the Nave do Barão depression (right), for the period 2000–2004. 98
- Figure 47: Comparison of average annual water balances in different subcompartments, for the period 2000–2004. Subcompartments correspond to the hydrologic response units of the Quarteira river catchment, characterized by homogeneous land use. 99
- Figure 48: Contribution of different subcompartments to the Quarteira river flow (in %). 99

Figure 49: Average annual contribution of different subcompartments to the total nitrogen and total phosphorus loads, transferred to the Quarteira river (in %). 100

Figure 50: Contribution of surface runoff (*sr*), baseflow (*gw*), sediment wash-off (*sed*) and septic tank effluents (*sept*) to the total nitrogen (left) and total phosphorus loads (right), transferred to surface waters of the Quarteira river catchment, for rural (*sub1.rural*, above) and natural areas (*sub1.natural*, below), in %. 101

LIST OF APPENDICES

APPENDIX A: HIERARCHICAL REPRESENTATION OF THE A) ENTITY AND B) PROCESS INSTANCES, INCLUDED IN THE LIBRARY (IN ENGLISH)

APPENDIX B: THE DOMAIN LIBRARY

APPENDIX C: PARAMETERS, INCLUDED IN THE WATERSHED MODELLING LIBRARY

APPENDIX D: CONCEPTUAL MODEL FOR MODELLING HYDROLOGICAL PROCESSES IN THE QUARTEIRA RIVER CATCHMENT

APPENDIX E: COMPARISON OF THE QUARTEIRA RIVER HYDROLOGICAL MODELS, GENERATED WITH ProBMoT

APPENDIX F: CONCEPTUAL MODEL FOR MODELLING WATER QUALITY IN THE QUARTEIRA RIVER CATCHMENT

APPENDIX G: COMPARISON OF THE CALIBRATED PARAMETER VALUES OF THE FOUR EXPERIMENTAL MODELS FOR MODELLING WATER QUALITY IN THE QUARTEIRA RIVER CATCHMENT

OKRAJŠAVE

AWF	Available Water Fraction
CCDR	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional
CLC	Corine Land Cover
CN	Curve Number
ČN	Čistilna naprava
DASA	Differential Ant-Stigmergy Algorithm
DE	Differential Evolution
DMV	Digitalni model višin
DRAP Algarve	Direcção Regional de Agricultura e Pescas do Algarve
DSS	Decision Support System
ER	Enrichment Ratio
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FAO	Food Agricultural Organization
GIS	Geografski informacijski sistem
GWLF	Generalized Watershed Loading Functions
HSPF	Hydrological Simulation Program – Fortran
HRU	Hydrologic Response Unit
IEM	Integrated Environmental Modelling
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IWRM	Integrated Water Resources Management
LHEM	Library of Hydro-Ecological Modules
MČN	Mala čistilna naprava
MONERIS	Modelling Nutrient Emissions in River Systems
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation
NRCS	National Resources Conservation Service
NS	Nash-Sutcliffe koeficient
OMS	Object Modelling System
OpenMI	Open Modelling Interface and Environment
PBIAS	Percent Bias
PE	Populacijski ekvivalent
ProBMoT	Process-Based Modelling Tool
RMSE	Root Mean Square Error

RSR	RMSE – Observations' Standard Deviation Ratio
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SCS	Soil Conservation Service
SME	Spatial Modelling Environment
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SPARROW	Spatially Referenced Regressions on Watershed Attributes
STDEV	Standardni odklon
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
USDA	United States Department of Agriculture
USLE	Universal Soil Loss Equation

SIMBOLI

Simbol	Opis	Enota
a	erozijski koeficient	
ant	vsota padavin, zapadlih v preteklih petih dneh	mm
A	velikost prispevne površine	ha, km ²
AWF	volumski delež rastlinam dostopne vode v tleh	mm vode/mm tal
α_{slp}	naklon pobočja	%
α_{tc}	delež dnevne količine padavin, ki pade v času koncentracije	
$\alpha_{0,5}$	delež dnevne količine padavin, ki pade v polurnem nalivu z največjo intenziteto	
β	hitrost spiranja	/dan
β_{0-4}	regresijski koeficienti	
C	koncentracija substrata	mg/l
C_{gw}	koncentracija hranila v baznem odtoku	mg/l
C_{soil}	koncentracija hranila v tleh	g hranila/t tal
C_{sr}	koncentracija hranila v površinskem odtoku	mg/l
C_{USLE}	dejavnik pokrovnosti in obdelave tal	
CN_1	parameter CN v sušnih razmerah	
CN, CN_2	parameter CN v povprečnih vlažnostnih razmerah	
CN_3	parameter CN v mokrih razmerah	
CV	koeficient pokrovnosti	
d_r	inverzna relativna razdalja med Zemljo in Soncem	
DR	koeficient odplavljanja	
DS	količina vodnih izgub zaradi globokega pronicanja	mm
δ	deklinacija sonca	rad
e	nasičen parni tlak	mbar
e_{mut}	obremenitev s hranili na prebivalca	g/preb
ER	obogatitveno razmerje	
ET	količina dejanske evapotranspiracije, izhlapela voda	mm
ET_0	količina referenčne evapotranspiracije	mm
ET_p	količina potencialne evapotranspiracije	mm
φ	zemljepisna širina	rad
G_{sc}	solarna konstanta	MJ/(m ² ·min)

Simbol	Opis	Enota
GW	količina baznega odtoka	mm
GW_{ann}	letna količina baznega odtoka	mm
H	število sončnih ur	/dan
imp	delež neprepustnih površin	
I_a	začetne izgube	mm
J	dan v letu	
k	konstanta, ki nastopa v izračunu dinamične vrednosti CN	
K_C	konstanta nasičenja za substrat	mg/l
K_{USLE}	dejavnik erodibilnosti tal	(t·ha·h)/(ha·MJ·mm)
L	dolžina struge	km
L_D	obremenitev z raztopljenimi hranili	kg/dan
$L_{D_{gw}}$	obremenitev z raztopljenimi hranili – prispevek baznega odtoka	kg/dan
$L_{D_{ps}}$	obremenitev z raztopljenimi hranili – prispevek točkovnih virov	kg/dan
$L_{D_{sept}}$	obremenitev z raztopljenimi hranili – prispevek greznic	kg/dan
$L_{D_{sr}}$	obremenitev z raztopljenimi hranili – prispevek površinskega odtoka	kg/dan
L_S	obremenitev s hranili v vezani obliki	kg/dan
$L_{S_{rural}}$	obremenitev s hranili v vezani obliki s kmetijskih površin	kg/dan
$L_{S_{urb}}$	obremenitev s hranili v vezani obliki z urbanih površin	kg/dan
L_{slp}	dolžina pobočja	m
LS_{USLE}	topografski dejavnik	
λ	izparilna toplota vode	MJ/kg
m	eksponentni faktor	
μ	specifična hitrost rasti mikroorganizmov	/dan
μ_{max}	maksimalna specifična hitrost rasti mikroorganizmov	/dan
n_{acc}	hitrost akumulacije	kg/(ha·dan)
n_{ch}	Manningov koeficient hrapavosti struge	
n_{inh}	število prebivalcev, priključenih na posamezno greznico	preb
n_{ov}	Manningov koeficient površinske hrapavosti porečja	
N_{acc}	količina hranil, ki se akumulirajo na določeni prispevni površini	kg/ha
P_{USLE}	dejavnik zaščitnih ukrepov	
$Perc$	količina vode, ki pronica	mm
q_{peak}	maksimalni površinski odtok	m ³ /s
Q	količina vode, ki površinsko odteče	mm

Simbol	Opis	Enota
Q_{acc}	akumuliran površinski odtok	mm
r	recesijska konstanta	
R	višina padavin	mm
R_a	jakost sončnega obsevanja	MJ/(m ² ·dan)
R_{USLE}	dejavnik padavin in odtoka	(MJ·mm)/(ha·h)
s	konstanta ponikanja	
sed	količina erodiranih tal	t/dan
slp	povprečni naklon porečja	m/m
slp_{ch}	povprečni naklon struge	m/m
S	maksimalno potencialno zadrževanje povodja oz. porečja	mm
SS	količina vode v plitvi nasičeni plasti tal	mm
t_{ch}	čas potovanja vode v strugi do iztočnega profila	h
t_{conc}	čas koncentracije	h
t_{ov}	čas potovanja vode po površini porečja do struge	h
T, T_{avg}	povprečna temperatura zraka	°C
T_{max}	maksimalna temperatura zraka	°C
T_{min}	minimalna temperatura zraka	°C
u_{nut}	poraba hranila s strani rastlin	g/preb
U	količina vode v nenasičeni plasti tal	mm
U^*	količina rastlinam dostopne vode v tleh	mm
ω_s	kot Sonca ob sončnem zahodu	rad
Y	količina odplavljenega sedimenta	t/dan

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

albedo	odbojnost
dedukcija	sklepanje iz splošnega na posamezno
deklinacija Sonca	kotna oddaljenost Sonca od ravnine nebesnega ekvatorja
diferencialna evolucija	evolucijski algoritem, ki s svojim obnašanjem posnema biološke procese genetskega dedovanja in preživetja najsposobnejših osebkov
entiteta	kar je, obstaja
fluvisoli	mlada tla, ki so se razvila na rečnih naplavinah in kažejo aluvialno stratifikacijo
indukcija	sklepanje iz posameznega na splošno
kambisoli	zmerno razvita tla, ki imajo v spodnjem delu profila zaradi preperele matične podlage barvno in strukturno spremembo
litosoli	zelo plitva, nerazvita tla, pretežno sestavljena iz razdrobljenega drobirja in kamenja
luvisoli	kisla tla, ki imajo z glino obogaten spodnji del profila
obogatitveno razmerje	razmerje med vsebnostjo hranila v odplavljenem sedimentu in v tleh
ontologija	disciplina, ki se ukvarja z opisom in predstavitvijo domenskega znanja
poljska kapaciteta	maksimalna količina vode, ki jo tla še lahko zadržijo po obilnem vlaženju in gravitacijskem precejanju
semantika	nauk o pomenu besed
sklerofiti	rastline, odporne na sušo
sublimacija	neposredni prehod iz trdnega v plinasto agregatno stanje

ANGLEŠKO-SLOVENSKI SLOVAR

Available water fraction	Delež rastlinam dostopne vode v tleh
Data-definition language	Jezik za definiranje podatkov
Decision Support System	Sistem za podporo odločanju
Delivery ratio	Koeficient odplavljanja
Depletion rate	Hitrost spiranja
Differential evolution	Diferencialna evolucija
Compartment	Razdelek
Compartment instance	Primerek razdelka
Enrichment ratio	Obogatitveno razmerje
Entity	Entiteta
Entity instance	Primerek entitete
Exponential accumulation and wash-off function	Funkcija eksponentnega kopičenja in spiranja
Hydrological response unit	Hidrološka odzivna enota
Instance	Primerek
Inter-compartmental process	Proces, ki omogoča izmenjavo informacij med posameznimi (pod)razdelki
Integrated Environmental Modelling	Integrirano okoljsko modeliranje
Integrated Water Resources Management	Celostno upravljanje z vodnimi viri
Percent bias	Odstotek pristranskosti
Process instance	Primerek procesa
Root mean squared error	Koren srednje kvadratne napake
Sediment yield	Odplavljanje sedimenta
Sub-compartment	Podrazdelek
Template	Predloga
Template compartment	Predloga razdelka
Template entity	Predloga entitete
Template process	Predloga procesa
Transport capacity of runoff	Transportna zmogljivost površinskega odtoka

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Zaradi povečanja porabe vode na globalni ravni se v zadnjih desetletjih soočamo s pomanjkanjem in onesnaževanjem vodnih virov. Že dolgo je znano, da imata zmanjšanje količine in poslabšanje kakovosti voda poleg ogrožanja zdravja ljudi in omejevanja številnih človekovih dejavnosti negativen vpliv tudi na stanje okolja in vodnih ekosistemov. Zavedanje družbe o resnosti omenjene problematike je vodilo k sprejetju strožje zakonodaje, ki uvaja inovativen, celovit pristop k zaščiti in upravljanju z vodnimi viri.

Primer tovrstne zakonodaje predstavlja evropska vodna direktiva (Direktiva 2000/60/ES), s katero so se države Evropske skupnosti zavezale k spodbujanju trajnostne rabe vodnih virov. Omenjena direktiva kot glavne cilje navaja vzpostavitev dobrega kemijskega in ekološkega stanja vseh vodnih teles do leta 2015, preprečevanje slabšanja stanja voda, omejitev onesnaževanja pri viru, vzpostavitev mehanizmov za nadzor nad onesnaževalci, uvedbo ekonomske cene vode in načela »povzročitelj plača« ter izdelavo načrtov upravljanja z vodami. Direktiva hkrati narekuje, da je potrebno pri upravljanju z vodami upoštevati različne funkcije voda ter vse obstoječe in potencialne vire onesnaževanja. Hkrati spodbuja aktivno sodelovanje vseh interesnih skupin pri sprejemanju odločitev v zvezi z vodnim načrtovanjem.

Pri implementaciji ciljev vodne direktive naj bi se kot temeljno izhodišče uporabljalo načelo celovitosti oz. celostnega upravljanja z vodnimi viri (angl. Integrated Water Resources Management oz. IWRM), ki predvideva oblikovanje ukrepov na področju varstva kakovosti voda in vodnih ekosistemov, ukrepe za zagotavljanje človekovih potreb po vodi ter ukrepe za zaščito ljudi pred škodljivim delovanjem voda (Bizjak, 2008). Ocena vplivov izbranih ukrepov zahteva razvoj novih metodologij in orodij, pri čemer je poudarek predvsem na sistemih za podporo odločanju (angl. Decision Support Systems oz. DSS). Omenjeni sistemi omogočajo upoštevanje okoljskih, socialnih in ekonomskih vidikov upravljanja z vodami ter medsebojno sodelovanje številnih interesnih skupin s svojimi specifičnimi zahtevami.

Pomemben element DSS-jev so matematični modeli, s katerimi lahko opišemo obnašanje opazovanega sistema, npr. izbrane prostorske enote. Za potrebe modeliranja vplivov naravnih in antropogenih dejavnikov na količino in kakovost voda kot prostorsko enoto običajno uporabljamo porečje, ker predstavlja celoto, katere sestavni deli so medsebojno povezane površinske in podzemne vode, hkrati pa je to območje, kjer raba zemljišč pomembno vpliva na količinsko in kakovostno obnavljanje vodnih virov (Brečko Grubar, 2007).

Modeliranje na ravni porečij vključuje povezovanje neživih (tla, voda, zrak) in živih dejavnikov okolja (človek, rastline in živali), ob upoštevanju različnih človekovih dejavnosti, kot so npr. kmetijstvo, industrija in vodooskrba. Zaradi svoje kompleksnosti in interdisciplinarnosti predstavlja modeliranje na ravni porečij eno izmed podpodročij integriranega okoljskega modeliranja (angl. Integrated Environmental Modelling ali IEM).

Pri modeliranju okoljskih procesov na ravni porečij običajno uporabljamo deduktivni pristop, pri katerem izhajamo iz teoretičnega znanja o procesih, model pa oblikujemo s konceptualnimi opisi v obliki matematičnih izrazov oz. enačb. Tovrstni modeli opisujejo realnost na način, ki je razumljiv domenskimi strokovnjakom, so transparentni in posledično prenosljivi na druge, podobne sisteme. Težava pa nastopi pri kompleksnih sistemih, ki narekujejo gradnjo kompleksnih modelov. Ti postanejo težje razumljivi, njihova uporaba pa, zaradi številnih neznank in predpostavk v modelu, omejena. Zato je tovrstne modele smiselno poenostaviti.

Metode avtomatiziranega modeliranja so nam pri tej nalogi lahko v veliko pomoč. Omenjene metode uporabljajo induktivni (empirični) pristop, pri katerem se matematični model generira na podlagi učenja iz podatkov. Z izjemo nekaterih metod strojnega učenja, ki gradijo delno razumljive oz. transparentne (t. i. gray box) modele, večinoma govorimo o t. i. black box modelih, ki sicer na podlagi danih vhodnih podatkov natančno napovedujejo izhodne podatke oz. rezultate, so pa netransparentni in hkrati neprenosljivi na podobne sisteme. Po drugi strani pa lahko induktivno izvedeni matematični modeli načeloma obravnavajo procese poljubne kompleksnosti, če le uspemo v fazi kalibracije zagotoviti zadostno količino kakovostnih merjenih podatkov, iz katerih se model inducira.

V sklopu doktorske naloge smo za potrebe modeliranja na ravni porečij uporabili t. i. hibridni pristop k modeliranju, ki združuje oba predhodno opisana pristopa in temelji na vpeljavi ekspertnega oz. domenskega predznanja v postopek avtomatskega odkrivanja modelov.

1.1 Modeliranje hidroloških procesov in kakovosti voda na ravni porečij

V preteklosti je bilo razvitih več modelov oz. orodij za modeliranje hidroloških procesov in kakovosti voda na ravni porečij. Ta se med seboj razlikujejo predvsem v načinu konceptualnega prikaza porečij, v tem, kako podrobno obravnavajo posamezne okoljske procese, v uporabi matematičnih izrazov za opis omenjenih procesov ter ne nazadnje v količini podatkov, potrebnih za umerjanje modela in simulacijo.

Konceptualni modeli (npr. SWAT, Arnold in Fohrer, 2005; HSPF, Donigian in sod., 1995) temeljijo na fizikalnih zakonitostih, npr. na masnih bilancah. Zanje je značilno, da imajo zelo kompleksno

strukturo in da podajajo najbolj podroben opis hidroloških procesov, ki se odvijajo na ravni porečij in posledično vplivajo na spiranje onesnažil (npr. hranil). Žal je njihovo umerjanje pogosto zahtevno in zamudno. Nasprotje zgoraj opisanim modelom predstavljajo empirični modeli (SPARROW, Schwarz in sod., 2006; MONERIS, Behrendt in sod., 2007), ki temeljijo na empiričnih povezavah med fiziografskimi značilnostmi opazovanega porečja in obremenitvami z izbranimi onesnažili. Empirični modeli imajo preprosto strukturo. V primerjavi s konceptualnimi modeli je njihova implementacija bolj enostavna. Če so empirični modeli pravilno umerjeni, lahko z njimi dosegamo odlično ujemanje rezultatov z meritvami. Njihova glavna slabost je, da nam malo povedo o zakonitostih obnašanja opazovanega sistema. Če ne razpolagamo z zadostno količino (kakovostnih) merjenih podatkov za umerjanje, je upravičenost njihove uporabe vprašljiva.

Obstajajo pa tudi t. i. srednje zahtevni modeli oz. metode (angl. mid-range modelling methods), ki uporabljajo kombinacijo obeh zgoraj opisanih pristopov in predstavljajo kompromis med enostavnimi empiričnimi in kompleksnimi fizikalnimi modeli (U.S. EPA, 1999). Predstavnik tovrstnih modelov je npr. GWLF (Haith in sod., 1992).

Zgoraj omenjena orodja oz. modeli so večinoma le delno distribuirani, kar pomeni, da upoštevajo prostorsko diskretizacijo porečja v podporečja in v t. i. hidrološke odzivne enote (angl. hydrologic response units oz. HRUs, Neitsch in sod., 2011), ki predstavljajo površine s podobnimi karakteristikami tal, homogeno rabo zemljišč in sorodnim načinom upravljanja. V primeru delne distribucije se vsi okoljski procesi (hidrološki procesi in procesi spiranja onesnažil) modelirajo za vsako posamezno opazovano enoto posebej. Tovrstna diskretizacija omogoča modeliranje porečij s poenostavljenim upoštevanjem prostorske komponente, pri čemer nas ne zanima dejanska geografska lokacija izpustov oz. virov onesnaženja znotraj posamezne opazovane enote.

Z vidika uporabnika je izbira ustreznega orodja za modeliranje na ravni porečij pogosto težavna, ker običajno ni enega samega modela, s katerim bi lahko do popolnosti opisali opazovani sistem. Zato je potrebno pri izbiri modela oz. orodja upoštevati predvsem specifične zahteve, ki jih narekuje opazovani primer, razpoložljivost in kakovost merjenih podatkov, lastne izkušnje z uporabo modela oz. orodja, čas, ki je potreben za vzpostavitev in umerjanje modela ter ceno izbranega orodja (čeprav je dandanes večina tovrstnih orodij brezplačno dostopna).

1.2 Razmah modularnega modeliranja in oblikovanje knjižnic

Ugotovitev, da lahko s kombiniranjem več različnih modelov zadovoljivo opišemo opazovani sistem, je pozornost z iskanja najprimernejšega modela preusmerila na iskanje najprimernejše kombinacije komponent (modulov), s katerimi lahko opišemo obnašanje opazovanega sistema (Leavesley in sod.,

2002). Posledično so bila razvita programska okolja, ki omogočajo t. i. modularni pristop k modeliranju in ponujajo komponente za izgradnjo matematičnih modelov različnih okoljskih sistemov. Mednje uvrščamo npr. Open Modelling Interface and Environment (OpenMI, Gregersen in sod., 2005, 2007), E2 (Argent in sod., 2009), Source IMS (Welsh in sod., 2013) in Object Modelling System (OMS, David in sod., 2013).

Tovrstna programska okolja so običajno podprta s knjižnico, v kateri so zbrani in v ustrezni obliki zapisani med seboj združljivi moduli, namenjeni modeliranju in simulaciji številnih okoljskih procesov. Knjižnice ponujajo tudi več alternativnih modulov za opis posameznih procesov. Modeliranje opazovanega sistema poteka tako, da uporabnik iz knjižnice izbere primerne module in jih v programskem okolju poveže v enotni model. Podoben pristop se uporablja pri povezovanju posameznih modelov v večje integrirane modele (Leavesley in sod., 2002).

Večina obstoječih knjižnic, ki podpirajo modularni pristop k modeliranju, dejansko ponuja zbirko že zgrajenih modelov, pri čemer je vsak model obravnavan kot samostojen modul. Kot primer tovrstne knjižnice lahko izpostavimo knjižnico Library of Hydro-Ecological Modules (LHEM, Voinov in sod., 2004), ki (med drugim) ponuja module za simulacijo hidroloških procesov in procesov kroženja hranil v okolju. LHEM moduli se lahko uporabljajo kot samostojni modeli za simulacijo okoljskih procesov in komponent, z uporabo programskega okolja Spatial Modelling Environment (SME, Voinov in sod., 1999) pa jih lahko povežemo tudi v bolj kompleksne strukture.

Pri gradnji modelov je eden izmed največjih izzivov zagotoviti ustrezno komunikacijo in pretok informacij (podatkov) med posameznimi moduli oz. komponentami opazovanega sistema. Tovrstne težave rešujemo z uporabo semantike in ontologij. Semantika je veda, ki preučuje pomen znakov in besed (ali drugih oblik predstavnosti) in njihovo povezanost z objekti stvarnega sveta (Frantar, 2008). Uporabljamo jo za opis informacij, ki jih želimo izmenjati med posameznimi komponentami (Laniak in sod., 2003). Ontologija je v osnovi filozofska disciplina, na področju računalništva pa se ukvarja z opisom in predstavitvijo domenskega znanja. Ontologije predstavljajo enote znanja, ki omogočajo formalen prikaz določene domene (Stankovski, 2009) ter uporabo in izmenjavo domenskega znanja. Hkrati zagotavljajo konceptualno združljivost med posameznimi komponentami opazovanega sistema (Laniak in sod., 2013).

Zapis znanja v obliki ontologije oz. knjižnice omogoča bodisi ročno gradnjo modelov (z ročnim povezovanjem komponent) ali pa njihovo avtomatsko indukcijo. Slednja možnost zahteva uporabo posebnih orodij za odkrivanje enačb, ki poleg ustreznih vrednosti uporabljenih parametrov iščejo tudi primerno strukturo modela. Tovrstna orodja, npr. Lagrange (Džeroski in Todorovski, 2003), HIPM

(Todorovski in sod., 2005) in ProBMoT (Čerepnalkoski in sod., 2012), lahko uporabljamo le v kombinaciji z združljivimi domenskimi knjižnicami.

V sklopu doktorske naloge smo oblikovali knjižnico, ki omogoča avtomatsko odkrivanje modelov porečij z orodjem ProBMoT. Naš cilj je bil vanjo vključiti bistvene elemente različnih obstoječih modelov (oz. pristopov k modeliranju). Izbrani koncept je podobnem tistemu, ki sta ga uvedla Haith in Shoemaker (1987). Omenjeni koncept ponuja sprejemljivo raven kompleksnosti, pri čemer upošteva vse osnovne procese, ki se odvijajo na ravni porečij. Ob tem je potrebno poudariti, da je knjižnica oblikovana na način, ki dopušča enostavno nadgradnjo z dodatnimi procesi in (alternativnimi) enačbami za njihovo reševanje.

Domensko znanje smo v knjižnico zapisali v obliki osnovnih gradnikov oz. komponent (entitet in procesov), s katerimi lahko tvorimo delno distribuirane modele porečij. Entitete predstavljajo glavne akterje (dejavnike oz. elemente) opazovanega sistema, medtem ko procesi opisujejo njihove medsebojne odnose. Knjižnica vključuje hidrološke procese, ki temeljijo predvsem na meteoroloških podatkih, ter procese spiranja hranil, pri čemer so upoštevani tako točkovni kot razpršeni viri onesnaženja. Knjižnica vsebuje tudi nekaj alternativnih izrazov za opis izbranih procesov.

Z oblikovanjem knjižnice za modeliranje porečij vzpostavljamo temelje za nov avtomatiziran pristop k modeliranju hidroloških procesov in procesov spiranja hranil na ravni porečij, ki predstavlja kombinacijo teoretičnega (deduktivnega) in empiričnega (induktivnega) pristopa. Tovrsten pristop je bil v preteklosti uspešno uporabljen za modeliranje prehranske verige v jezerih (Atanasova in sod., 2011, 2008), pri čemer je osnovo predstavljala knjižnica znanja o modeliranju vodnih ekosistemov (Atanasova in sod., 2006). Čeprav sta obe področji medsebojno primerljivi, je v primeru modeliranja okoljskih procesov na ravni porečij predlagan pristop novost.

1.3 Hipoteze

V sklopu doktorske disertacije smo želeli preveriti naslednje hipoteze:

- Avtomatizirano modeliranje je možno uporabiti za modeliranje hidroloških procesov in procesov spiranja hranil na ravni porečij.
- Tovrsten pristop predstavlja primerljivo oz. bolj učinkovito alternativo obstoječim konceptualnim pristopom.
- Zgrajene modele (oz. njihove rezultate) je možno vključiti v sisteme za podporo odločanju na področju celostnega upravljanja z vodnimi viri.

1.4 Cilji

Pri modeliranju porečij je potrebno upoštevati različne spremenljivke in procese, ki opisujejo odnose med njimi. Za izračun vrednosti omenjenih spremenljivk so na razpolago številne enačbe, tako empirične kot tudi konceptualne. Zato je bil prvi cilj doktorske disertacije zbrati čim večje število (alternativnih) enačb za modeliranje okoljskih procesov in jih ustrezno zapisati v domensko knjižnico, ki bo kompatibilna z izbranim orodjem za avtomatizirano modeliranje.

Drugi cilj naloge je bil razviti novo metodologijo za celostno modeliranje hidroloških procesov in kakovosti voda na ravni porečij, ki bo temeljila na uporabi avtomatiziranega modeliranja s hibridnim pristopom in domenske knjižnice ter bo predstavljala alternativo obstoječim orodjem za integrirano modeliranje. S tem je bil povezan tudi tretji cilj, in sicer aplikacija omenjene metodologije na izbranem porečju.

Končni cilj doktorske disertacije je bil podati smernice za vzpostavitev sistema za podporo odločanju, ki bo temeljil na modelih, generiranih z orodjem za avtomatsko indukcijo modelov. Tovrstni sistem bo na osnovi preigravanja različnih scenarijev omogočal argumentirano oceno učinkov predvidenih sprememb oz. možnih upravljaljskih ukrepov na količinsko in kakovostno stanje vodnih virov v izbranem porečju.

2 IZHODIŠČA

Matematično modeliranje uporabljamo za opis opazovanega sistema ter za napovedovanje vplivov različnih sprememb na njegovo obnašanje. Modeli, ki jih pri svojem delu uporabljajo modelarji, so večinoma konceptualni, kar pomeni, da so kompleksni procesi, ki opisujejo dogajanje v izbranem sistemu, poenostavljeni. V uporabi pa so tudi empirični modeli, ki temeljijo na opazovanju sistema, sledenju meritev in statistični obdelavi zbranih podatkov.

Pri modeliranju procesov na ravni porečij nas običajno zanimata generiran površinski in podzemni tok vode ter njun posledični vpliv na obremenitev porečja in glavnega odvodnika s sedimentom in hranili. Ker na omenjene procese pomembno vpliva vodna bilanca, predstavlja osnovo za natančno napovedovanje transporta hranil in sedimentov predvsem pravilen hidrološki model, s katerim poskušamo čim bolj natančno opisati dinamiko kroženja vode v opazovanem porečju.

V nadaljevanju najprej podajamo razlago osnovnih pojmov modeliranja. Sledi opis okoljskih procesov, ki se odvijajo na ravni porečij in jih najpogosteje modeliramo, ter predstavitev najbolj razširjenih in vsesplošno uporabljenih matematičnih formulacij oz. enačb, s katerimi lahko omenjene procese opišemo.

2.1 Osnove modeliranja

Sistem razumemo kot množico elementov oz. komponent, ki medsebojno komunicirajo, lahko pa komunicirajo tudi z zunanjim okoljem (Bertalanffy, 1972). Povezave med posameznimi komponentami običajno predstavljajo izmenjavo informacij (npr. snovi ali energije). Za komponento, ki informacijo sprejema, ta predstavlja vhod, za komponento, iz katere informacija izhaja, pa ta pomeni izhod. Informacijam, ki prihajajo iz okolja in vplivajo na posamezne komponente sistema, pravimo vhodi v sistem, tistim informacijam, ki potujejo v obratni smeri, pa pravimo izhodi iz sistema.

Opazovani sistem in njegove posamezne komponente lahko poenostavljeno opišemo z modelom. Prvi korak pri izdelavi modela predstavlja konceptualizacija sistema, ki ga želimo modelirati. V procesu konceptualizacije posamezne komponente sistema ponazorimo s sistemskimi (odvisnimi) spremenljivkami oz. spremenljivkami stanja. Te opisujejo bistvene značilnosti in obnašanje sistema ter so funkcije časa in prostora. Okolje sistema ponazorimo z neodvisnimi spremenljivkami, ki predstavljajo vhod v sistem. Primeri neodvisnih spremenljivk so npr. padavine, temperatura in sončno obsevanje. Komunikacije med posameznimi komponentami sistema v modelu nadomestimo s fizikalnimi, kemijskimi in/ali biološkimi procesi.

Procese, ki se odvijajo v opazovanem sistemu, lahko zapišemo v obliki matematičnih izrazov oz. enačb. Na ta način dobimo matematični model, ki omogoča simulacijo izbranih procesov oz. sistema kot celote. Če je izhod iz sistema v času t odvisen samo od vhoda v času t , potem lahko za zapis izbranega procesa uporabimo algebrsko enačbo, če pa je izhod odvisen tudi od predhodnih vhodov (npr. v času $t-1$), potem proces opišemo z diferencialno enačbo. Sistemske spremenljivke se lahko spreminjajo v eni dimenziji, npr. po času. V tem primeru uporabimo za opis izbranega procesa navadno diferencialno enačbo. Če se sistemske spremenljivke spreminjajo po več dimenzijah, potem proces opišemo s parcialno diferencialno enačbo.

Če so matematični izrazi, s katerimi opišemo opazovani sistem, zasnovani na naravnih fizikalnih, kemijskih in/ali bioloških zakonitostih, potem govorimo o konceptualnem modelu. Kvantitativne lastnosti konceptualnega modela opišemo s parametri. Določeno spremembo v opazovanem sistemu lahko zajamemo s spremembo vrednosti določenega parametra. Na ta način lahko s konceptualnim modelom ugotavljamo vplive različnih sprememb na sistemsko (odvisno) spremenljivko in posledično na samo obnašanje sistema, kar je tudi najpogostejši cilj modeliranja (Brilly in Šraj, 2005).

Če je model zasnovan na izrazih, ki nimajo jasne naravne razlage, potem govorimo o empiričnem modelu. Tovrstni modeli omogočajo ugotavljanje (empiričnih) povezav med vhodnimi in izhodnimi spremenljivkami sistema. Ker ne poznamo naravnih zakonitosti, na podlagi katerih se vhodne spremenljivke empiričnega modela pretvarjajo v izhodne, uporabljamo za tovrstne modele tudi izraz black box modeli.

V praksi je posamezne modele težko natančno opredeliti kot izključno konceptualne ali empirične. Veliko konceptualnih modelov namreč vsebuje empirične koeficiente. Kot primer lahko izpostavimo parameter Curve Number (CN), ki nastopa v Soil Conservation Service (SCS) metodi za izračun površinskega odtoka in zajema vplive pedologije, rabe zemljišč in predhodne vlažnosti tal (NRCS, 1986).

Vrednosti parametrov, ki nastopajo v izbranem matematičnem modelu, običajno določimo s postopkom umerjanja, pri čemer uporabimo znane (merjene) vrednosti vhodnih spremenljivk, rezultate modela pa primerjamo z merjenimi vrednostmi izhodne spremenljivke. Če želimo, da bo naš model ustrezal realnemu stanju, moramo izbrati takšne vrednosti parametrov, da bo doseženo čim boljše ujemanje rezultatov modela z dejanskimi meritvami. V postopku umerjanja vrednosti parametrov usklajujemo toliko časa, dokler napaka izračuna ne doseže sprejemljive vrednosti.

Umerjanje vrednosti parametrov modela je lahko ročno ali avtomatsko. Pri ročnem umerjanju uporabljamo pristop poskus-napaka, oceno ujemanja rezultatov modela z meritvami pa podamo na

osnovi vizualne primerjave oz. primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev. Tovrsten pristop je zamuden in subjektiven, uspešnost umerjanja modela pa je v veliki meri odvisna od izkušenj modelarja. Pri avtomatskem umerjanju vlogo modelarja prevzame izbrano orodje oz. algoritem, ki s sistematičnim spreminjanjem vrednosti parametrov išče najboljše ujemanje rezultatov modela z meritvami. Čeprav je tovrstno umerjanje modelov v primerjavi z ročnim hitrejše, ni nujno tudi bolj učinkovito (Van Liew in sod., 2005).

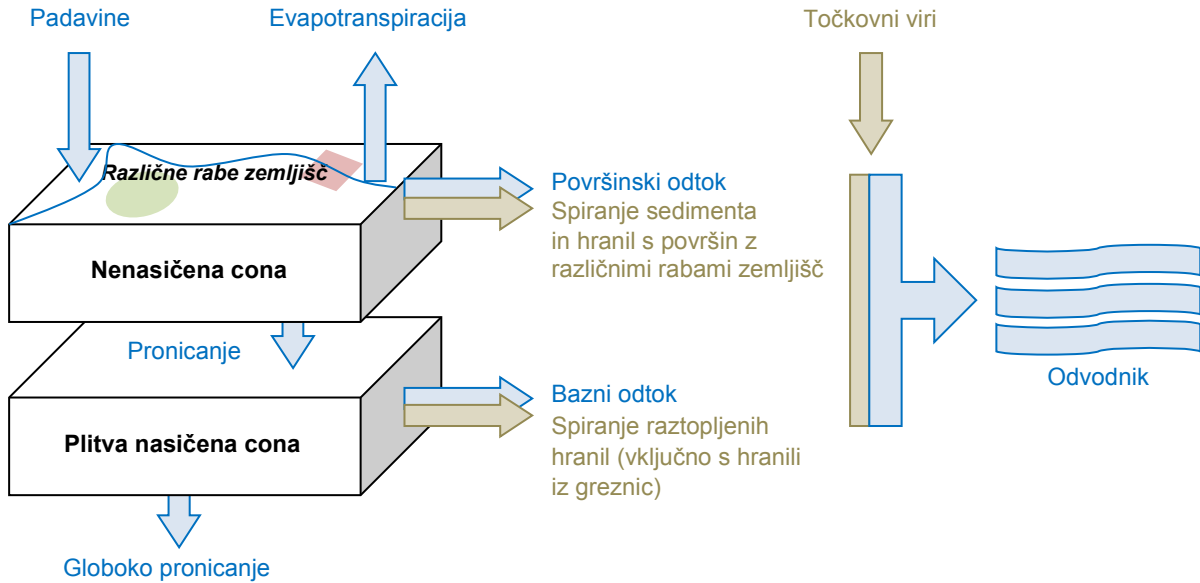
Pri umerjanju parametrov si lahko pomagamo z občutljivostno analizo, s katero ugotavljamo velikost vpliva posameznih parametrov na rezultate modela. Bistvo analize je v sistematičnem spreminjanju vrednosti posameznega parametra pri konstantnih vrednostih ostalih parametrov in vhodnih spremenljivk. Model je na obravnavani parameter občutljiv, če se pri majhni spremembi vrednosti parametra pokažejo velika odstopanja v rezultatih. Če pri večji spremembi parametra ni opaznih razlik v rezultatih, je model na izbrani parameter neobčutljiv.

Uporabnost umerjenega modela potrdimo z validacijo, pri kateri uporabimo merjene vrednosti vhodnih spremenljivk, ki jih nismo predhodno uporabili v postopku umerjanja parametrov. Z validacijo modela ugotavljamo ali naš model uspešno napoveduje vrednosti sistemskih spremenljivk pri dinamičnih pogojih. Ko se model odziva skladno z opravljenimi meritvami, sklepamo, da je potrjen oz. validiran.

2.2 Matematična formulacija okoljskih procesov na ravni porečij

Na področju celostnega upravljanja z vodnimi viri na ravni porečij se srečujemo s kompleksnim (eko)sistemom in številnimi med seboj prepletenimi okoljskimi procesi. V doktorski nalogi smo se osredotočili na dve osnovni skupini okoljskih procesov – na hidrološke procese in procese spiranja sedimenta/hranil, ki jih povzročajo generirani vodni tokovi (slika 1).

V sklopu hidroloških procesov nas zanimajo predvsem učinkovite padavine, ki predstavljajo površinski odtok, in pa vodne izgube. Določene vodne izgube (npr. infiltracija in pronicanje) omogočajo vračanje vode v sistem v obliki podpovršinskega toka, medtem ko druge vodne izgube (npr. evapotranspiracija in globoko pronicanje) dejansko prispevajo k trajni izgubi vode iz opazovanega porečja. Površinski in podpovršinski tok povzročata erozijo in izpiranje hranil iz tal v različne površinske in podzemne odvodnike oz. vodne zbiralnike. Poleg naravnega kroženja vode in posledičnih obremenitev s hranili moramo upoštevati tudi antropogene vire onesnaženja, bodisi razpršene (tu imamo v mislih predvsem kmetijstvo) ali točkovne (v obliki čistilnih naprav in industrijskih izpustov).



Slika 1: Shematski prikaz procesov, ki se odvijajo na ravni porečij. Modre puščice predstavljajo hidrološke procese, rjave pa procese spiranja hranil (prirejeno po Škerjanec et al., 2014).

Figure 1: Schematic presentation of watershed processes. Blue arrows represent major fluxes of the water cycle, while green arrows symbolize nutrient fluxes (adapted from Škerjanec et al., 2014).

2.2.1 Hidrološki procesi

Kot je bilo že omenjeno, predstavlja pravilen hidrološki izračun osnovo za natančno napovedovanje transporta hranil in sedimentov z izbranega porečja. Izračun vodne bilance začnemo s padavinami, ki jih lahko prestreže in deloma zadrži vegetacija, lahko pa prispejo do površja tal. Od tu se del padavin infiltrira v talni profil, preostanek pa površinsko odteče in tako neposredno prispeva k pretoku odvodnika. Infiltrirana voda se lahko kasneje vrne v atmosfero z evapotranspiracijo ali pa počasi pronica v nižje sloje tal, od koder prispeva k podpovršinskemu toku vode in (posredno) k pretoku odvodnika.

2.2.1.1 Površinski odtok (efektivne padavine)

Del padavin, ki je prestrežen, infiltriran ali akumuliran na površju tal in ne prispeva k površinskemu odtoku, imenujemo padavinske izgube, preostanek padavin, ki prispeva k površinskemu odtoku, pa efektivne padavine. Slednje izračunamo kot razliko med zapadlimi padavinami in padavinskimi izgubami.

Obstoječa orodja za modeliranje porečij uporabljajo za izračun padavinskih izgub in površinskega odtoka različne metode, med katerimi je najbolj razširjena SCS metoda (NRCS, 1986), ki uporablja za izračun površinskega odtoka parameter CN. Ta je odvisen od tipa in rabe zemljišč ter od predhodne

vlačnosti tal. SCS metoda je uporabna predvsem v primeru, ko razpolagamo z vhodnimi podatki na dnevni ravni.

Če nas zanimajo posamezni nalivi oz. kratkotrajni padavinski dogodki z visokimi intenzitetami, uporabljamo dinamične metode računanja infiltracije. Te omogočajo obravnavo padavinskih dogodkov na urnem nivoju. Med tovrstne metode uvrščamo npr. metodo Green-Ampt (Green in Ampt, 1911), Hortonov model (Horton, 1933) in Philipsovo metodo (Van Liew in sod., 2003). Prvi dve metodi sta empirični, pri čemer metoda Green-Ampt vsebuje določene parametre, ki imajo fizikalno osnovo, Philipsovo metodo pa uvrščamo med konceptualne metode. V primerjavi z metodo SCS zahtevajo dinamične metode infiltracije več kakovostnih vhodnih podatkov.

V nadaljevanju se bomo osredotočili na SCS metodo, ki uporablja za izračun dnevnih vrednosti površinskega odtoka naslednjo enačbo:

$$Q = \begin{cases} \frac{(R - I_a)^2}{R - I_a + S} & \text{za } R > I_a \\ 0 & \text{za } R \leq I_a \end{cases} \quad (1)$$

V enačbi (1) predstavljajo Q količino vode, ki površinsko odteče (mm), R višino padavin (mm), I_a začetne izgube, ki zajemajo površinsko zadrževanje, prestrežanje in infiltracijo padavin pred pojavom površinskega odtoka (mm) in S maksimalno potencialno zadrževanje povodja oz. porečja (mm).

Empirično zvezo med začetnimi izgubami I_a in maksimalnim potencialnim zadrževanjem S lahko opišemo z uporabo spodnje enačbe:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (2)$$

Če združimo enačbi (1) in (2), lahko enačbo za izračun akumuliranega površinskega odtoka oz. akumuliranih efektivnih padavin v času t zapišemo kot:

$$Q = \begin{cases} \frac{(R - 0,2 \cdot S)^2}{R + 0,8 \cdot S} & \text{za } R > 0,2 \cdot S \\ 0 & \text{za } R \leq 0,2 \cdot S \end{cases} \quad (3)$$

Maksimalno potencialno zadrževanje povodja oz. porečja S je povezano s parametrom CN (glej enačbo (4)), ki dosega vrednosti med 0 in 100 (NRCS, 1986). Nizke vrednosti parametra CN so indikator visoke infiltracijske sposobnosti tal, medtem ko so visoke vrednosti CN značilne za neprepustne površine. Višja kot je vrednost parametra CN, večji je površinski odtok. Vrednost parametra CN pa ni odvisna samo od prepustnosti tal, ampak tudi od rabe zemljišč, predhodne

vlačnosti in hidrološke skupine, ki jo določimo na podlagi teksture in infiltracijske sposobnosti tal (preglednica 1).

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

Preglednica 1: Hidrološke skupine tal (prirejeno po NRCS, 1986).

Table 1: Hydrologic soil groups (adapted from NRCS, 1986).

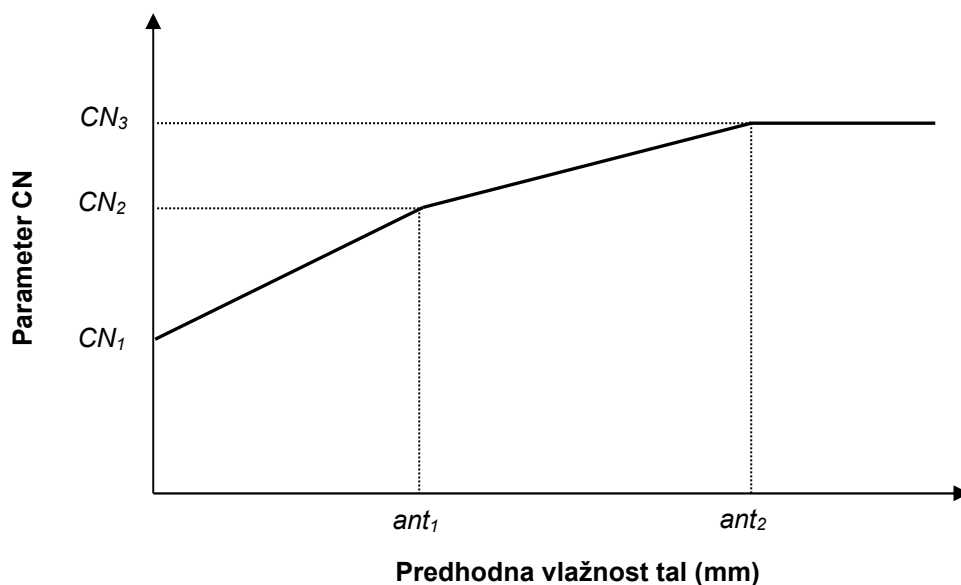
Hidrološka skupina	Opis	Tekstura tal	Hitrost precejanja skozi tla (mm/h)
A	Globoka, dobro drenirana tla, ki imajo v primeru nasičenosti nizek odtočni potencial in visoko stopnjo infiltracije.	pesek, ilovnat pesek, peščena ilovica	>7,62
B	Tla, ki imajo v primeru nasičenosti zmerno stopnjo infiltracije, so zmerno globoka do globoka in zmerno do dobro drenirana.	meljasta ilovica, ilovica	3,81–7,62
C	Tla, ki imajo v primeru nasičenosti nizko stopnjo infiltracije, s slojem, ki ovira precejanje vode.	peščeno glinasta ilovica	1,27–3,81
D	Tla z visokim odtočnim potencialom, ki imajo v primeru nasičenosti zelo nizko stopnjo infiltracije. V to skupino uvrščamo tla s stalno visoko gladino talne vode, z neprepustnim slojem na površini ali tik pod njo ter plitva tla nad skoraj neprepustnim slojem.	glinasta ilovica, meljasto glinasta ilovica, peščena glina, meljasta glina, glina	0,00–1,27

Kot smo že omenili, je vrednost parametra CN v posameznem dnevu odvisna tudi od predhodne vlažnosti tal. Haith (1985) je povezavo med obema spremenljivkama opisal z linearno funkcijo (slika 2), pri čemer je kot predhodno vlažnost tal upošteval vsoto padavin, zapadlih v preteklih petih dneh (*ant*, v mm). Iz grafa na sliki 2 je razvidno, da metoda za določitev vrednosti parametra CN upošteva tri različna stanja predhodne vlažnosti tal: sušno stanje oz. stanje pri točki venenja (I), stanje s povprečno vlažnostjo (II) in mokro stanje oz. stanje poljske kapacitete tal (III). Vrednosti CN pri povprečnih vlažnostnih pogojih (CN_2) ocenimo s pomočjo preglednic 2–4, vrednosti CN pri vlažnostnih pogojih I (CN_1) in III (CN_3) pa izračunamo s pomočjo spodnjih dveh enačb (Hawkins, 1978):

$$CN_1 = \frac{CN_2}{2,334 - 0,01334 \cdot CN_2} \quad (5)$$

$$CN_3 = \frac{CN_2}{0,4036 + 0,0059 \cdot CN_2} \quad (6)$$

Priporočene vrednosti spremenljivk ant_1 in ant_2 , ki določata prelomni točki grafa na sliki 2, so 13 in 28 mm za dobo mirovanja oz. 36 in 53 mm za rastno sezono (Ogrosky in Mockus, 1964).



Slika 2: Določitev vrednosti parametra CN v odvisnosti od predhodne vlažnosti tal (v mm; prirejeno po Haith, 1985).

Figure 2: Curve number determination based on the antecedent moisture condition (in mm; adapted from Haith, 1985).

Preglednica 2: Vrednosti parametra CN za urbane površine (prirejeno po NRCS, 1986).

Table 2: Runoff curve numbers for urban areas (adapted from NRCS, 1986).

Raba zemljišč	% neprepustnih površin	Vrednosti CN glede na hidrološko skupino tal			
		A	B	C	D
Odprte površine (parki, golf igrišča, pokopališča itd.)					
slabi pogoji (pokritost s travo < 50%)		68	79	86	89
povprečni pogoji (pokritost s travo med 50 in 75%)		49	69	79	84
dobri pogoji (pokritost s travo > 75%)		39	61	74	80
Neprepustne površine					
tlakovana parkirišča, strehe, dovozi itd.		98	98	98	98
tlakovane ulice in ceste z robniki in kanaliziranimi odtoki		98	98	98	98
tlakovane ulice in ceste z odprtimi kanali		83	89	92	93
makadamske ceste		76	85	89	91
kolovozi		72	82	87	89
Urbana območja					
komercialna in poslovna območja	85	89	92	94	95
industrijska območja	72	81	88	91	93
Stanovanjske površine glede na povprečno velikost parcele					
0,05 ha ali manj	65	77	85	90	92
0,10 ha	38	61	75	83	87
0,13 ha	30	57	72	81	86
0,20 ha	25	54	70	80	85
0,40 ha	20	51	68	79	84
0,81 ha	12	46	65	77	82
Urbana območja v nastajanju					
prepustne, neporaščene površine		77	86	91	94

Preglednica 3: Vrednosti parametra CN za kmetijske obdelovalne površine (prirejeno po NRCS, 1986).

Table 3: Runoff curve numbers for cultivated agricultural lands (adapted from NRCS, 1986).

Raba zemljišč	Hidrološki pogoji*	Vrednosti CN glede na hidrološko skupino tal			
		A	B	C	D
Ledina, neobdelane površine					
gola površina	-	77	86	91	94
ostanki posevkov (OP)	slabi	76	85	90	93
	dobri	74	83	88	90
Poljščine					
sajene v ravnih vrstah (RV)	slabi	72	81	88	91
	dobri	67	78	85	89
RV + OP	slabi	71	80	87	90
	dobri	64	75	82	85
sajene po plastnicah (PL)	slabi	70	79	84	88
	dobri	65	75	82	86
PL + OP	slabi	69	78	83	87
	dobri	64	74	81	85
sajene po plastnicah in na terasah (PL & T)	slabi	66	74	80	82
	dobri	62	71	78	81
PL & T + OP	slabi	65	73	79	81
	dobri	61	70	77	80
Nizka žita					
RV	slabi	65	76	84	88
	dobri	63	75	83	87
RV + OP	slabi	64	75	83	86
	dobri	60	72	80	84
PL	slabi	63	74	82	85
	dobri	61	73	81	84
PL + OP	slabi	62	73	81	84
	dobri	60	72	80	83
PL & T	slabi	61	72	79	82
	dobri	59	70	78	81
PL & T + OP	slabi	60	71	78	81
	dobri	58	69	77	80
Gosto sejane stročnice ali kolobarjen travnik					
RV	slabi	66	77	85	89
	dobri	58	72	81	85
PL	slabi	64	75	83	85
	dobri	55	69	78	83
PL & T	slabi	63	73	80	83
	dobri	51	67	76	80

* Hidrološki pogoji so odvisni od gostote vegetacije, deleža uporabljenih ostankov posevkov, površinske hrapavosti tal in podobnih faktorjev. Za slabe hidrološke pogoje velja, da omenjeni faktorji zmanjšujejo infiltracijo in s tem povečujejo površinski odtok, za dobre pa, da faktorji povečujejo infiltracijo in posledično zmanjšujejo površinski odtok.

2.2.1.2 Evapotranspiracija

Evapotranspiracija zajema vse procese, ki povzročajo transformacijo vode iz tekočega oz. trdnega agregatnega stanja v vodno paro ter njeno prehajanje v ozračje. Med tovrstne procese uvrščamo

evaporacijo (izhlapevanje) s tal, vodnih površin in površine rastlin, transpiracijo oz. prehajanje vode skozi listne reže ter sublimacijo s površin, prekritih s snegom ali ledom.

Preglednica 4: Vrednosti parametra CN za ostale kmetijske površine (prirejeno po NRCS, 1986).

Table 4: Runoff curve numbers for other agricultural lands (adapted from NRCS, 1986).

Raba zemljišč	Hidrološki pogoji	Vrednosti CN glede na hidrološko skupino tal			
		A	B	C	D
Pašniki, travišča, prerije	slabi (<50% pokrovnost, intenzivna paša)	68	79	86	89
	povprečni (50–75% pokrovnost, zmerna paša)	49	69	79	84
	dobri (>75% pokrovnost, občasna paša)	39	61	74	80
Travniki (košeni)	-	30	58	71	78
Grmičevje, lahko v kombinaciji s travo	slabi (<50% pokrovnost)	48	67	77	83
	povprečni (50–75% pokrovnost)	35	56	70	77
	dobri (>75% pokrovnost)	30	48	65	73
Gozd v kombinaciji s travo (nasadi, sadovnjaki)	slabi	57	73	82	86
	povprečni	43	65	76	82
	dobri	32	58	72	79
Gozd	slabi (intenzivna gozdna paša, požiganje)	45	66	77	83
	povprečni (zmerna gozdna paša)	36	60	73	79
	dobri (brez gozdne paše)	30	55	70	77
Kmetije (poslopje, dovozna pot in pripadajoče parcele)	-	59	74	82	86

Evapotranspiracijo lahko opišemo z različnimi pojmi. Potencialna evapotranspiracija predstavlja izhlapevanje vode iz poljubne rastline v primeru zadostne zaloge vode v tleh, medtem ko v primeru dejanske (omejene) količine vode v tleh govorimo o dejanski evapotranspiraciji. Poznamo še referenčno evapotranspiracijo, ki predstavlja največjo količino vode, ki lahko v določenih podnebnih razmerah izhlapi z referenčne površine, prekrte z aktivno rastočo travo v višini 0,12 m, s konstantno površinsko upornostjo 70 m/s in albedom 0,23 (Allen in sod., 1998).

V primeru zadostne zaloge vode v tleh je količina dejanske evapotranspiracije (ET , v mm) enaka količini potencialne evapotranspiracije (ET_p , v mm). Slednjo izračunamo kot produkt referenčne evapotranspiracije (ET_0 , v mm) in koeficienta pokrovnosti CV (v literaturi zasledimo tudi izraz koeficient rastline (Pintar, 2006)). V nasprotnem primeru določimo ET s pomočjo vodne bilance tal. Če združimo oba omenjena pogoja, dobimo za izračun količine dejanske evapotranspiracije spodnji izraz (Haith in sod., 1992):

$$ET = \min(ET_0 \cdot CV, U + R - Q) \quad (7)$$

V enačbi (7) predstavljajo U količino vode v nenasičeni coni tal (mm), R višino padavin (mm) in Q količino vode, ki površinsko odteče (mm).

Za določitev vrednosti referenčne evapotranspiracije ET_0 obstaja več različnih računskih metod (Cesar, 2011). Pogosto se uporabljata metodi Penman (Penman, 1948) in Penman-Monteith (Monteith, 1965), ki temeljita na kombinaciji vodne in energijske bilance, pri čemer slednja metoda upošteva dodatne faktorje odpornosti rastlin. Omenjeni metodi potrebujejo za izračun ET_0 podatke o temperaturi, vlažnosti zraka, sončnem sevanju in hitrosti vetra.

Alternativo omenjenima metodama predstavljajo enostavnejše radiacijske in temperaturne metode, ki potrebujejo manjše število vhodnih podatkov. Kot primer radiacijske metode omenimo metodo Priestley-Taylor (Priestley in Taylor, 1972), ki se uporablja predvsem na območjih, kjer so tla zasičena z vodo. Med temperaturne metode uvrščamo npr. metodi Hamon (Hamon, 1961) in Hargreaves (Hargreaves in sod., 1985), ki ju bomo podrobneje opisali v nadaljevanju.

Enačba (8) predstavlja Hamonovo enačbo za izračun ET_0 . V enačbi predstavljajo H število sončnih ur na dan, e nasičen parni tlak (mbar) in T povprečno dnevno temperaturo zraka ($^{\circ}\text{C}$).

$$ET_0 = \frac{0,21 \cdot H^2 \cdot e}{T + 273} \quad (8)$$

Nasičen parni tlak e , ki nastopa v enačbi (8), je odvisen od povprečne dnevne temperature zraka (T , v $^{\circ}\text{C}$). Ocenimo ga lahko z uporabo spodnje enačbe (Bosen, 1960):

$$e = 33,8639 \cdot [(0,00738 \cdot T + 0,8072)^8 - 0,000019 \cdot (1,8 \cdot T + 48) + 0,001316] \quad (9)$$

Enačba (10) prikazuje Hargreavesovo enačbo, v kateri nastopajo R_a (jakost sončnega obsevanja, v $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dan}$), T_{max} , T_{min} , T_{avg} (maksimalna, minimalna in povprečna dnevna temperatura zraka, v $^{\circ}\text{C}$) in λ (izparilna toplota vode, v MJ/kg).

$$ET_0 = \frac{0,0023 \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot (T_{avg} + 17,8)}{\lambda} \quad (10)$$

Jakost sončnega obsevanja R_a lahko izračunamo s spodnjo enačbo (Allen in sod., 1998):

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s] \quad (11)$$

kjer predstavljajo G_{sc} solarno konstanto ($0,0820 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$), d_r inverzno relativno razdaljo med Zemljo in Soncem (z upoštevanim popravkom zaradi ekscentričnosti Zemljine orbite), ω_s kot Sonca ob sončnem zahodu (rad), φ zemljepisno širino (rad) in δ deklinacijo Sonca (rad).

Inverzno relativno razdaljo med Zemljo in Soncem d_r izračunamo z enačbo (12), pri čemer J predstavlja zaporedno številko dneva v letu. Vrednosti J se gibljejo med 1 (1. januar) in 365 oz. 366 (31. december). Deklinacijo sonca δ in kot Sonca ob sončnem zahodu ω_s določimo z uporabo enačb (13) oz. (14).

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (12)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (13)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan\varphi \cdot \tan\delta] \quad (14)$$

Parameter CV, ki nastopa v enačbi (7), predstavlja razmerje med potencialno in referenčno evapotranspiracijo. Vrednost omenjenega parametra je odvisna od površinskega pokrova oz. tipa vegetacije in se spreminja v odvisnosti od razvojne faze posamezne vrste rastlin. Pri določanju okvirnih vrednosti parametra CV si lahko pomagamo s preglednico 5.

Preglednica 5: Okvirne vrednosti parametra CV (prirejeno po Haith in sod., 1992).

Table 5: Approximate values for CV (adapted from Haith et al., 1992).

Površinski pokrov	Doba mirovanja	Rastna sezona
Enoletnice (olistanost samo v rastni dobi)	0,3	1,0
Trajnice (olistanost skozi celo leto; travniki, pašniki)	1,0	1,0
Listavci (listnati gozdovi, sadovnjaki)	0,3	1,0
Iglavci	1,0	1,0
Neporaščene površine (kmetije, dovozne poti, gradbišča, odprti kopi)	0,3	0,3
Prepustne urbane površine (parki, zelenice)	1,0	1,0
Neprepustne urbane površine	0,0	0,0

2.2.1.3 Podpovršinski tok vode

Ko vsebnost vode v posameznem sloju tal preseže poljsko kapaciteto, začne voda pronicati v nižje ležeče plasti. Količino vode v posameznem sloju tal določimo s pomočjo vodne bilance. Enačba (15) predstavlja izračun vodne bilance v nenasičeni coni tal, medtem ko enačbo (16) uporabimo za določitev vodne bilance plitve nasičene plasti.

$$U_{t+1} = U_t + R_t - Q_t - ET_t - Perc_t \quad (15)$$

$$SS_{t+1} = SS_t + Perc_t - GW_t - DS_t \quad (16)$$

V zgornjih dveh enačbah predstavlja U količino vode v nenasičeni coni tal (mm), R višino padavin (mm), Q količino vode, ki površinsko odteče (mm), ET količino dejanske evapotranspiracije (mm),

Perc količino vode, ki pronica med obema slojema tal (mm), *SS* količino vode v plitvi nasičeni coni (mm), *GW* količino baznega odtoka (mm) in *DS* količino vodnih izgub zaradi globokega pronicanja (mm).

Pronicanje vode iz nenasičene v nasičeno plast tal poteka samo pod pogojem, da količina vode v nenasičeni coni tal ($U + R - Q - ET$) preseže količino rastlinam dostopne vode (U^* , v mm):

$$Perc = \max(0; U + R - Q - ET - U^*) \quad (17)$$

Za oceno vrednosti U^* pomnožimo povprečno globino glavne mase koreninskega sistema za posamezno porečje s povprečnim volumskim deležem rastlinam dostopne vode (angl. available water fraction oz. AWF, v mm vode/mm tal). Parameter AWF je v veliki meri odvisen od teksture tal. Določimo ga s pomočjo preglednice 6.

Preglednica 6: Vrednosti parametra AWF (prirejeno po NRCS, 1998).

Table 6: Available water fraction values (adapted from NRCS, 1998).

Tekstura tal	AWF
pesek, ilovnat pesek, peščena ilovica (brez fine peščene frakcije)	< 0,10
ilovnat pesek in peščena ilovica (s prevladujočo fino peščeno frakcijo), ilovica, glinasta ilovica, peščeno glinasta ilovica, peščena glina	0,10–0,15
meljasta glina, glina	0,10–0,20
melj, meljasta ilovica, meljasto glinasta ilovica	0,15–0,25

Plitvo nasičeno plast tal obravnavamo kot enostaven linearni rezervoar, ki se prazni bodisi z baznim odtokom, ki posredno prispeva k pretoku odvodnika, ali z globokim pronicanjem. Oba procesa lahko opišemo kot produkt količine vode v plitvi nasičeni plasti tal (*SS*, v mm) in izbrane konstante (Haith in sod., 1992):

$$GW = SS \cdot r \quad (18)$$

$$DS = SS \cdot s \quad (19)$$

V zgornjih dveh enačbah predstavljajo *GW* količino baznega odtoka (mm), *r* recesijsko konstanto, *DS* količino vodnih izgub zaradi globokega pronicanja in *s* konstanto ponikanja. Recesijska konstanta *r* predstavlja odziv baznega odtoka na spremembe v polnjenju plitve nasičene plasti tal (Smedema in Rycroft, 1983). Vrednosti omenjene konstante se običajno gibljejo med 0,1 in 0,3 (v primeru počasnega odziva na polnjenje) oz. med 0,9 in 1,0 (v primeru tal s hitrim odzivom). Vrednosti konstante *s* so težje določljive in jih lahko ocenimo le z umerjanjem modela, lahko pa se odločimo tudi za uporabo konzervativnega pristopa, pri katerem izberemo vrednost $s = 0$ (Haith in sod., 1992).

2.2.2 Spiranje hranil

Običajno ločeno obravnavamo spiranje hranil v organski in mineralni obliki (Neitsch in sod., 2011) oz. v raztopljeni in vezani obliki (Haith in sod., 1992). V nadaljevanju se bomo osredotočili na slednjo delitev.

Pri izračunu spiranja hranil upoštevamo predpostavko, da raztopljena hranila prehajajo v okolje s površinskim in baznim odtokom ter s točkovnimi izpusti, hranila v vezani obliki pa preko erozije tal in spiranja z urbanih površin. Dnevni vnos hranil v vodotok oz. odvodnik izračunamo z uporabo spodnjih dveh enačb:

$$L_D = L_{D_{sr}} + L_{D_{gw}} + L_{D_{sept}} + L_{D_{ps}} \quad (20)$$

$$L_S = L_{S_{rural}} + L_{S_{urban}} \quad (21)$$

V enačbi (20) predstavlja L_D dnevno obremenitev odvodnika z izbranim raztopljenim hranilom (kg/dan), h kateri prispevajo površinski odtok ($L_{D_{sr}}$), bazni odtok ($L_{D_{gw}}$), izpusti iz greznic ($L_{D_{sept}}$) in točkovni viri onesnaženja (npr. čistilne naprave in industrijski izpusti; $L_{D_{ps}}$). Z enačbo (21) izračunamo dnevni vnos izbranega hranila v vezani obliki (L_S , v kg/dan), pri čemer seštejemo prispevka s kmetijskih ($L_{S_{rural}}$) in urbanih površin ($L_{S_{urban}}$).

2.2.2.1 Raztopljena hranila

Obremenitev z izbranim hranilom v raztopljeni obliki, h kateri prispeva površinski odtok ($L_{D_{sr}}$, v kg/dan), določimo na podlagi povprečne koncentracije hranila v površinskem odtoku (C_{sr} , v mg/l):

$$L_{D_{sr}} = 0,01 \cdot C_{sr} \cdot Q \cdot A \quad (22)$$

pri čemer predstavljata Q količino vode, ki površinsko odteče (mm) in A velikost prispevne površine (ha).

Podoben pristop uporabimo za izračun obremenitve z izbranim raztopljenim hranilom, h kateri prispeva bazni odtok ($L_{D_{gw}}$, v kg/dan), s to razliko, da v tem primeru upoštevamo povprečno koncentracijo hranila v baznem odtoku (C_{gw} , v mg/l) in količino baznega odtoka (GW , v mm):

$$L_{D_{gw}} = 0,01 \cdot C_{gw} \cdot GW \cdot A \quad (23)$$

Obremenitev z izbranim hranilom v raztopljeni obliki, h kateri prispevajo izpusti iz greznic ($L_{D_{sept}}$, v kg/dan), določimo na podlagi ocenjene dnevne obremenitve s hranilom na prebivalca (e_{nut} , v g/preb), dnevne porabe hranila s strani rastlin (u_{nut} , v g/preb), števila prebivalcev, priključenih na posamezno

greznico (n_{inh}), in deleža letnega baznega odtoka, ki se generira v posameznem dnevu (GW / GW_{ann} , oboje v mm):

$$L_{D_sept} = 0,001 \cdot n_{inh} \cdot (e_{nut} - u_{nut}) \cdot \frac{GW}{GW_{ann}} \quad (24)$$

Priporočene vrednosti parametrov e_{nut} in u_{nut} so podane v preglednici 7.

Preglednica 7: Vrednosti parametrov, ki jih uporabljamo za izračun obremenitve iztoka iz greznice (prirejeno po Haith in sod., 1992).

Table 7: Parameter values for the calculation of septic tank effluent loadings (adapted from Haith et al., 1992).

Parameter	Vrednost (g/preb·dan)
dnevna obremenitev iztoka iz greznice (e_{nut})	
dušik	12,0
fosfor	
uporaba fosfatnih detergentov	2,5
uporaba detergentov brez dodanih fosfatov	1,5
dnevna poraba hranila s strani rastlin (u_{nut})	
dušik: rastna sezona	1,6
doba mirovanja	0,0
fosfor: rastna sezona	0,4
doba mirovanja	0,0

2.2.2.2 Hranila v vezani obliki

Obremenitev s hranili v vezani obliki s kmetijskih površin (L_{S_rur} , v kg/dan) določimo za vsako posamezno neurbano površino kot produkt povprečne koncentracije hranila v tleh (C_{soil} , v g hranila/tal), obogatitvenega razmerja (angl. enrichment ratio, ER) in količine odplavljenega sedimenta (angl. sediment yield; Y , v t/dan):

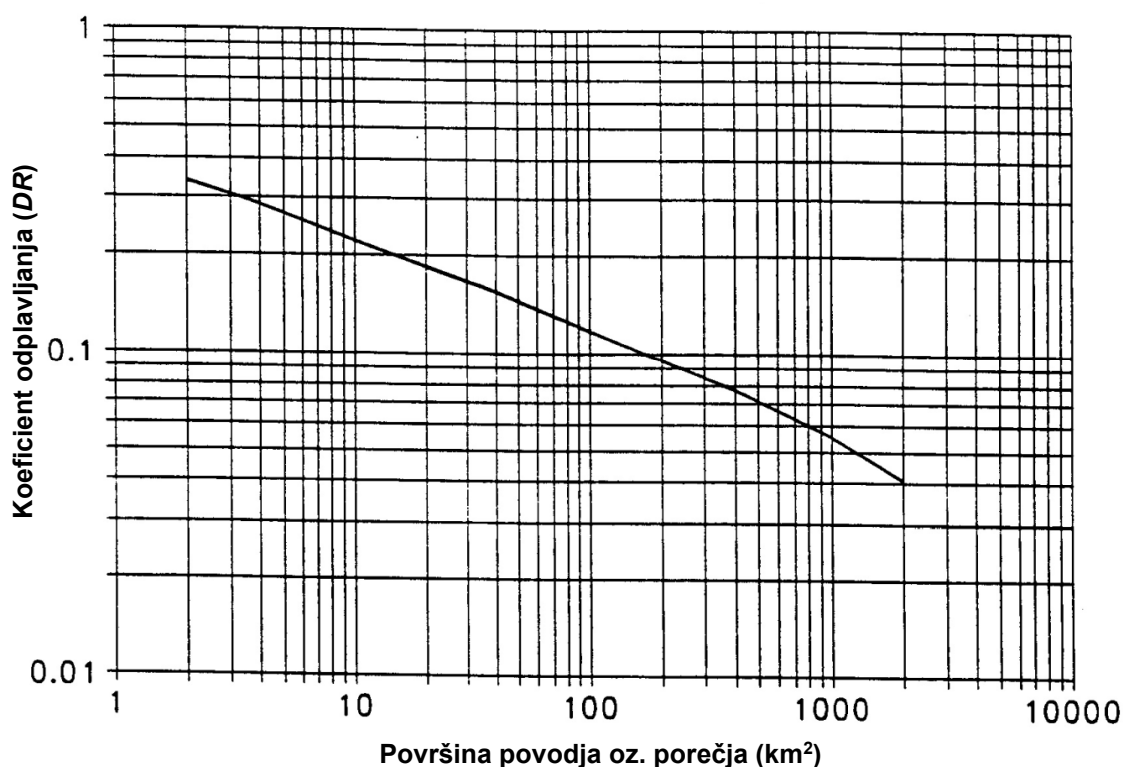
$$L_{S_rural} = 0,001 \cdot C_{soil} \cdot ER \cdot Y \quad (25)$$

Obogatitveno razmerje ER predstavlja razmerje med koncentracijama posameznega hranila v odplavljenem sedimentu in v tleh, podvrženih eroziji (Menzel, 1980). Vrednosti parametra ER se običajno gibljejo med 1 in 3,5 (Stoltenberg in White, 1953; Yang in sod., 2014; Zhang in sod., 2004).

Količino odplavljenega sedimenta Y izračunamo kot produkt količine erodiranih tal (sed , v t/dan) in koeficienta odplavljanja DR (angl. delivery ratio, slika 3). Najbolj razširjena metoda za napovedovanje erozije tal je metoda USLE (Universal Soil Loss Equation; Wischmeier in Smith, 1978), ki uporablja za določitev količine erodiranih tal naslednjo enačbo:

$$sed = R_{USLE} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot L_{USLE} \quad (26)$$

V enačbi (26) nastopa pet USLE dejavnikov: R_{USLE} predstavlja dejavnik padavin in odtoka ((MJ·mm)/(ha·h)), K_{USLE} dejavnik erodibilnosti tal ((t·ha·h)/(ha·MJ·mm)), C_{USLE} dejavnik pokrovnosti in obdelave tal, P_{USLE} dejavnik zaščitnih ukrepov in LS_{USLE} topografski dejavnik (oz. dejavnik dolžine in naklona pobočja). Dejavnik K_{USLE} je odvisen od teksture tal in vsebnosti organske snovi v tleh. Njegovo vrednost ocenimo s pomočjo karte erodibilnosti tal (slika 4). Vrednosti dejavnikov C_{USLE} in P_{USLE} določimo na podlagi preglednic 8 in 9, vrednosti dejavnikov R_{USLE} in LS_{USLE} pa izračunamo s pomočjo enačb, objavljenih v referenčni literaturi. Kot primer navajamo enačbi (27) in (28).

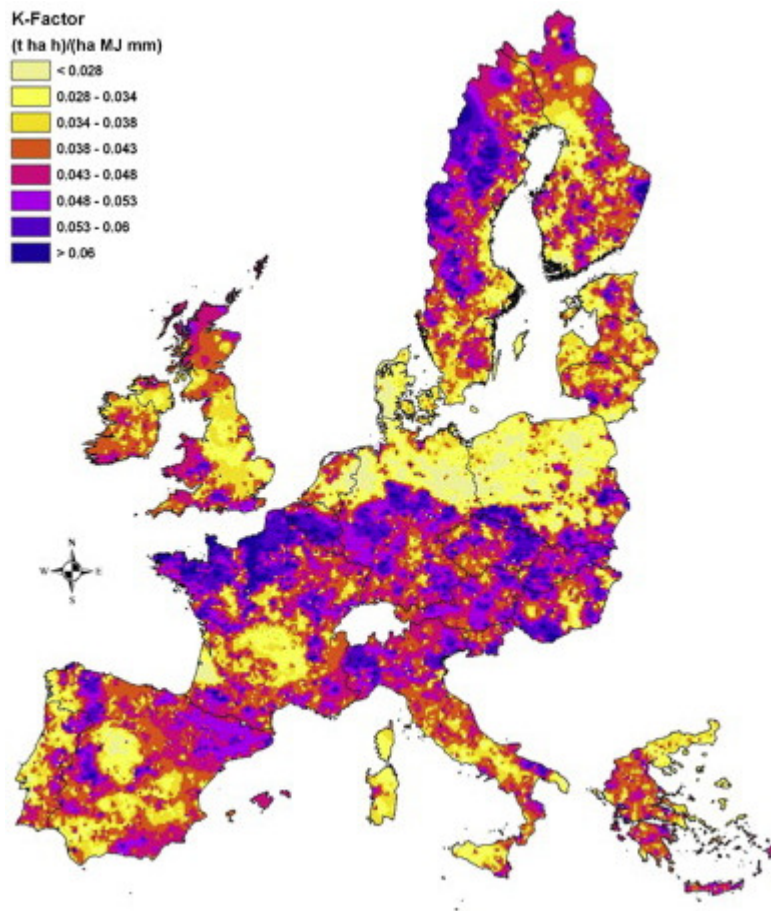


Slika 3: Graf za določitev koeficienta odplavljanja (povzeto po Vanoni, 1975).

Figure 3: Graph used for the determination of sediment delivery ratio (adapted from Vanoni, 1975).

V enačbi (27) (Richardson in sod., 1983; Haith in Merrill, 1987) predstavljata R višino padavin (cm) in a erozijski koeficient, odvisen od letnega časa in lokacije opazovanega povodja oz. porečja. Leta 1990 je Selker s sodelavci objavil vrednosti a za 33 lokacij v ZDA. Te se v hladnejših mesecih (oktober do marec) gibljejo med 0,06 in 0,3, v toplejših (april do september) pa med 0,13 in 0,42.

$$R_{USLE} = 64,6 \cdot a \cdot R^{1,81} \quad (27)$$



Slika 4: Evropska karta erodibilnosti tal (povzeto po Panagos in sod., 2012).

Figure 4: European soil erodibility map (adapted from Panagos et al., 2012).

Preglednica 8: Vrednosti dejavnika pokrovnosti tal C_{USLE} (prirejeno po Stewart in sod., 1975, ter Novotny in Chesters, 1981).Table 8: Values of the cover and management factor C_{USLE} (adapted from Stewart et al., 1975, and Novotny and Chesters, 1981).

Površinski pokrov	C_{USLE}
<i>ledina, neobdelano kmetijsko zemljišče</i>	1,00
<i>koruza</i>	
visoka intenziteta pridelave	0,017–0,540
zmerna intenziteta pridelave	0,053–0,620
<i>soja</i>	
visoka intenziteta pridelave	0,180–0,480
zmerna intenziteta pridelave	0,220–0,540
<i>pšenica</i>	0,021–0,380
<i>travnik</i>	0,004–0,025
<i>trajni pašnik</i>	
95–100 % pokritost s travo/plevelom	0,003/0,010
80 % pokritost s travo/plevelom	0,010/0,040
60 % pokritost s travo/plevelom	0,040/0,090
<i>gozd</i>	
75–100 % drevesnih krošenj	0,001
40–75 % drevesnih krošenj	0,002–0,004
20–40 % drevesnih krošenj	0,003–0,010

Preglednica 9: Vrednosti dejavnika zaščitnih ukrepov P_{USLE} (prirejeno po Wischmeier in Smith, 1978).

Table 9: Values of the supporting practice factor P_{USLE} (adapted from Wischmeier and Smith, 1978).

Zaščitni ukrepi	Naklon (%)						
	1–2	3–5	6–8	9–12	13–16	17–20	21–25
brez zaščitnih ukrepov	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sajenje po plastnicah	0,60	0,50	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
kolobarjenje*							
štiriletni kolobar (P-P-T-T)	0,30	0,25	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
štiriletni kolobar (P-P-Ž-T)	0,45	0,38	0,38	0,45	0,52	0,60	0,68
dvoletni kolobar (P-Ž)	0,60	0,50	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
oblikovanje teras							
površinsko dreniranje	0,12	0,10	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
podzemno dreniranje	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06

* P: posevek, T: trave, Ž: ozimno žito

V enačbi (28) (Wischmeier in Smith, 1978) predstavljajo L_{slp} dolžino pobočja (m), α_{slp} naklon pobočja (%) in m eksponentni faktor, odvisen od naklona pobočja (glej preglednico 10).

$$LS_{USLE} = \left(\frac{L_{slp}}{22,1}\right)^m \cdot (65,41 \cdot \sin^2 \alpha_{slp} + 4,56 \cdot \sin \alpha_{slp} + 0,065) \quad (28)$$

Preglednica 10: Vrednosti eksponentnega faktorja m (prirejeno po Wischmeier in Smith, 1978).

Table 10: Values of the exponential term m (adapted from Wischmeier and Smith, 1978).

Naklon pobočja (%)	m
> 5	0,5
3,5–4,5	0,4
1,0–3,0	0,3
< 1,0	0,2

USLE metoda je doživela precej dopolnitev oz. izpeljank. Tako poznamo npr. modificirano USLE metodo (MUSLE; Williams, 1995), ki omogoča vrednotenje izgube tal ob posameznih erozivnih dogodkih oz. nalivih, in revidirano USLE metodo (RUSLE; Renard in sod., 1997), ki ponuja korigirane enačbe za izračun dejavnikov R_{USLE} in LS_{USLE} .

V nadaljevanju bomo podrobneje predstavili Haithovo različico USLE enačbe za izračun količine odplavljenega sedimenta (Haith, 1985; enačba (29)) in pa MUSLE enačbo (enačba (30)).

$$Y = 0,132 \cdot Q^{5/3} \cdot A \cdot R_{USLE} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot DR \quad (29)$$

Enačba (29) (Haith, 1985) temelji na osnovni obliki USLE enačbe, pri čemer predstavljajo 0,132 pretvorbni faktor med enotami, $Q^{5/3}$ transportno zmogljivost površinskega odtoka (angl. transport capacity of runoff), A velikost prispevne površine (ha) in DR koeficient odplavljanja.

$$Y = 11,8 \cdot (Q \cdot A \cdot q_{peak})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \quad (30)$$

Enačba (30) predstavlja MUSLE enačbo (Williams, 1995), kjer so Q količina vode, ki površinsko odteče (mm), A velikost prispevne površine (ha) in q_{peak} maksimalni površinski odtok (m^3/s). Ker uporablja MUSLE metoda namesto dejavnika erozivnosti padavin erozivnost površinskega odтока, lahko v enačbi izpustimo koeficient odplavljanja DR .

Maksimalni površinski odtok q_{peak} lahko izračunamo z uporabo modificirane racionalne metode (Neitsch in sod., 2011):

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q \cdot A}{3,6 \cdot t_{conc}} \quad (31)$$

kjer predstavljajo α_{tc} delež dnevne količine padavin, ki pade v času koncentracije, Q količino vode, ki površinsko odteče (mm), A velikost prispevne površine (km^2), 3,6 pretvorbeni faktor med enotami in t_{conc} čas koncentracije (h).

Vrednost parametra α_{tc} določimo z uporabo enačbe (32), pri čemer t_{conc} predstavlja čas koncentracije (h), $\alpha_{0,5}$ pa delež dnevne količine padavin, ki pade v polurnem nalivu z maksimalno intenziteto. Natančen postopek določitve $\alpha_{0,5}$ je predstavljen v navodilih za uporabo programa SWAT (Neitsch in sod, 2011; str. 69–70).

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp[2 \cdot t_{conc} \cdot \ln(1 - \alpha_{0,5})] \quad (32)$$

Čas koncentracije predstavlja čas, ki je potreben, da voda iz najbolj oddaljene točke povodja oz. porečja priteče do iztočnega profila. Izračunamo ga z uporabo spodnje enačbe:

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (33)$$

kjer sta t_{ov} čas potovanja vode po površini povodja oz. porečja do struge (h), t_{ch} pa čas potovanja vode v strugi do iztočnega profila (h). Neitsch s sod. (2011) predlaga za izračun časa potovanja vode po površini povodja oz. porečja naslednji izraz:

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0,6} \cdot n_{ov}^{0,6}}{18 \cdot slp^{0,3}} \quad (34)$$

V enačbi (34) predstavljajo L_{slp} dolžino pobočja (m), n_{ov} Manningov koeficient površinske hrapavosti za izbrano povodje oz. porečje, slp pa povprečni naklon povodja oz. porečja (m/m). Priporočene vrednosti koeficienta n_{ov} so za posamezne tipe površin podane v preglednici 11.

Preglednica 11: Vrednosti Manningovega koeficienta površinske hrapavosti n_{ov} (prirejeno po Engman, 1983).

Table 11: Values of the Manning's roughness coefficient n_{ov} for the overland flow (adapted from Engman, 1983).

Tip površine	Priporočena vrednost n_{ov}	Razpon vrednosti
Ledina, neobdelane površine	0,01	0,008–0,012
Obdelane površine brez ostankov posevkov		
brez rahljanja	0,07	0,040–0,100
z rahljanjem	0,09	0,060–0,120
Obdelane površine z ostanki posevkov		
brez rahljanja	0,12	0,070–0,170
z rahljanjem	0,19	0,160–0,220
Trava		
kratka	0,15	0,100–0,200
gosta	0,24	0,170–0,300

Za izračun časa potovanja vode po strugi ponuja Nietsch s sod. (2011) naslednjo enačbo:

$$t_{ch} = \frac{0,62 \cdot L \cdot n_{ch}^{0,75}}{A^{0,125} \cdot slp_{ch}^{0,375}} \quad (35)$$

V zgornji enačbi predstavljajo L dolžino struge (km), n_{ch} Manningov koeficient hrapavosti struge, A velikost prispevne površine (povodja oz. porečja, v km²) in slp_{ch} povprečni naklon struge (m/m). Chow (1959) navaja obsežen seznam vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti struge. V preglednici 12 podajamo priporočene vrednosti n_{ch} za najbolj pogoste tipe strug.

Preglednica 12: Vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti struge n_{ch} (prirejeno po Chow, 1959).

Table 12: Values of the Manning's roughness coefficient n_{ch} for the channel flow (adapted from Chow, 1959).

Tip struge	Priporočena vrednost n_{ch}	Razpon vrednosti
Umetna struga		
ravna	0,025	0,016–0,033
vijugasta	0,035	0,023–0,050
nevzdrževana, zaraščena	0,075	0,040–0,140
Naravna struga		
redka obrežna vegetacija	0,050	0,025–0,065
gosta obrežna vegetacija	0,100	0,050–0,150

Obremenitev s hranili v vezani obliki z urbanih površin (L_{S_urb} , v kg) lahko določimo bodisi z uporabo funkcije eksponentnega kopičenja in spiranja (angl. exponential accumulation and wash-off function, enačba (36)) ali pa s pomočjo USGS regresijske enačbe (enačba (37)).

Enačba (36) (Haith in sod., 1992) temelji na pristopu, ki so ga razvili Amy in sod. (1974) ter Sartor in Boyd (1972). V enačbi predstavljajo Q količino vode, ki površinsko odteče (mm), N_{acc} količino hranil, ki se akumulirajo na določeni prispevni površini (kg/ha), in A velikost prispevne površine (ha).

$$L_{S_urb} = (1 - e^{-1,81 \cdot Q/10}) \cdot N_{acc} \cdot A \quad (36)$$

Preglednica 13: Vrednosti parametra n_{acc} , ki predstavlja hitrost akumulacije izbranega hranila na urbanih površinah (prirejeno po Kuo in sod., 1988).

Table 13: Values of the parameter n_{acc} representing nutrient accumulation rates in urban areas (adapted from Kuo et al., 1988).

Tip urbanih površin	Celotni dušik (kg/(ha·dan))	Celotni fosfor (kg/(ha·dan))
<i>Neprepustne površine</i>		
Enodružinske hiše		
nizka gostota (enote/ha < 1,2)	0,045	0,0045
srednja gostota (enote/ha ≥ 1,2)	0,090	0,0112
Vrstne hiše	0,090	0,0112
Gosta stanovanjska pozidava	0,056	0,0067
Javne ustanove	0,056	0,0067
Industrijski objekti	0,101	0,0112
Trgovski centri na obrobju mest	0,056	0,0067
Poslovne cone	0,101	0,0112
<i>Prepustne površine</i>		
Enodružinske hiše		
nizka gostota (enote/ha < 1,2)	0,012	0,0016
srednja gostota (enote/ha ≥ 1,2)	0,022	0,0039
Vrstne hiše	0,045	0,0078
Gosta stanovanjska pozidava	0,012	0,0019
Javne ustanove	0,012	0,0019
Industrijski objekti	0,012	0,0019
Trgovski centri na obrobju mest	0,012	0,0019
Poslovne cone	0,012	0,0019

Količino akumuliranih hranil izračunamo s pomočjo spodnje diferencialne enačbe:

$$\frac{dN_{acc}}{dt} = n_{acc} - \beta \cdot N_{acc} \quad (37)$$

kjer sta n_{acc} hitrost akumulacije (kg/(ha·dan)) in β hitrost spiranja (angl. depletion rate, /dan). Okvirne vrednosti parametra n_{acc} so podane v preglednici 13. Ob upoštevanju predpostavke, da se količina akumuliranih hranil N_{acc} asimptotično približuje maksimalni vrednosti N_{acc_max} in da se v dvajsetih dneh na urbanih površinah akumulira 90 % N_{acc_max} , lahko za hitrost spiranja akumuliranih hranil β upoštevamo vrednost 0,12.

$$L_{S_urb} = \frac{\beta_0 \cdot (R/25,4)^{\beta_1} \cdot (A \cdot imp/2,59)^{\beta_2} \cdot (imp \cdot 100 + 1)^{\beta_3} \cdot \beta_4}{2,205} \quad (38)$$

Preglednica 14: Vrednosti USGS regresijskih koeficientov za izračun spiranja hranil z urbanih površin (prirejeno po Driver in Tasker, 1990).

Table 14: Values of the USGS urban regression coefficients for the calculation of nutrient wash-off in urban areas (adapted from Driver and Tasker, 1990).

Tip hranila	Kategorija padavin*	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
Celotni dušik	I	20,20	0,825	1,070	0,479	1,258
	II	4,04	0,936	0,937	0,692	1,373
	III	1,66	0,703	0,465	0,521	1,845
Celotni fosfor	I	1,725	0,884	0,826	0,467	2,130
	II	0,697	1,008	0,628	0,469	1,790
	III	1,618	0,954	0,789	0,289	2,247

* I ... letne padavine < 508 mm

II ... 508 mm < letne padavine < 1.016 mm

III ... letne padavine > 1.016 mm

Enačba (38) predstavlja USGS regresijsko enačbo (Driver in Tasker, 1990), kjer so R dnevna višina padavin (mm), A velikost prispevne površine (km²), imp delež neprepustnih površin in β_{0-4} vrednosti regresijskih koeficientov (glej preglednico 14).

3 FORMALIZACIJA DOMENSKEGA ZNANJA

Znanje o modeliranju okoljskih procesov na ravni porečij, predstavljeno v poglavju 2.2, smo razčlenili na posamezne komponente (entitete, procese in razdelke), ki bodo podrobneje predstavljene v nadaljevanju. Za zapis komponent smo uporabili formalizem, ki ga podpira orodje za avtomatsko odkrivanje enačb ProBMoT (Čerepnalkoski et al., 2012). Omenjeni formalizem temelji na jeziku za definiranje podatkov (angl. data-definition language) in sledi uveljavljenim formatom zapisa, kot sta npr. Java in Phytion.

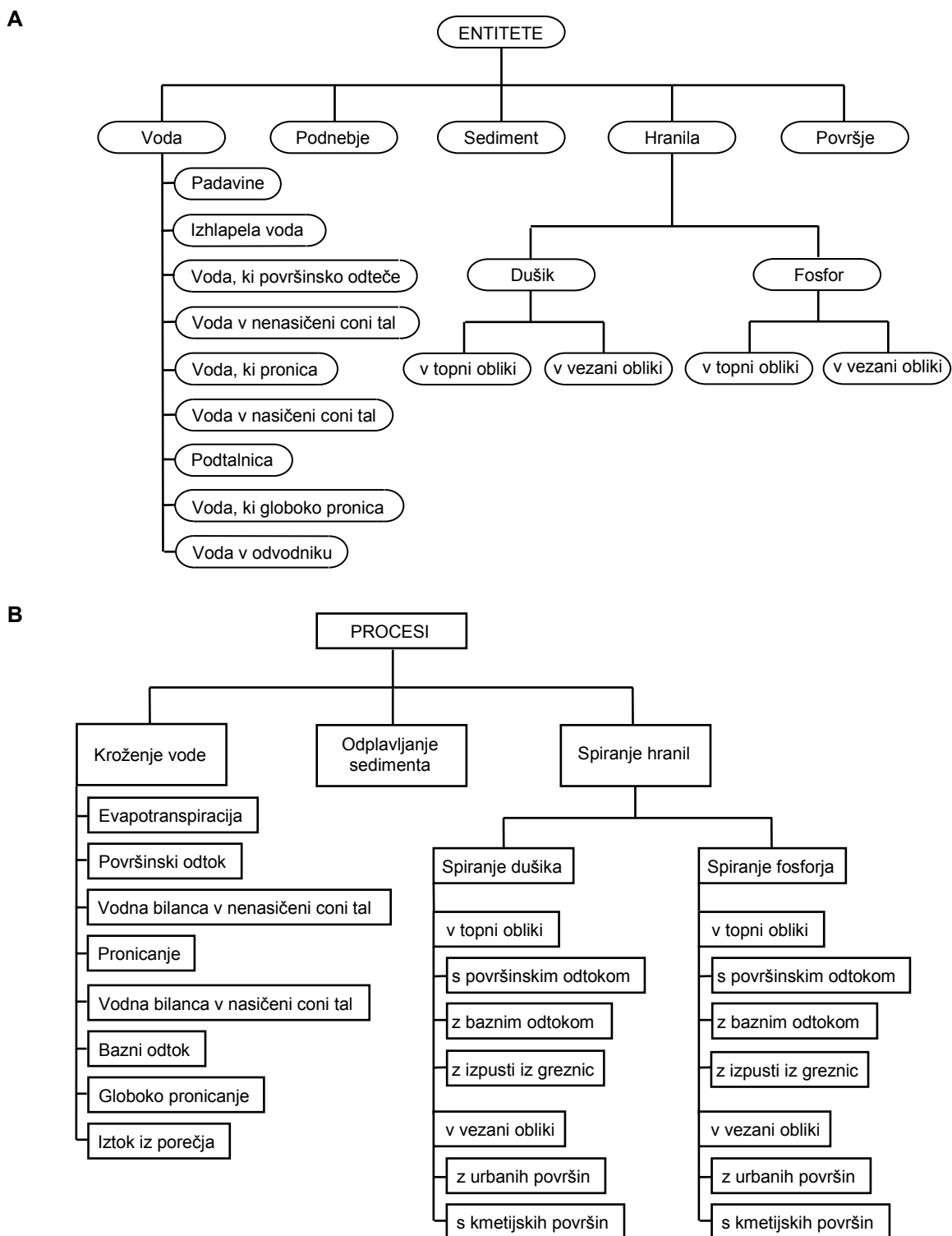
3.1 Predstavitev komponent

Kot je bilo že omenjeno, obravnava izbrani formalizem tri tipe komponent: entitete, procese in razdelke. Vsaka posamezna komponenta je definirana z enoznačnim imenom in nizom pripadajočih lastnosti oz. atributov.

Entitete predstavljajo osnovne gradnike oz. elemente opazovanega sistema. Opišemo jih z atributi, ki so lahko fiksni (konstante) ali pa se spreminjajo s časom (spremenljivke). Na področju modeliranja okoljskih procesov na ravni porečij obravnavamo pet osnovnih entitet: vodo, podnebje, površje, sediment in hranila (slika 5A; priloga A). Ker se voda v porečju pojavlja v več oblikah (npr. kot površinska voda, podtalnica, izhlapela voda itd.), razdelimo omenjeno entiteto v več podentitet, ki sovpadajo s posamezno obliko vode. Podobno velja tudi za entiteto hranila, ki vsebuje podentitete dušik in fosfor. Ker se obe omenjeni entiteti pojavljata v dveh oblikah (raztopljeni in vezani) in ker v sistem vstopata preko različnih virov (npr. s površinskih odtokom, z iztokom iz greznic ipd.), ju lahko razdelimo še v nadaljnje podentitete.

Procesi opisujejo odnose med entitetami (natančneje med njihovimi atributi) v obliki matematičnih izrazov oz. enačb. Posamezna enačba lahko vključuje samo spremenljivke in konstante entitet, ki aktivno sodelujejo v procesu. Med procese na področju modeliranja porečij uvrščamo procese kroženja vode, odplavljanja sedimenta in spiranja hranil (slika 5B; priloga A), ki jih lahko (podobno kot entitete) razdelimo v več podprocesov.

Dinamični sistem, ki ga želimo modelirati (npr. opazovano porečje) lahko strukturiramo z uporabo **razdelkov** (angl. compartments). Razdelki so hierarhično urejeni, pri čemer vsak razdelek vsebuje pripadajoče entitete, procese in morebitne podrazdelke (npr. podporečja oz. hidrološke odzivne enote).



Slika 5: Hierarhični prikaz predlog A) entitet in B) procesov, vsebovanih v knjižnici za modeliranje procesov na ravni povodij oz. porečij.

Figure 5: Hierarchical organization of template A) entities and B) processes encoded in the watershed modelling library.

ProBMoT formalizem uporablja dvostopenjsko specifikacijo komponent. Splošno znanje, ki se nanaša na več entitet, procesov oz. razdelkov, je zapisano v domenski knjižnici, v objektih imenovanih *predloge* (angl. templates). S predlogami definiramo skupne lastnosti komponent oz. splošno znanje, ki ga lahko uporabimo za opis več specifičnih primerov.

Za opis izbranega primera moramo pripraviti t. i. konceptualni model, v katerem definiramo *primerke* entitet, procesov in razdelkov (angl. instances). Primerki so ustvarjeni iz predlog in podajajo natančno definicijo vseh lastnosti, ki so navedene v predlogi (npr. dejanske numerične vrednosti uporabljenih atributov). Iz ene predloge lahko oblikujemo več primerkov.

Sledi podroben opis vsebine domenske knjižnice in konceptualnega modela, s poudarkom na specifikaciji posameznih predlog oz. primerkov.

3.2 Oblikovanje domenske knjižnice

V domenski knjižnici je v objektih, imenovanih predloge, zajeto splošno znanje, ki se nanaša na skupino entitet, procesov oz. razdelkov in ga lahko uporabimo za opis več specifičnih primerov. Izbrani formalizem, ki smo ga uporabili za zapis knjižnice, narekuje točno določen način specifikacije posameznih predlog. V nadaljevanju sledi opis predlog razdelkov, entitet in procesov.

Predloga razdelka (angl. template compartment) povzema splošno vsebino razdelka. Vsaka predloga razdelka vsebuje enoznačno ime ter seznam predlog entitet (*entities*), procesov (*processes*) in podrazdelkov (*compartments*), ki lahko nastopajo v določenem razdelku. Slika 6 prikazuje primer specifikacije predloge razdelka `SpatialUnit` (prostorska enota), ki predstavlja najbolj splošen razdelek domenske knjižnice.

Predloga entitete (angl. template entity) podaja splošno strukturo entitete brez navajanja podrobnosti (npr. specifičnih vrednosti konstant). Opišemo jo z enoznačnim imenom, nizom spremenljivk (*vars*) in/ali nizom konstant (*consts*) – glej sliko 7. Predloge entitet so hierarhično urejene, kar pomeni, da pri vsaki posamezni predlogi entitete navedemo tudi ime njej nadrejene entitete oz. starša (če le-ta obstaja). Ko v predlogi entitete definiramo posamezen atribut (spremenljivko ali konstanto), se ta avtomatsko pripiše tudi vsem njej podrejenim entitetam.

```
template compartment SpatialUnit {
  entities:
    Water,
    EvapotranspirationWater,
    ReferenceEvapotranspirationWater,
    Weather,
    Surface,
    ...;
  processes:
    Evapotranspiration,
    ReferenceEvapotranspiration,
    ...;
  compartments:
    SpatialUnit;
}
```

Slika 6: Primer specifikacije predloge razdelka.

Figure 6: Specification of a compartment template – an example.

Spremenljivke in konstante entitet definiramo na podoben način. V obeh primerih navedemo ime atributa in niz pripadajočih lastnosti oz. metapodatkov. Mednje sodita podatek o uporabljeni merski enoti (*unit*) in zaloga vrednosti atributa (*range*). Pri spremenljivkah je potrebno navesti še funkcijo, ki se uporablja v primeru združevanja več istovrstnih spremenljivk (*aggregation*). Funkcije, med katerimi lahko izbiramo, so vsota (*sum*), zmnožek (*product*), minimum (*min*), maksimum (*max*) in povprečje (*average*).

```
A) template entity Water {
  vars:
    amountOfWater {aggregation:sum; unit:"mm/day"; range:<0,inf>};
}

B) template entity EvapotranspirationWater : Water {}

C) template entity Surface {
  consts:
    area {range:<0,inf>; unit:"ha"},
    imp {range:<0,1>};
}
```

Slika 7: Specifikacija predlog entitet. Primera A in B sta v hierarhičnem razmerju. Primer A predstavlja nadrejeno predlogo entitete z definiranim nizom spremenljivk. V primeru B je podana specifikacija predloge entitete, ki je podrejena entiteti iz primera A. Primer C prikazuje specifikacijo predloge entitete z definiranim nizom konstant.

Figure 7: Specification of entity templates. Examples A and B are in a hierarchical relationship. The entity template in example A defines a parent entity with a list of variables, while example B defines its sub-entity. Example C shows the specification of an entity template that contains constants only.

Slika 7A prikazuje specifikacijo predloge entitete `Water` (voda), ki jo lahko opišemo z eno samo spremenljivko `amountOfWater` (količina vode). Omenjeno spremenljivko izrazimo v enoti mm/dan, njena zaloga vrednosti pa so vsa pozitivna števila. Če želimo združiti več različnih vrednosti spremenljivke `amountOfWater`, jih moramo medsebojno sešteti.

Na sliki 7B je prikazana specifikacija predloge entitete `EvapotranspirationWater` (izhlapela voda), ki je podrejena entiteti `Water` (voda). Ker podrejene entitete podedujejo lastnosti (attribute) nadrejene entitete, lahko entiteto `EvapotranspirationWater` (tako kot entiteto `Water`) opišemo s spremenljivko `amountOfWater`.

Slika 7C predstavlja specifikacijo predloge entitete `Surface` (površje), ki jo lahko opišemo s konstantama `area` (površina) in `imp` (delež neprepustnih površin). Konstanta `area` lahko zavzame katero koli vrednost med 0 in neskončno, izbrana enota pa je ha. Brezdimenzijska konstanta `imp` ima lahko vrednost med 0 in 1.

Predloga procesa (angl. *template process*) podaja splošno vsebino procesa. Opišemo jo z enoznačnim imenom, nizom argumentov oz. sodelujočih entitet ter imenom predhodnika v hierarhiji procesov. Vsebinski opis je sestavljen iz niza pripadajočih konstant in enačb (diferencialnih in/ali algebrskih), ki opisujejo dani proces. V enačbah lahko nastopajo atributi sodelujočih entitet in/ali konstante, definirane znotraj predloge procesa.

Slika 8A prikazuje specifikacijo predloge procesa `Evapotranspiration` (evapotranspiracija). Imena sodelujočih entitet s pripadajočimi okrajšavami so podana v oklepaju, npr. `et` : `EvapotranspirationWater` in `et0` : `ReferenceEvapotranspirationWater`. V omenjenem procesu nastopa ena sama brezdimenzijska konstanta (`coverCoeff`), ki lahko zavzame katero koli vrednost med 0,3 in 1,2. Proces `Evapotranspiration` opišemo z eno samo enačbo, s katero dejansko računamo vrednost spremenljivke `et.amountOfWater`, ki pripada entiteti `EvapotranspirationWater`.

Tako kot predloge entitet so tudi predloge procesov hierarhično urejene. Vsaka predloga procesa ima lahko več podrejenih predlog procesov. Te lahko vključujejo le tiste argumente oz. predloge entitet, ki so bile definirane znotraj nadrejene predloge procesa. Npr., če določena predloga procesa v nizu argumentov navaja dve entiteti (`E1` in `E2`), lahko podrejeni proces kot argumente upošteva le podmnožico množice $\{E1, E2\}$. Predstavljena hierarhija omogoča upoštevanje več alternativnih enačb za opis posameznih procesov, pri čemer je potrebno zagotoviti medsebojno primerljivost rezultatov uporabljenih enačb. To lahko dosežemo le z doslednim upoštevanjem konsistentnosti uporabljenih enot.

```
A) template process Evapotranspiration (et : EvapotranspirationWater, et0
: ReferenceEvapotranspirationWater) {
  consts:
    coverCoeff {range:<0.3,1.2>};
  equations:
    et.amountOfWater = coverCoeff * et0.amountOfWater;
}

B) template process ReferenceEvapotranspiration (et0 :
ReferenceEvapotranspirationWater, w : Weather) {}

C) template process ReferenceEvapotranspirationHamon :
ReferenceEvapotranspiration {
  equations:
    et0.amountOfWater = (0.21 * pow(w.daylightHours,2) *
w.satVapPressure) / (w.temperature + 273);
}

D) template process ReferenceEvapotranspirationHargreaves :
ReferenceEvapotranspiration {
  equations:
    et0.amountOfWater = (0.0023 * w.radiation * pow(w.maxTemperature
- w.minTemperature,0.5) * (w.temperature + 17.8)) / 2.257;
}
```

Slika 8: Specifikacija predlog procesov. Primer A predstavlja osnovno specifikacijo predloge procesa z argumenti (v oklepaju) ter nizom konstant in enačb. Primer B podaja specifikacijo nadrejene predloge procesa v hierarhiji procesov, medtem ko sta v primerih C in D definirani dve alternativni predlogi njej podrejenih procesov.

Figure 8: Specification of process templates. Example A presents a basic template process specification with a list of arguments (in brackets), a list of constants, and a list of equations. Example B shows the definition of a template super-process in the process hierarchy, while examples C and D define two alternative template sub-processes.

Hierarhija predlog procesov je predstavljena na sliki 8B–D. Predloga procesa *ReferenceEvapotranspiration* (slika 8B) je nadrejena predlogama *ReferenceEvapotranspirationHamon* (slika 8C) in *ReferenceEvapotranspirationHargreaves* (slika 8D). Slednji predlogi ponujata dve alternativni enačbi za izračun vrednosti spremenljivke *et0.amountOfWater*.

Poseben tip procesov predstavljajo procesi, ki omogočajo izmenjavo informacij med posameznimi (pod)razdelki (angl. inter-compartmental processes). Primer tovrstnega procesa predstavlja proces *OutflowSummation* (slika 9B), ki omogoča izračun skupnega pretoka (*totalF.rate*) na nivoju razdelka (npr. porečja). V procesu *OutflowSummation* poleg entitete *TotalFlow* nastopajo še ena ali več entitet tipa *Flow*, kar definiramo s pomočjo kotnih oklepajev (*Flow<1,inf>*). Proces *OutflowSummation* omogoča seštevanje vrednosti več spremenljivk *f.rate* (pretok). Te se izračunajo v procesih tipa *Outflow* (slika 9A). Omenjeni procesi nastopajo v podrazdelkih, ki sovpadajo s posameznimi podporečji.

```

A) template process Outflow (f: Flow, sr: SurfaceRunoffWater, gw :
    Groundwater, surf: Surface) {
    equations:
        f.rate = (sr.amountOfWater + gw.amountOfWater) * 0.001 *
            10000 * surf.area / (24 * 3600);
    }

B) template process OutflowSummation (totalF : TotalFlow, compFs :
    Flow<1,inf>) {
    equations:
        totalF.rate = <compF:compFs>.rate;
    }

```

Slika 9: Specifikacija predloge procesa, ki omogoča izmenjavo informacij med posameznimi (pod)razdelki. Primer A podaja specifikacijo predloge procesa, ki nastopa na nivoju podrazdelka, primer B pa specifikacijo predloge procesa, ki nastopa na nivoju razdelka. Slednji proces omogoča seštevanje vrednosti več spremenljivk, ki se izračunajo v posameznih podrazdelkih obravnavanega razdelka.

Figure 9: Specification of an inter-compartmental process template. Example A provides a template process specification, acting at the sub-compartment level. Example B provides the definition of a template process that is calculated at the compartment level. The latter process enables the aggregation of several variables, which are calculated in the sub-compartments of the observed compartment.

3.3 Priprava konceptualnega modela

Če želimo domensko knjižnico in orodje za avtomatizirano modeliranje uporabiti na dejanskem primeru, moramo pripraviti t. i. konceptualni model, ki predstavlja opis opazovanega sistema (v našem primeru izbranega porečja). V konceptualnem modelu so komponente sistema zapisane v obliki primerkov – specifičnih razdelkov, entitet in procesov, ki sledijo zapisu predlog, shranjenih v domenski knjižnici. Da bi lahko opazovani sistem ponazorili v najboljši možni meri, morajo biti primerki v konceptualnem modelu zapisani v ustreznem hierarhičnem zaporedju.

```

compartment watershed : SpatialUnit {
    ...
}

```

Slika 10: Primer specifikacije primerka razdelka.

Figure 10: Specification of a compartment instance – an example.

Specifikacijo *primerka razdelka* (angl. compartment instance) začnemo z enoznačnim lastnim imenom. Sledi ime predloge, iz katere je primerek izpeljan. Znotraj posameznega primerka razdelka definiramo primerke entitet, procesov in podrazdelkov, ki so naštet v predlogi razdelka. Slika 10

prikazuje primer specifikacije primerka razdelka `watershed` (porečje), ki je izpeljan iz predloge `SpatialUnit` (prostorska enota).

Specifikacija **primerka entitete** (angl. *entity instance*) vključuje poleg navedbe lastnega imena in imena izvorne predloge tudi seznam spremenljivk (`vars`). Pri vsaki posamezni spremenljivki podamo njeno začetno vrednost (`initial`) in podatek o tem, ali gre za odvisno (`endogenous`) ali neodvisno (`exogenous`) spremenljivko (`role`). Primerek entitete lahko vsebuje tudi navedbo konstant (`consts`) s pripadajočimi numeričnimi vrednostmi (slika 11). Konstantam, katerih vrednosti ne poznamo oz. jih želimo umeriti, pripišemo vrednost `null`.

```
A) entity et : EvapotranspirationWater {
  vars:
    amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

B) entity surf : Surface {
  consts:
    area = 1000,
    imp = 0.8;
}
```

Slika 11: Specifikacija primerkov entitet. Primer A predstavlja primerek entitete z definiranim nizom spremenljivk, primer B pa primerek entitete z definiranim nizom konstant.

Figure 11: Specification of entity instances. Example A defines an entity instance with a list of variables, while example B presents the specification of an entity instance that contains constants only.

Slika 11A prikazuje specifikacijo entitete `et`, ki predstavlja primerek, izpeljan iz predloge `EvapotranspirationWater` (izhlapela voda). Opišemo jo z eno samo odvisno spremenljivko `amountOfWater` (količina vode) z začetno vrednostjo 0.

Na sliki 11B je prikazana specifikacija entitete `surf`, ki predstavlja primerek, izpeljan iz predloge `Surface` (površje). Opišemo jo s konstantama `area` (površina), ki ima v izbranem primeru vrednost 1.000 ha (pri čemer je uporabljena merska enota definirana v knjižnici, v predlogi `Surface`), in `imp` (delež neprepustnih površin) z vrednostjo 0,8.

Pri specifikaciji **primerka procesa** (angl. *process instance*) poleg lastnega imena in imena uporabljene predloge v oklepaju navedemo imena vseh argumentov oz. primerkov entitet, ki nastopajo v izbranem procesu (slika 12). Če predloga procesa predvideva tudi opis konstant, potem dodamo niz konstant (`consts`) s pripadajočimi numeričnimi vrednostmi. Kadar točnih vrednosti konstant ne poznamo oz. jih želimo umeriti, jim pripišemo vrednost `null`.

```

process evapotransp : Evapotranspiration (et, et0) {
  consts:
    coverCoeff = null;
}

```

Slika 12: Specifikacija primerka procesa z definiranim nizom konstant.

Figure 12: Specification of a process instance with a list of constants.

Slika 12 prikazuje specifikacijo procesa `evapotransp`, ki predstavlja primerek predloge `Evapotranspiration` (evapotranspiracija). Imeni obeh sodelujočih primerkov entitet (`et` in `et0`) sta podani v oklepaju. V omenjenem procesu nastopa ena sama brezdimenzijska konstanta (`coverCoeff`), katere vrednost želimo umeriti.

```

process outflowSum (totalF, [sub1.flow, sub2.flow]) : OutflowSummation {}

```

Slika 13: Specifikacija primerka procesa, ki omogoča izmenjavo informacij med posameznimi (pod)razdelki.

Figure 13: Specification of an inter-compartmental process instance.

Specifikacija primerka procesa, ki omogoča izmenjavo informacij med posameznimi (pod)razdelki (angl. inter-compartmental processes), je prikazana na sliki 13. Proces `outflowSum` omogoča izračun skupnega pretoka na nivoju razdelka `watershed` (porečje) in predstavlja primerek predloge `OutflowSummation`. Imena sodelujočih entitet so podana v oklepaju, pri čemer so enakovrstne entitete podane v oglatem oklepaju. Izraz `[sub1.flow, sub2.flow]` nam pove, da se znotraj procesa `outflowSum` seštevajo vrednosti spremenljivk entitet tipa `flow`, ki se računajo v podrazdelkih `sub1` in `sub2`. Slednja podrazdelka predstavljata dve samostojni podporečji.

3.4 Omejitve ProBMoT formalizma in potrebne prilagoditve

Izbrani formalizem, ki smo ga uporabili za zapis splošnega znanja v domensko knjižnico in specifičnega znanja v konceptualni model, ima tudi določene omejitve. Te izhajajo iz omejitev orodja ProBMoT in zahtevajo vpeljavo določenih prilagoditev.

Ker formalizem ne podpira zapisa enačb v diferenčni obliki, smo morali enačbi (15) in (16) (poglavje 2.2.1.3) prepisati v diferencialno obliko:

$$\frac{dU}{dt} = R - Q - ET - Perc \quad (39)$$

$$\frac{dSS}{dt} = Perc - GW - DS \quad (40)$$

V zgornjih dveh enačbah predstavljajo U količino vode v nenasičeni coni tal (mm), R višino padavin (mm), Q količino vode, ki površinsko odteče (mm), ET količino dejanske evapotranspiracije (mm), $Perc$ količino vode, ki pronica med obema slojema tal (mm), SS količino vode v plitvi nasičeni coni (mm), GW količino baznega odtoka (mm) in DS količino vodnih izgub zaradi globokega pronicanja (mm).

ProBMoT formalizem prav tako ne podpira zapisa pogojnih (IF-THEN) stavkov. Z omenjeno omejitvijo smo se soočili, ko smo želeli vrednosti parametra CN, ki nastopa v SCS enačbi za izračun površinskega odtoka, umerjati in sočasno upoštevati njegovo dinamično spreminjanje v odvisnosti od predhodne vlažnosti tal (slika 2). Težavo smo rešili z vpeljavo dodatnega člena v enačbo (4) (poglavje 2.2.1.1). Ta sledi zapisu Monodove enačbe (Monod, 1949), ki se na področju okoljskega inženirstva uporablja za opis kinetike rasti mikroorganizmov:

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{C}{K_C + C} \quad (41)$$

V Monodovi enačbi predstavljajo μ specifično hitrost rasti mikroorganizmov (/dan), μ_{max} maksimalno specifično hitrost rasti mikroorganizmov (/dan), C koncentracijo substrata (mg/l) in K_C konstanto nasičenja za substrat (mg/l). Slednja predstavlja koncentracijo substrata, pri kateri je specifična hitrost rasti μ enaka polovici maksimalne specifične hitrosti rasti μ_{max} . Za naše potrebe smo zgornjo enačbo preoblikovali v naslednjo obliko:

$$CN = CN_3 \cdot \frac{ant}{k + ant} \quad (42)$$

pri čemer predstavljajo CN_3 maksimalno vrednost parametra CN (glej enačbo (6)), ant vsoto padavin, zapadlih v preteklih petih dneh (mm), k pa konstanto, ki jo umerjamo. Če potegnemo vzporednico z Monodovo enačbo za izračun specifične hitrosti rasti mikroorganizmov, predstavlja k višino padavin, pri kateri CN doseže vrednost $(CN_1 + CN_3)/2$. Enačbo, namenjeno izračunu maksimalnega zadrževanja povodja oz. porečja S (enačba (4)), smo ob upoštevanju enačbe (42) preoblikovali v naslednji izraz:

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{\max \left(CN_3 \cdot \frac{ant}{k + ant}, CN_1 \right)} - 10 \right) \quad (43)$$

Ker se vrednost CN giblje med minimalno (CN_l , enačba (5)) in maksimalno vrednostjo (CN_3 , enačba (6)), smo v enačbo (43) vključili tudi dodaten pogoj, s katerim dosežemo, da vrednost CN nikoli ne pade pod vrednost CN_l .

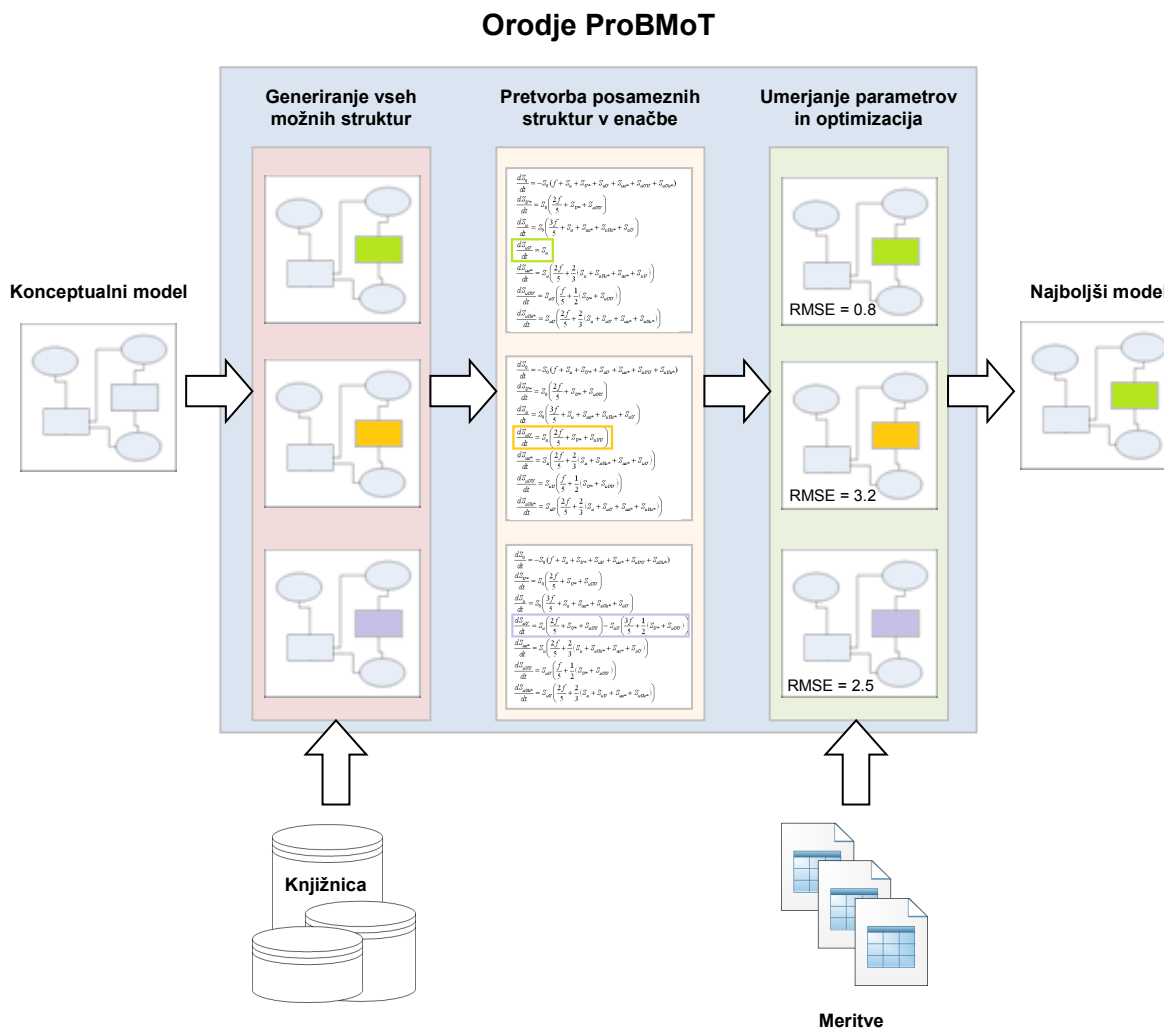
4 AVTOMATIZIRANO MODELIRANJE Z ORODJEM PROBMOT

Avtomatizirano modeliranje (AM) omogoča avtomatsko iskanje primerne strukture modela in ustreznih vrednosti uporabljenih parametrov na podlagi: a) domenske knjižnice, v kateri je v ustreznem formalizmu zapisano znanje z določenega domenskega področja (v našem primeru s področja modeliranja procesov na ravni porečij), b) opisa opazovanega sistema (v našem primeru izbranega porečja) v obliki konceptualnega modela in c) merjenih podatkov. V nadaljevanju bodo najprej predstavljene osnove modeliranja z orodjem ProBMoT. Sledil bo opis priprave vseh potrebnih vhodnih datotek.

4.1 Osnove modeliranja z orodjem ProBMoT

Orodje ProBMoT (Process-Based Modelling Tool) je bilo razvito na Odseku za tehnologije znanja Inštituta Jožef Stefan (Čerepnalkoski in sod., 2012). Namenjeno je avtomatiziranemu modeliranju sistemov, ki jih lahko opišemo z algebrskimi in/ali navadnimi diferencialnimi enačbami, pri čemer je poudarek predvsem na iskanju najprimernejše strukture modela in optimizaciji oz. umerjanju izbranih parametrov.

Postopek modeliranja z orodjem ProBMoT je prikazan na sliki 14. V prvi fazi modeliranja se na podlagi predložene knjižnice in konceptualnega modela generirajo vse možne strukture modela opazovanega sistema. Sledi faza, v kateri je vsaka posamezna struktura modela prevedena v niz algebrskih in/ali navadnih diferencialnih enačb. V zadnji fazi so določene numerične vrednosti parametrov, pri čemer je cilj doseči čim manjše odstopanje med merjenimi vrednostmi izhodnih spremenljivk in rezultati simulacije modela. ProBMoT uporablja za oceno velikosti omenjenega odstopanja koren povprečne kvadratne napake (angl. Root Mean Square Error oz. RMSE), za numerično optimizacijo pa diferencialno evolucijo, ki jo uvrščamo med stohastične optimizacijske metode (Storn in Price, 1997). Kot rezultat dobimo niz kandidatnih modelov s popolnoma določeno strukturo in definiranimi vrednostmi parametrov. Kandidatni modeli so razvrščeni na podlagi RMSE napake. Model z najnižjo vrednostjo RMSE je izbran kot najprimernejši model opazovanega sistema.



Slika 14: Prikaz modeliranja z orodjem ProBMoT. Na podlagi domenske knjižnice in konceptualnega modela, ki ga poda uporabnik, se generirajo različne kandidatne strukture modela. Posamezne strukture so najprej prevedene v nize enačb in nato umerjene napram meritvam, s ciljem določitve najboljšega modela oz. modela, ki kar najboljše opiše obnašanje opazovanega sistema. V shematskem prikazu modelov predstavljajo ovali entitete, pravokotniki pa procese. Obarvani pravokotniki ponazarjajo različne matematične formulacije posameznega procesa.

Figure 14: Schematic representation of the ProBMoT modelling approach. Candidate model structures are generated from the modelling library and a user-specified conceptual model of an observed system. The candidate models are transformed to equations and calibrated against measurements to obtain the best model of the system, i.e., the model that fits the measurements best. In the schematic representation of the models, ovals and rectangles are used to depict the entities and processes respectively. Coloured rectangles represent different process formulations.

4.1.1 Koren povprečne kvadratne napake

Koren povprečne kvadratne napake (angl. root mean square error oz. RMSE) nam pove, v kolikšni meri napovedi modela (\hat{Y}_i) odstopajo od dejanskih merjenih vrednosti opazovane spremenljivke (Y_i). RMSE agregira velikosti napak N-različnih napovedi vrednosti spremenljivke Y v različnih časovnih

korakih i v enotno merilo za oceno napovedne uspešnosti posameznega modela (enačba (44)). Hkrati omogoča primerjavo napovedne sposobnosti izbranega modela napram ostalim modelom. Načeloma velja, da je nižja vrednost napake RMSE indikator boljšega ujemanja rezultatov modela z meritvami.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (44)$$

4.1.2 Diferencialna evolucija

Diferencialna evolucija (angl. differential evolution oz. DE) je evolucijski algoritem Pricea in Storna iz leta 1997, ki s svojim obnašanjem posnema biološke procese genetskega dedovanja in preživetja najsposobnejših osebkov. Uporabljamo ga za globalno optimizacijo numeričnih funkcij. Algoritem je v grobem sestavljen iz treh operacij: mutacije, križanja in selekcije oz. izbora, s pomočjo katerih izboljšuje približek iskani rešitvi. Parametri, ki vplivajo na delovanje DE algoritma, so skalirni faktor (F ; $0 < F < 2$), stopnja križanja (CR ; $0 < CR < 1$) in velikost populacije (NP ; $NP > 4$).

Algoritem DE uporablja za ločevanje med dobrimi in slabimi rešitvami izbrano kriterijsko funkcijo (v našem primeru RMSE). Kriterijska funkcija v vsaki generaciji poda oceno ustreznosti novo ustvarjenih osebkov oz. vektorjev. Omenjena ocena nam pove, kako močen je posamezen osebek znotraj populacije. Glede na to, da algoritem DE išče globalni minimum, je manjša vrednost kriterijske funkcije (v našem primeru RMSE) indikator sposobnejšega osebka. Močnejši, kot je osebek, večja je verjetnost, da bo izbran v postopku naravne selekcije.

DE se začne z generacijo NP naključno izbranih D -razsežnostnih parametrskih vektorjev, ki predstavljajo populacijo generacije G (slika 15). Posamezen generiran vektor imenujemo **ciljni vektor**. Zapišemo ga kot:

$$x_{i,G} = (x_1, x_2, \dots, x_D) \quad (45)$$

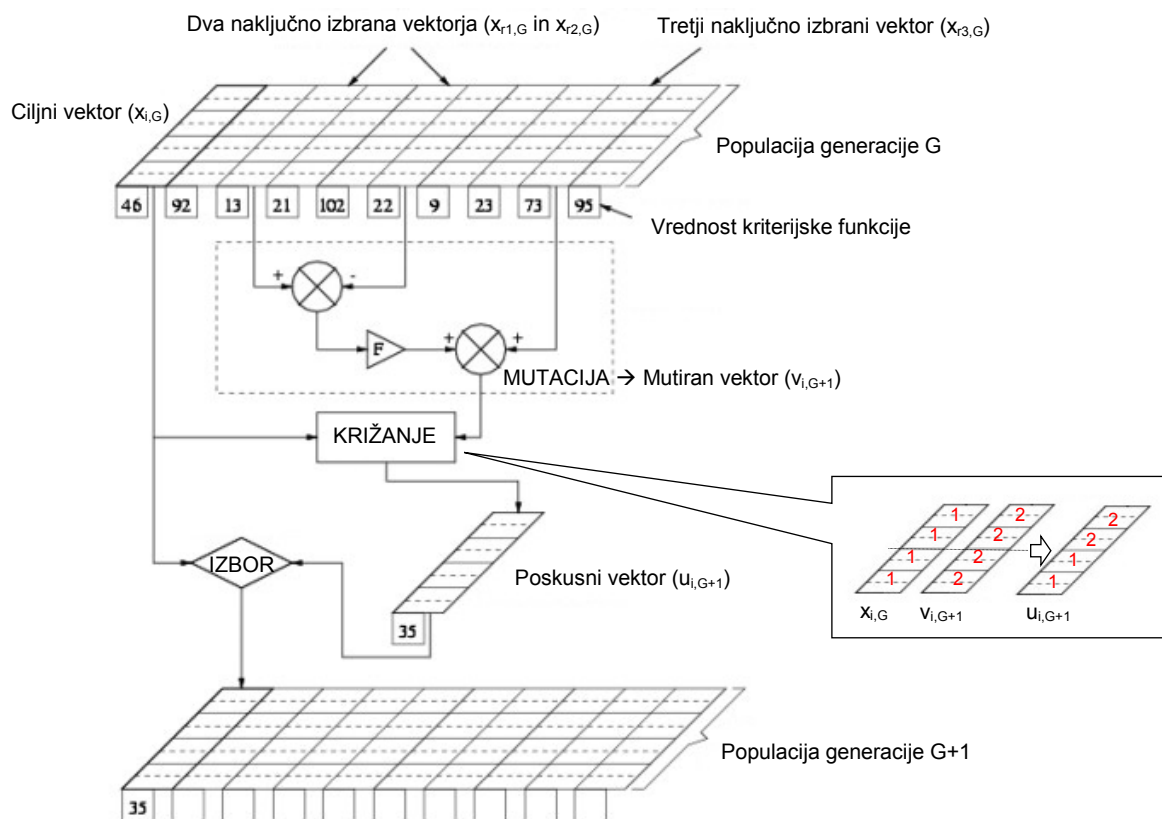
pri čemer indeks i predstavlja vrednost med 1 in NP . Algoritem določi začetno populacijo naključno, tako da enakomerno zajame celoten parametrski prostor.

Med optimizacijskim postopkom ustvari algoritem nove parametrske vektorje, in sicer tako, da prišteje uteženo razliko dveh naključno izbranih vektorjev tretjemu vektorju (enačba 46). Tej operaciji pravimo mutacija, dobljenemu vektorju pa **mutiran vektor**:

$$v_{i,G+1} = F \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}) + x_{r3,G} \quad (46)$$

V zgornji enačbi predstavljajo indeksi r_1 , r_2 in r_3 naključne vrednosti med 1 in NP. Sledi križanje parametrov mutiranega vektorja $v_{i,G+1}$ s parametri ciljnega vektorja $x_{i,G}$ (slika 15), pri čemer je izbira mesta križanja naključna. Rezultat križanja je t. i. **poskusni vektor**:

$$u_{i,G+1} = (u_1, u_2, \dots, u_D) \quad (47)$$



Slika 15: Prikaz algoritma diferencialne evolucije (prirejeno po Worden in Manson, 2012).

Figure 15: Schematic representation of the differential evolution algorithm (adapted from Worden and Manson, 2012).

Na koncu izvede algoritem še izbor, v katerem primerja vrednosti kriterijske funkcije poskusnega ($u_{i,G+1}$) in ciljnega vektorja ($x_{i,G}$). Če slednji predstavlja slabšo rešitev, ga v generaciji G+1 nadomesti poskusni vektor (slika 15). Posledično se NP iz generacije v generacijo ne spreminja.

DE ponuja več različnih strategij mutacije in križanja, ki jih lahko zapišemo v obliki DE/x/y/z. V omenjenem načinu zapisa predstavlja x način izbora ciljnega vektorja (rand: naključen izbor, best: izbor najboljšega vektorja v posamezni generaciji), y število uporabljenih diferenčnih vektorjev (pri čemer predstavlja diferenčni vektor razliko med dvema naključno izbranimi vektorjema), z pa način križanja (exp: eksponentno, bin: binomsko).

4.2 Priprava vhodnih datotek

Osnovo za modeliranje z orodjem ProBMoT predstavlja generična knjižnica (priloga B), v kateri je zbrano splošno domensko znanje, zapisano v obliki komponent, imenovanih predloge (glej poglavje 3.1). Knjižnica je shranjena v datoteki s končnico pbl.

Če želimo orodje ProBMoT uporabiti za modeliranje specifičnega sistema (v našem primeru izbranega porečja), moramo pripraviti več vhodnih datotek. Poleg konceptualnega modela (datoteka s končnico pbm), ki podaja opis opazovanega porečja, moramo pripraviti še podatkovno datoteko (končnica data) z merjenimi vrednostmi neodvisnih spremenljivk in datoteko s končnico xml, v kateri navedemo osnovne nastavitve za poganjanje orodja ProBMoT. Sledi opis naštetih vhodnih datotek.

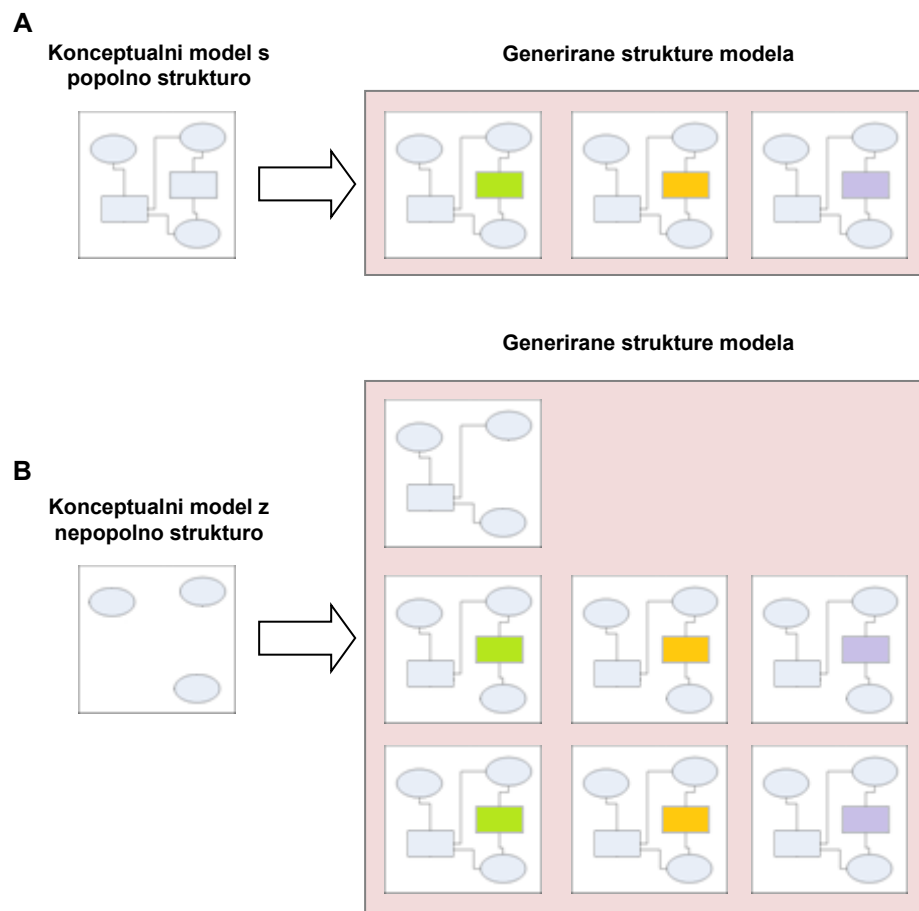
4.2.1 Konceptualni model (.pbm)

S konceptualnim modelom opišemo opazovani sistem, v našem primeru izbrano porečje, pri čemer mora struktura konceptualnega modela slediti strukturi relevantne domenske knjižnice. Za opis opazovanega sistema uporabimo komponente, imenovane primerki (glej poglavje 3.1). Konceptualni model shranimo v datoteko s končnico pbm.

V nasprotju s teoretičnim pristopom k modeliranju, kjer konceptualni model predstavlja popolnoma določen sistem z natančno definiranimi spremenljivkami in procesi, lahko v našem primeru definiramo konceptualni model s popolno ali nepopolno strukturo. Izbor strukture konceptualnega modela neposredno vpliva na število generiranih modelov za izbrani primer. Več strukture podamo, manjše bo število generiranih modelov, ki bodo šli skozi postopek optimizacije oz. umerjanja parametrov.

4.2.1.1 Konceptualni model s popolno strukturo

V primeru konceptualnega modela s popolno strukturo izberemo za opis opazovanega sistema točno določeno konceptualizacijo, pri čemer natančno definiramo vse sodelujoče spremenljivke in procese (slika 16A). Na ravni matematičnega zapisa lahko vsak proces, ki nastopa v konceptualnem modelu, opišemo z različnimi matematičnimi izrazi oz. enačbami. Posledično lahko iz enega samega konceptualnega modela s popolno strukturo generiramo več različnih matematičnih modelov opazovanega sistema. V tem primeru mora orodje za AM najprej identificirati vse možne strukture modela opazovanega sistema oz. vse možne kombinacije alternativnih matematičnih izrazov za opis izbranih procesov. Nato mora izvesti umerjanje parametrov vseh generiranih struktur modela. Na osnovi napake med merjenimi in izračunanimi vrednostmi izbranih spremenljivk izbere tisto strukturo modela, ki najbolje opiše obnašanje opazovanega sistema.



Slika 16: Generiranje različnih struktur modela na osnovi konceptualnega modela z A) popolno in B) nepopolno strukturo. Ovali na sliki predstavljajo entitete, pravokotniki pa procese. Obarvani pravokotniki ponazarjajo različne matematične formulacije posameznega procesa.

Figure 16: Generation of candidate model structures by using A) a complete and B) an incomplete conceptual model. Ovals represent entities while the rectangles depict processes. Coloured rectangles represent different process formulations.

Če v konceptualnem modelu s popolno strukturo za posamezen proces ne izberemo točno določenega matematičnega izraza oz. če ne podamo točnih vrednosti parametrov, ki nastopajo v izbranih matematičnih izrazih, potem je konceptualni model z vidika konceptualizacije sicer popoln, je pa nepopoln na nivoju matematičnega modela.

Pri popolni matematični specifikaciji modela moramo za opis posameznega procesa izbrati točno določen matematični izraz. Slednje nam omogoča, da nabor vseh možnih struktur modela za opis opazovanega sistema zožimo na en sam matematični model. Z določitvijo vrednosti vseh parametrov, ki sodelujejo v izbranih matematičnih izrazih, se lahko izognemo tako iskanju najbolj primerne strukture modela kot tudi postopku umerjanja parametrov.

4.2.1.2 Konceptualni model z nepopolno strukturo

Z nepopolno strukturo konceptualnega modela zajamemo več različnih konceptualizacij opazovanega sistema, pri čemer lahko posamezno konceptualizacijo ponazorimo z vsaj enim matematičnim modelom (slika 16B). Nepopolno strukturo konceptualnega modela lahko obravnavamo na dva načina. Posamezni proces lahko definiramo kot proces na višji ravni, ki ga lahko opišemo na več alternativnih načinov, lahko pa se odločimo tudi za vključitev t. i. praznega procesa med že omenjene alternative. Na ta način upoštevamo možnost, da izbrani proces v opazovanem sistemu ne nastopa. V primeru konceptualnega modela z nepopolno strukturo mora orodje za AM izvesti tako iskanje najprimernejše strukture modela kot tudi umerjanje parametrov.

4.2.2 Podatkovna datoteka (.data)

V podatkovni datoteki so zbrane vrednosti spremenljivke, ki ponazarja čas, merjene vrednosti vseh neodvisnih spremenljivk, ki nastopajo v konceptualnem modelu, in merjene vrednosti odvisnih (sistemskih) spremenljivk, ki jih želimo uporabiti v postopku umerjanja. Prva vrstica podatkovne datoteke vsebuje imena izbranih spremenljivk oz. imena stolpcev podatkovne datoteke. V vsaki nadaljnji vrstici so nanizane meritve vseh obravnavanih spremenljivk v posameznem časovnem koraku.

Podatkovna datoteka ne dopušča praznih celic. Manjkajoče meritve lahko nadomestimo z interpoliranimi (oz. kako drugače izvrednotenimi) vrednostmi, lahko pa izpustimo celotno vrstico, v kateri se nahaja manjkajoča meritev (slika 17). Če izberemo slednjo opcijo, potem izgubimo meritve vseh spremenljivk v izbranem (izpuščenem) časovnem koraku.

```
time,prec1,prec2,prec3,prec4,prec5,flow
1,13.3,13.3,8.2,8.2,8.2,0.00
2,12.9,12.9,2.6,2.6,2.6,0.00
4,3.4,3.4,0.2,0.2,0.2,0.00
:
730,10.8,10.8,24.2,24.2,24.2,29.15
```

Slika 17: Izsek iz datoteke z vhodnimi podatki (.data). V prvi vrstici so podana imena spremenljivk, v vseh nadaljnjih vrsticah pa njihove vrednosti, izmerjene v posameznem časovnem koraku, razmejene z vejico. Če v posameznem časovnem koraku nimamo meritev, lahko izpustimo celotno vrstico (primer: manjkajoča vrstica v časovnem koraku 3).

Figure 17: Input data file (.data) fragment. Names of the variables are given in the first row, followed by the rows containing values of the selected variables measured at specific time steps. These values are separated with commas. If we do not have measurements for a given time step, we can remove the entire data row (example: missing row at the time step 3).

Podatkovno datoteko lahko pripravimo v programu Excel in jo nato shranimo v format data. V omenjenem formatu so vrednosti spremenljivk v posamezni vrstici medsebojno razmejene z izbranim ločilom (običajno z vejico ali presledkom, slika 17).

4.2.3 Datoteka z nastavitvami (.xml)

Nastavitve, potrebne za poganjanje orodja ProBMoT, zapišemo v datoteko s končnico xml. Najprej navedemo povezave do datotek, v katerih so shranjene knjižnica (<library>), konceptualni model (<model>) in vhodni podatki (<data>) – glej sliko 18. Če uporabljamo konceptualni model z nepopolno strukturo, nadomestimo zapis <model> z zapisom <incomplete>. Pri navedbi povezave do podatkovne datoteke podamo še informacijo o ločilu, ki smo ga uporabili za razmejitev podatkov (separator).

```
<library>work/Quarteira/WatershedModelling.pbl</library>
<model>work/Quarteira/Example.pbm </model>

<data>
  <d separator=",">work/Quarteira/input.data</d>
</data>
```

Slika 18: Specifikacija povezav do knjižnice, konceptualnega modela in datoteke z vhodnimi podatki.

Figure 18: Specification of links to files containing a library, a conceptual model and an input data.

Sledi specifikacija spremenljivke, ki v podatkovni datoteki ponazarja čas (<dimensions>), pri čemer podamo njeno ime (name) in ime pripadajočega stolpca v datoteki z vhodnimi podatki (col, slika 19A). Podati moramo tudi specifikacijo vseh eksogenih oz. neodvisnih spremenljivk, ki nastopajo v našem modelu (<exogenous>). Pri vsaki spremenljivki navedemo ime (name), sestavljeno iz imena konceptualnega modela, imena razdelka, imena morebitnega podrazdelka, imena entitete ter imena spremenljivke, pri čemer so vsa našeta imena med seboj ločena s piko. Zraven navedemo še ime stolpca v podatkovni datoteki, v katerem so podane (merjene) vrednosti izbrane neodvisne spremenljivke (col).

Slika 19B prikazuje specifikacijo eksogene spremenljivke prec.amountOfWater, ki pripada podrazdelku sub1 in razdelku watershed, njena specifikacija pa je zapisana v konceptualnem modelu Example.pbm. Vrednosti spremenljivke so v podatkovni datoteki zapisane v stolpcu prec1.

```
A) <dimensions>
    <dim name="time" col="time"/>
</dimensions>

B) <exogenous>
    <exo name="Example.watershed.sub1.prec.amountOfWater" col="prec1"/>
</exogenous>

C) <outputs>
    <out name="flow_rate" col="flow"/>
</outputs>

D) <variables>
    <var name="flow_rate">Example.ws.totalF.rate</var>
</variables>
```

Slika 19: Specifikacija spremenljivk v datoteki .xml. Podani so primeri specifikacije A) spremenljivke, ki ponazarja čas, B) neodvisne spremenljivke, C) spremenljivke, na osnovi katere umerjamo model in D) odvisne spremenljivke.

Figure 19: Specification of variables within the .xml file. Examples represent the specification of A) a time variable, B) an exogenous variable, C) a calibration variable and D) an endogenous variable.

Sledi navedba spremenljivk, na osnovi katerih umerjamo model (<outputs>). Pri vsaki spremenljivki podamo njeno ime (name) in ime stolpca v podatkovni datoteki, v katerem so podane njene (merjene) vrednosti (col, slika 19C).

Nato podamo seznam endogenih (odvisnih) spremenljivk (<variables>). Izberemo samo tiste odvisne spremenljivke, ki jih želimo prikazati v datoteki z rezultati. Pri vsaki spremenljivki podamo izbrano ime (name), ki bo prikazano v izhodni datoteki, in dejansko ime spremenljivke, sestavljeno iz imena konceptualnega modela, imena razdelka, imena morebitnega podrazdelka, imena entitete in imena spremenljivke, pri čemer so vsa imena med seboj ločena s piko.

Slika 19D prikazuje specifikacijo endogene spremenljivke totalF.rate, ki pripada razdelku watershed, njena specifikacija pa je zapisana v konceptualnem modelu Example.pbm. Želimo, da so v datoteki z rezultati vrednosti omenjene spremenljivke zapisane v stolpcu flow_rate.

Sledi specifikacija računske naloge oz. ukaza (<command>), pri čemer lahko izbiramo med štirimi različnimi ukazi (glej preglednico 15). Računske naloge so lahko izvedene samo v kombinaciji s konceptualnim modelom z določeno strukturo. Ukaza exhaustive_search in fit_model sta možna samo v kombinaciji z nepopolnim konceptualnim modelom – v prvem primeru s konceptualno nepopolnim, v drugem pa z matematično nepopolnim modelom. Simulacijo (ukaz simulate_model) lahko izvedemo samo v kombinaciji s konceptualnim modelom s (konceptualno in matematično) popolno strukturo.

Preglednica 15: ProBMoT ukazi.

Table 15: ProBMoT commands.

Ukaz	Konceptualni model	Naloga	Opis
enumerate	popoln ali nepopoln	izpis enačb	izpis vseh kandidatnih modelov v obliki matematičnih izrazov oz. enačb
exhaustive_search	nepopoln	iskanje strukture + umerjanje parametrov	izpis vseh možnih struktur modela z umerjenimi vrednostmi parametrov
fit_model	nepopoln	umerjanje parametrov	umerjanje ene same strukture modela
simulate_model	popoln	simulacija	simulacija izbranega modela

Če izberemo katerega izmed ukazov, ki vključujejo umerjanje parametrov modela (`exhaustive_search` ali `fit_model`), moramo določiti še želeno optimizacijsko metodo (`<fitter>`) ter podati njene osnovne nastavitve. V orodju ProBMoT lahko izbiramo med tremi optimizacijskimi metodami: ALG-717 (Bunch in sod., 1993), DASA (Differential Ant Stigmergy Algorithm; Korošec in sod., 2012) in DE (Differential Evolution; Storn in Price, 1997). Metoda ALG-717 spada med lokalne, metodi DASA in DE pa med globalne optimizacijske metode. Za potrebe doktorske disertacije smo uporabljali samo metodo DE, ki je podrobneje opisana v poglavju 4.1.2.

Slika 20A prikazuje specifikacijo optimizacijske metode DE. Pri omenjeni metodi moramo določiti vrednosti treh krmilnih parametrov: NP (`<population>`), F (`<F>`) in CR (`<CR>`). Izbrati moramo tudi strategijo mutacije in križanja (`<strategy>`), pri čemer se najbolj pogosto uporablja strategija `rand/1/bin`, število evalvacij (`<evaluations>`) in število ponovitev (`<restarts>`).

```

A) <fitter method="DE">
  <restarts>1</restarts>
  <evaluations>1000</evaluations>
  <population>30</population>
  <strategy>rand/1/bin</strategy>
  <F>0.1</F>
  <Cr>0.5</Cr>
</fitter>

B) <simulator method="CVODE">
  <abstol>1e-3</abstol>
  <reltol>1e-3</reltol>
</simulator>

```

Slika 20: Specifikacija metod za A) umerjanje parametrov in B) simulacijo.

Figure 20: Specification of the A) optimization and B) simulation method.

Če izberemo ukaz `simulate_model`, moramo določiti še izbrano simulacijsko metodo (`<simulator>`) ter podati njene osnovne nastavitve. Orodje ProBMoT trenutno ponuja eno samo

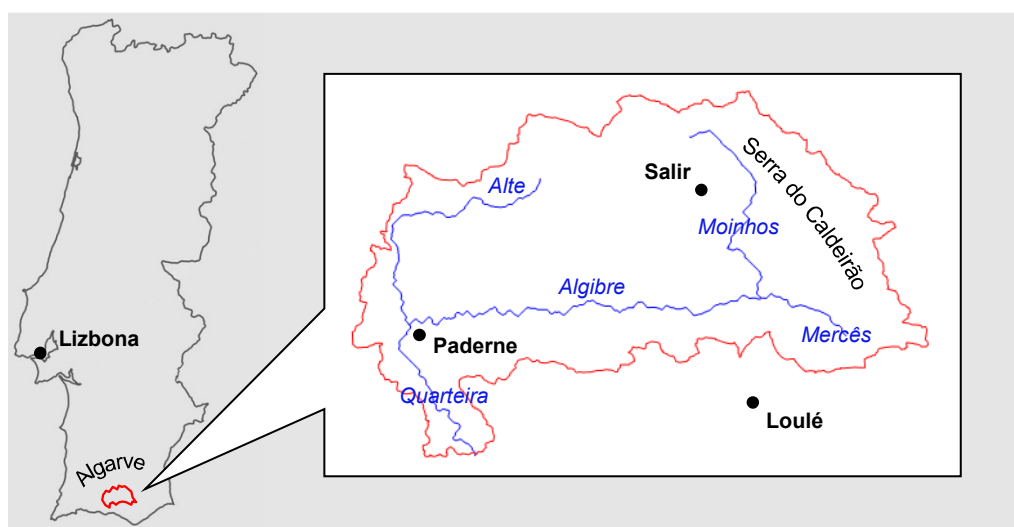
simulacijsko metodo, imenovano CVODE (Cohen in Hindmarsh, 1996). Omenjena metoda je namenjena numeričnemu reševanju navadnih diferencialnih enačb. Pri specifikaciji simulacijske metode CVODE (slika 20B) moramo podati vrednosti absolutne (`<abstol>`) in relativne tolerance (`<reltol>`). Z omenjenima tolerancama definiramo želeno natančnost rezultatov simulacije.

Na koncu navedemo še povezavo do datoteke z rezultati, ki jo želimo ustvariti in v katero ProBMoT zapiše izračunane vrednosti izbranih odvisnih spremenljivk (`<write>`).

5 APLIKACIJA DOMENSKE KNJIŽNICE IN ORODJA PROBMOT NA TESTNEM PRIMERU

5.1 Opis izbranega porečja

Za aplikacijo domenske knjižnice (priloga B) in orodja za avtomatizirano modeliranje ProBMoT smo izbrali prispevno območje reke Quarteire, ki leži v pokrajini Algarve na jugu Portugalske (slika 21) in meri približno 315 km². Reko Quarteiro napajata dva večja pritoka – reki Alte in Algibre. V slednjo se stekata pritoka Moinhos in Mercês, ki izvirata v gričevju Serra do Caldeirão.



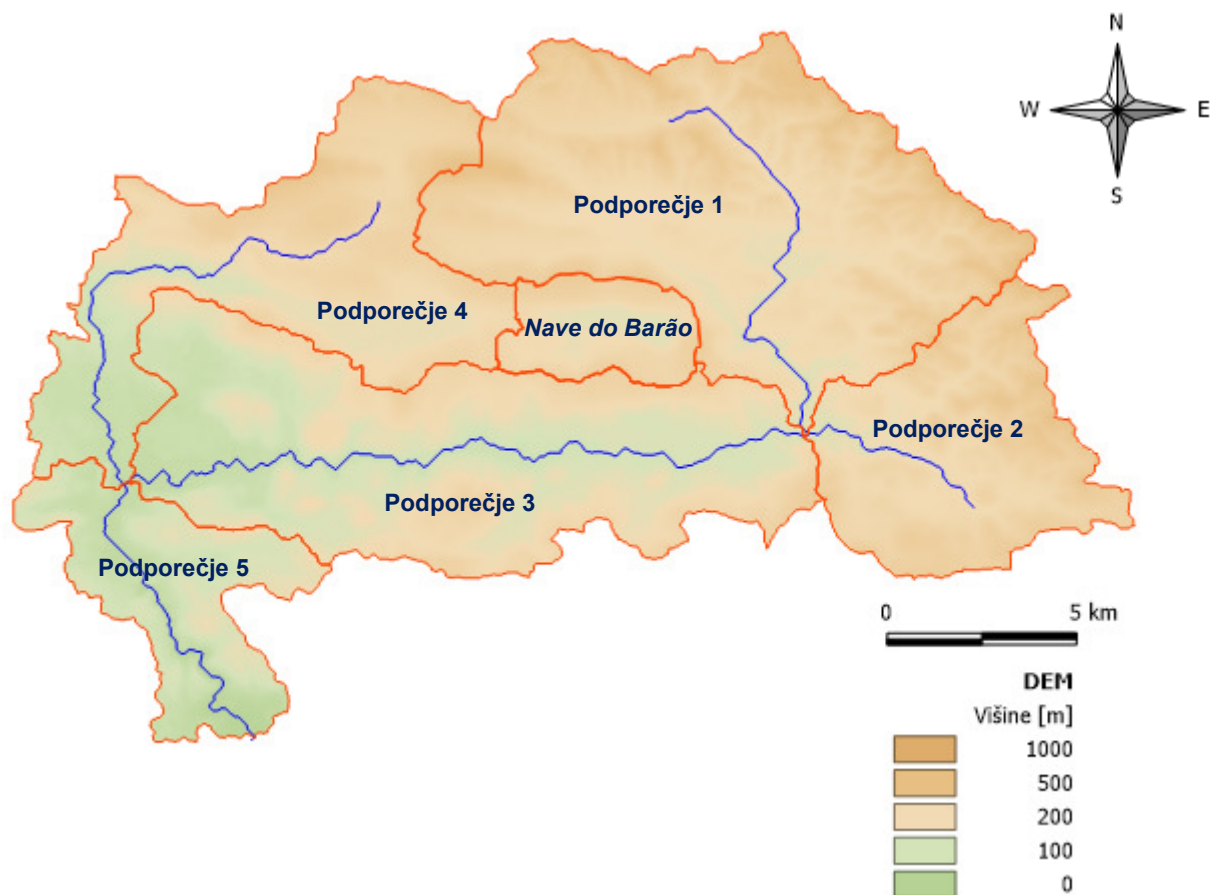
Slika 21: Lokacija izbranega testnega območja.

Figure 21: Location of the selected study area.

Porečje reke Quarteire smo izbrali zato, ker je bilo kot testno območje vključeno v vzporedni raziskovalni projekt IMPACT (www.impact.igb-berlin.de), namenjen razvoju modelov za določitev vpliva antropogenih dejavnikov na rečni ekosistem. V sklopu omenjenega projekta je bila izdelana hidrološka analiza porečja reke Quarteire (Sohel, 2012), in sicer z uporabo programa SWAT (Arnold in Fohrer, 2005). Območje je bilo posredno vključeno tudi v več študij, ki so obravnavale količinsko in kakovostno stanje vodonosnika Querença-Silves (npr. Stigter in sod., 2009; Salvador in sod., 2012).

5.1.1 Topografija

Relief prispevnega območja reke Quarteire je razgiban, z nadmorskimi višinami med 14 in 516 m (slika 22). Vzhodni del porečja, ki leži na zahodnih obronkih gričevja Serra do Caldeirão, prehaja proti jugozahodu v pretežno ravninski del. Povprečni padec terena znaša 0,126 m/m.



Slika 22: Topografija porečja reke Quarteire.

Figure 22: Topography of the Quarteira river catchment.

Na podlagi digitalnega modela višin (DMV) z ločljivostjo 30 m, pridobljenega s strani portugalske Agencije za okolje (Agência Portuguesa do Ambiente), smo v GIS orodju Manifold izvedli avtomatsko razmejitev porečja na posamezna podporečja, pri čemer se je izoblikovalo pet podporečij (slika 22). Območje med podporečji 1, 3 in 4 pripada kraški depresiji Nave do Barão z značilnostmi presihajočega jezera. Omenjeno območje ne prispeva k površinskemu odtoku s porečja reke Quarteire.

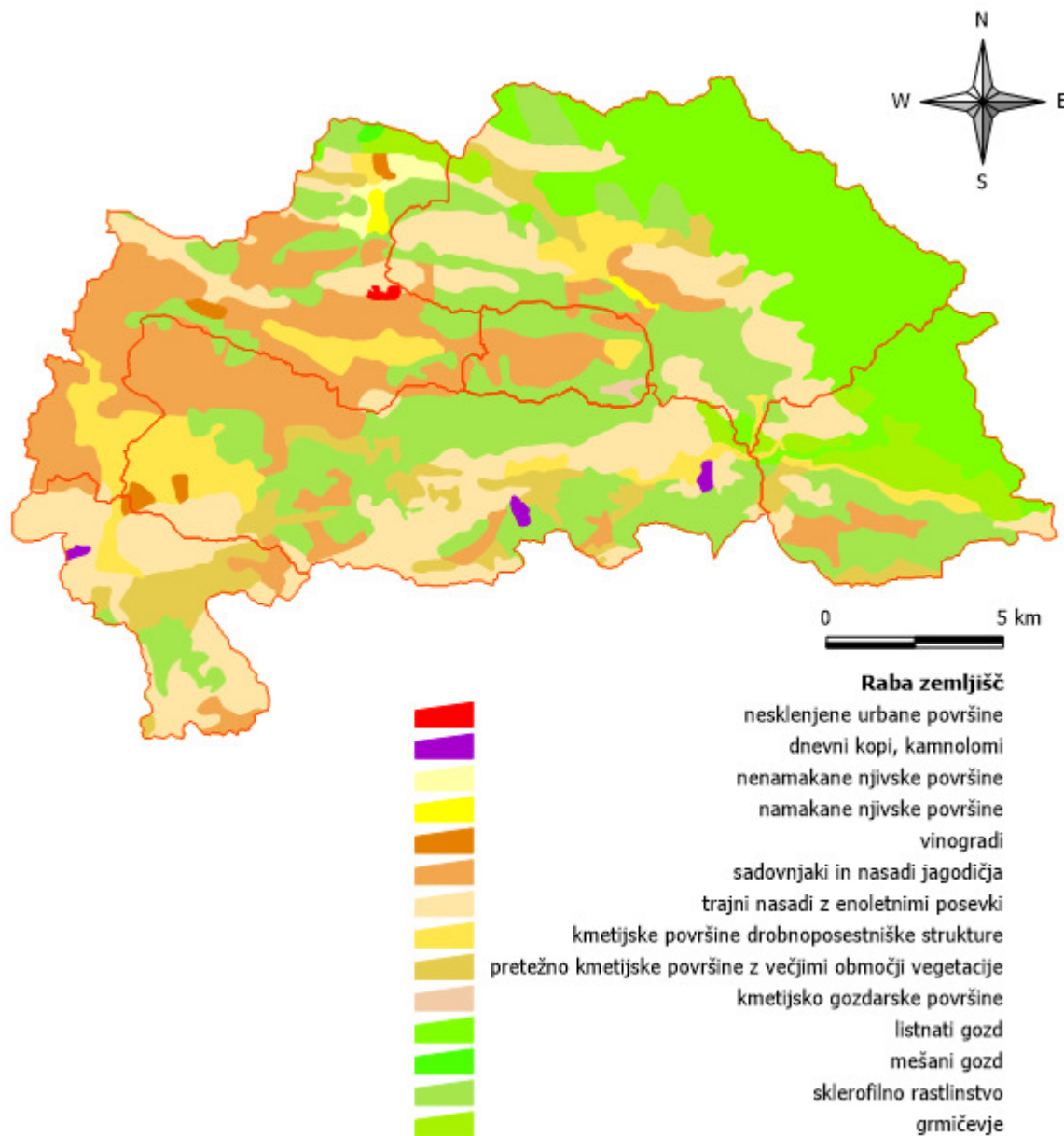
Preglednica 16: Lastnosti terena in rečnih odsekov po posameznih podporečjih porečja reke Quarteire.

Table 16: Terrain and river stretch characteristics for each subcatchment of the Quarteira river catchment.

	Podporečje					Nave do Barão
	1	2	3	4	5	
Površina (km²)	92,02	39,97	84,03	58,18	27,79	12,52
Padec terena (m/m)	0,185	0,183	0,118	0,111	0,108	0,130
Povprečna dolžina pobočja (m)*	130,7	126,4	153,4	133,0	114,0	191,7
Padec rečnega odseka (m/m)	0,008	0,013	0,003	0,011	0,004	-
Dolžina rečnega odseka (km)	13,25	5,83	23,03	16,27	10,21	-

* Dolžina pobočja predstavlja horizontalno dolžino med točko, kjer se začne formirati površinski tok vode, in (1) točko, v kateri prihaja zaradi spremembe v naklonu terena do odlaganja materiala, ali (2) točko izlitja površinskega toka v glavni kanal odvodnika (Wischmeier in Smith, 1978).

V preglednici 16 so podane lastnosti terena po posameznih podporečjih, vključno s karakteristikami rečnih odsekov, ki pripadajo posameznemu podporečju. Omenjene lastnosti smo določili z uporabo GIS orodja Manifold, z izjemo povprečne dolžine pobočja, ki smo jo iz vrednotili z GIS orodjem SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses). SAGA GIS uporablja za določitev dolžine pobočja deterministični algoritem, ki ga je leta 1997 predstavil Tarboton.



Slika 23: Raba zemljišč v porečju reke Quarteire.

Figure 23: Land use within the Quarteira river catchment.

5.1.2 Raba zemljišč

Rabo zemljišč smo določili s pomočjo tematske karte Corine Land Cover (CLC, slika 23), ki smo jo pridobili s strani portugalske Agencije za okolje. Iz medsebojne primerjave slik 22 in 23 je razvidno,

da raba zemljišč na izbranem prispevnem območju sledi razgibanosti terena. Vzhodni gričevnat del porečja prekriva naravno rastje, predvsem listnati gozd, sklerofilno rastlinje in grmičevje. Zahodni del porečja je z vidika pokrovnosti veliko bolj raznolik. Tu prevladujejo kmetijske površine, predvsem sadovnjaki. Urbanih površin je malo. Edina nesklenjena urbana površina, ki je bila zajeta s CLC metodologijo (rdeče obarvan poligon na sliki 23), pripada naselju Benafim Grande.

Raba zemljišč po posameznih podporečjih je predstavljena v preglednici 17, pri čemer so vrednosti podane v procentih površine podporečja. Prikazane so samo tiste rabe zemljišč, ki pokrivajo vsaj 1 % površine podporečja. Z rdečo je označen procent prevladujoče rabe zemljišč.

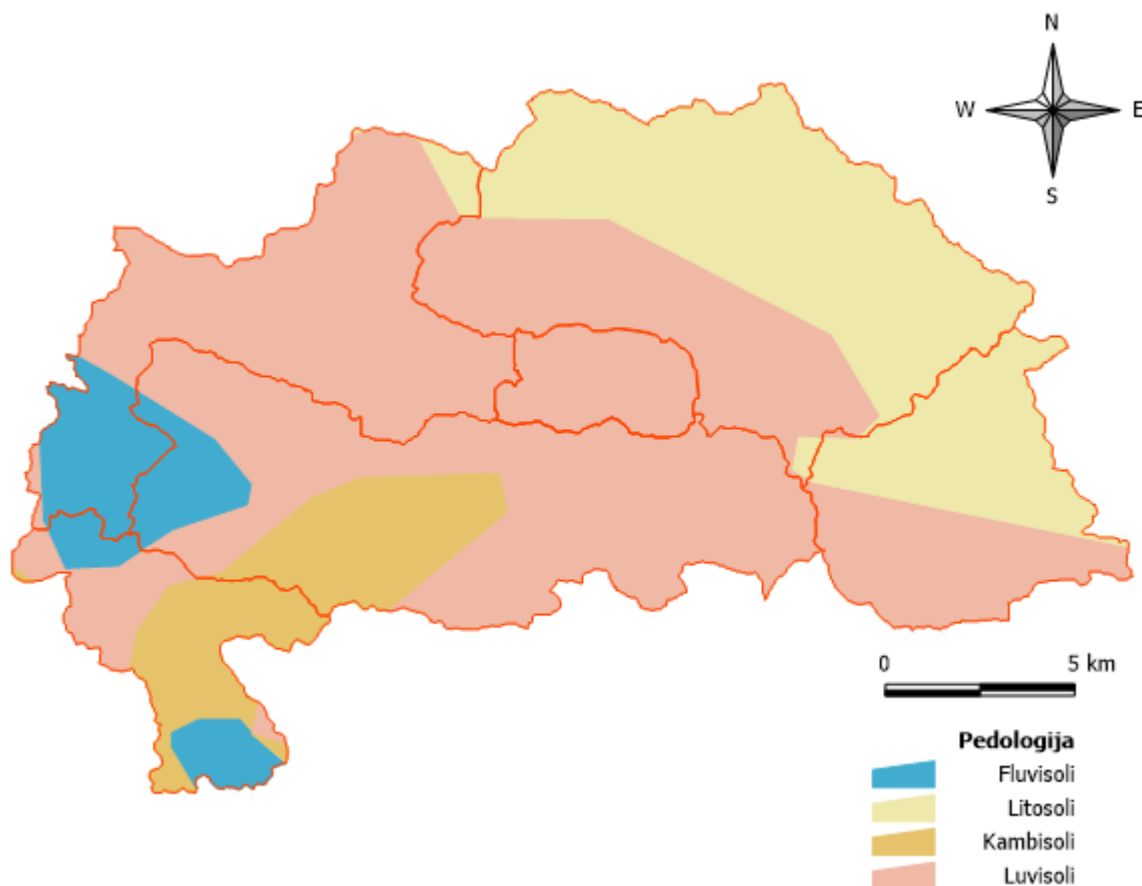
Preglednica 17: Raba zemljišč po posameznih podporečjih porečja reke Quarteire (v procentih površine podporečja).

Table 17: Land use distribution per each subcatchment of the Quarteira river catchment (in percentage shares of the subcatchment area).

Raba zemljišč	CLC koda	Podporečje					Nave do Barão
		1	2	3	4	5	
nesklenjene urbane površine	112						
dnevni kopi, kamnolomi	131			1		1	
nenamakane njivske površine	211				3		
namakane njivske površine	212				1		
vinogradi	221			1	1		
sadovnjaki in nasadi jagodičja	222	3	6	19	48	7	39
trajni nasadi z enoletnimi posevki	241	20	11	24	12	57	
kmetijske površine drobnoposestniške strukture	242	4	4	10	13	5	4
pretežno kmetijske površine z večjimi območji vegetacije	243	4	5	8	1	21	
kmetijsko gozdarske površine	244						3
listnati gozd	311	47	34				
mešani gozd	313				1		
sklerofilno rastlinstvo	323	20	23	36	18	9	54
grmičevje	324	1	17	1	2		

5.1.3 Tla in hidrogeologija

Pedološko karto smo, tako kot večino ostalih tematskih kart, pridobili s strani portugalske Agencije za okolje. Pri opisu posameznih tipov tal smo si pomagali z viroma (Repe, 2006) in (GURS, 2008). Iz slike 24 je razvidno, da na izbranem območju prevladujejo *luvisoli* oz. izprana tla, nastala na apnenčasti matični podlagi. Luvisoli so vezani na humidna klimatska območja in so občutljivi na erozijo. Za tovrstna tla je značilno, da so kljub razmeroma visoki vsebnosti gline v spodnjem delu profila dobro prepustna za vodo. Običajno so poraščena z gozdno vegetacijo, v ravnem in umirjenem reliefu pa z rodovitnimi njivskimi in travniškimi površinami.



Slika 24: Pedološka karta porečja reke Quarteire.

Figure 24: Soil map of the Quarteira river catchment.

Na vzhodnem delu porečja najdemo *litosole* oz. nerazvita tla, nastala na trdni matični kamnini, natančneje na glinenih skrilavcih. Tovrstna tla so zaradi zelo plitvega profila neprimerna za kmetijsko rabo.

Na apnenčasti matični podlagi jugozahodnega ravninskega dela so se razvili *kambisoli* oz. rjava pokarbonatna tla. Zaradi ugodne teksture in prisotnosti nižje ležečih prepustnih slojev so tovrstna tla dobro drenirana, kljub razmeroma visoki vsebnosti gline. Na kambičnih tleh prevladuje gozd (kot naravna vegetacija), sicer pa so tovrstna tla primerna tudi za kmetijsko rabo.

Na rečnih naplavinah so se razvili *fluvisoli* oz. obrečna tla. Značilnosti fluvisolov so odvisne od lastnosti materiala, ki ga reka s prispevnega območja transportira v rečni tok in nato odlaga vzdolž svoje struge. Kljub temu, da fluvisole uvrščamo med nerazvita tla, imajo običajno zelo visoko pridelovalno sposobnost.

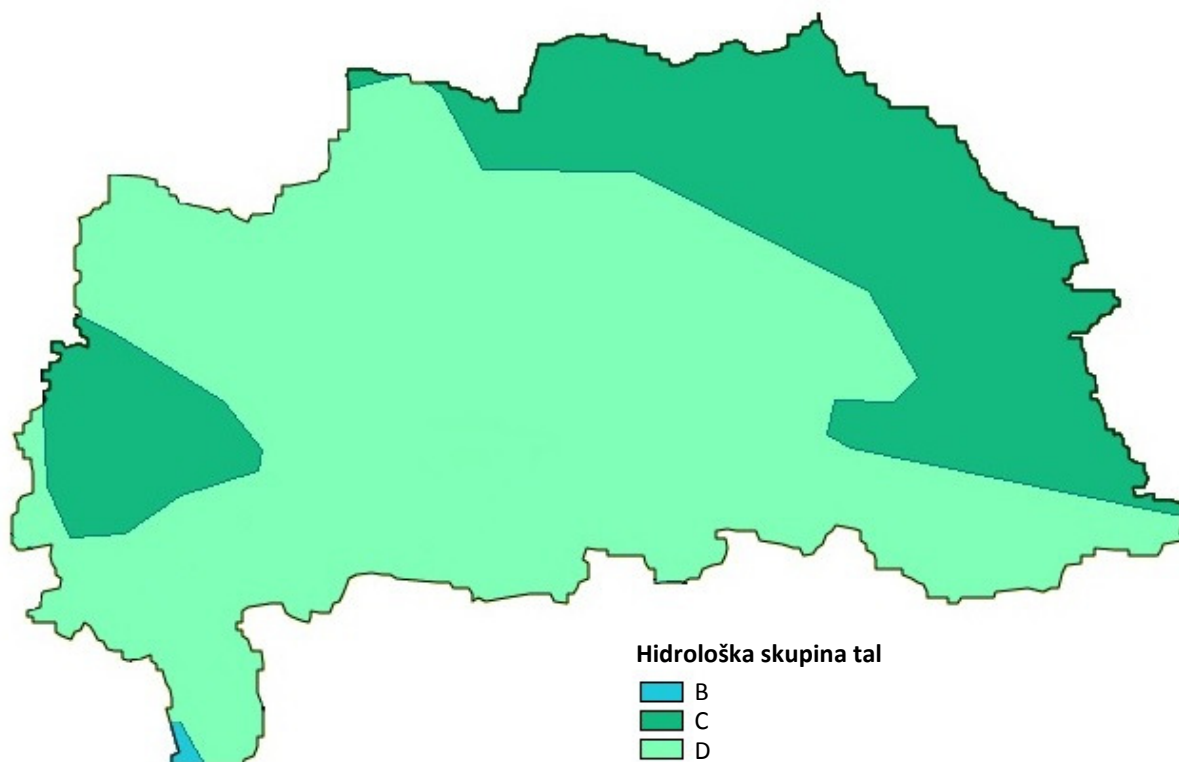
V preglednici 18 so predstavljeni tipi tal po posameznih podporečjih, izraženi v procentu površine. Z rdečo je označen procent prevladujočega tipa tal.

Preglednica 18: Tip tal po posameznih podporečjih porečja reke Quarteire (v procentih površine podporečja).

Table 18: Soil type per each subcatchment of the Quarteira river catchment (in percentage shares of the subcatchment area).

Tip tal	Podporečje					Nave do Barão
	1	2	3	4	5	
fluvisoli			8	17	23	
litosoli	61	52		3		
kambisoli			20		49	
luvisoli	39	48	72	80	28	100

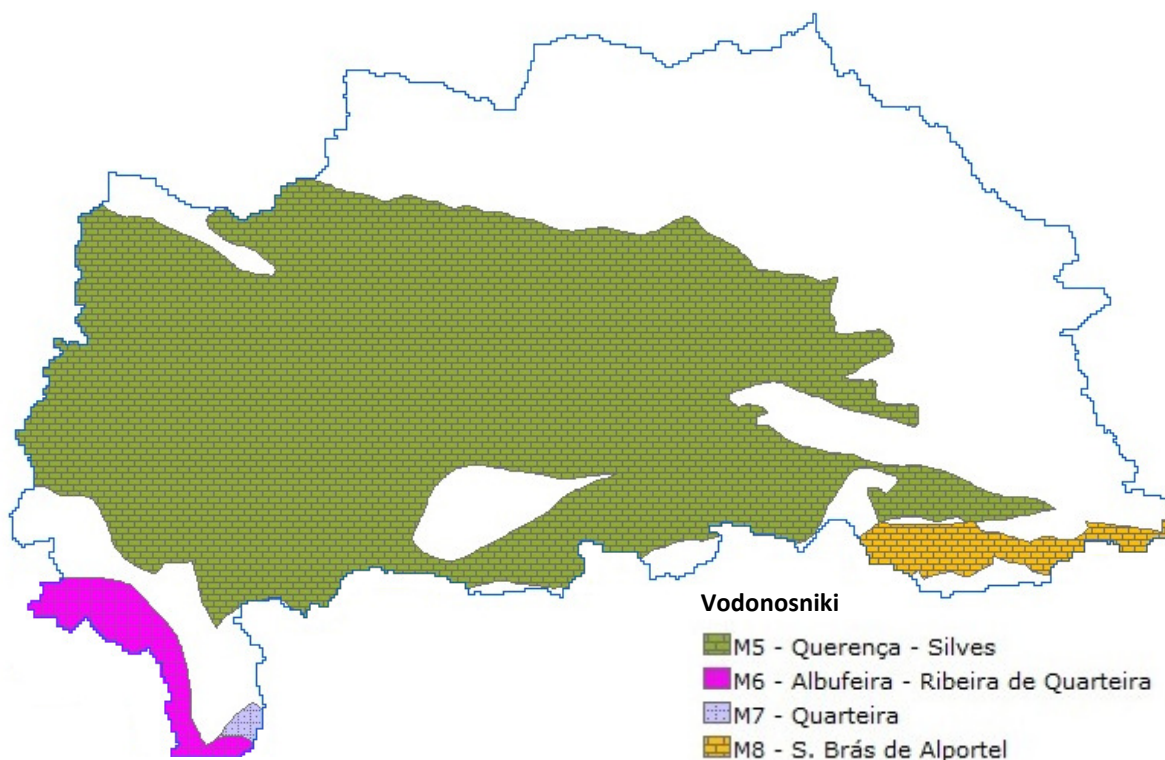
Hidrološka klasifikacija tal je odvisna od njihove teksture in infiltracijske sposobnosti (poglavje 2.2.1.1, preglednica 1). Na obravnavanem območju prevladujejo teksturno težka tla z razmeroma visoko vsebnostjo gline. Takšna tla uvrščamo v hidrološko skupino D (slika 25).



Slika 25: Hidrološka klasifikacija tal v porečju reke Quarteire (prirejeno po Agência Portuguesa do Ambiente, 2013b).

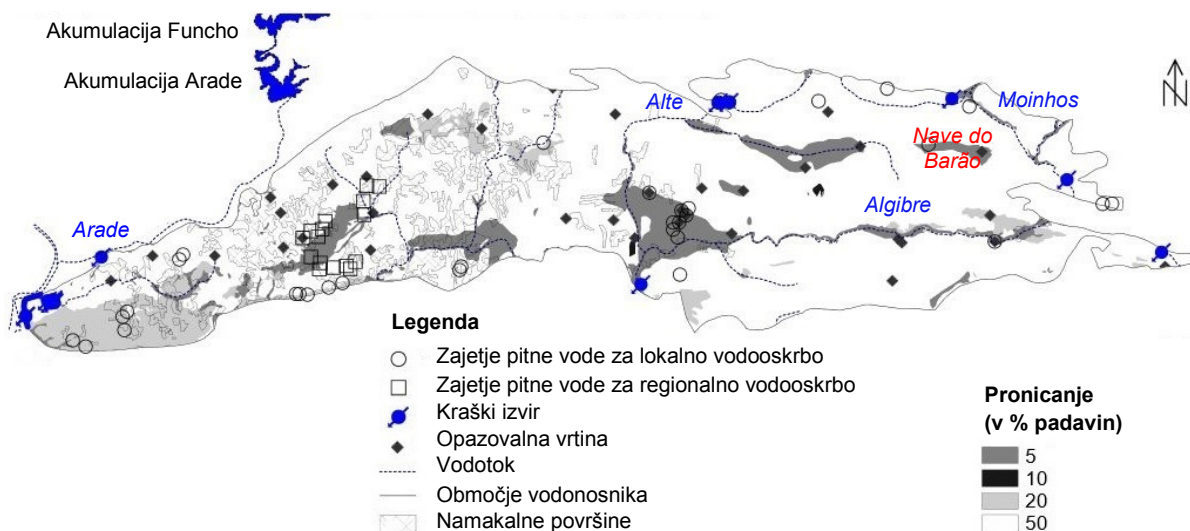
Figure 25: Hydrologic soil classification within the Quarteira river catchment (adapted from Agência Portuguesa do Ambiente, 2013b).

Iz hidrogeološke karte (slika 26) je razvidno, da se porečje reke Quarteire nahaja na območju štirih ločenih vodonosnikov. Med njimi je s 318 km² največji in najbolj produktiven kraški vodonosnik Querença-Silves, ki se razteza med naseljem Querença (na vzhodu) in reko Arade (na zahodu).



Slika 26: Hidrogeološka karta porečja reke Quarteire (prirejeno po Agência Portuguesa do Ambiente, 2013b).

Figure 26: Hydrogeological map of the Quarteira river catchment (adapted from Agência Portuguesa do Ambiente, 2013b).



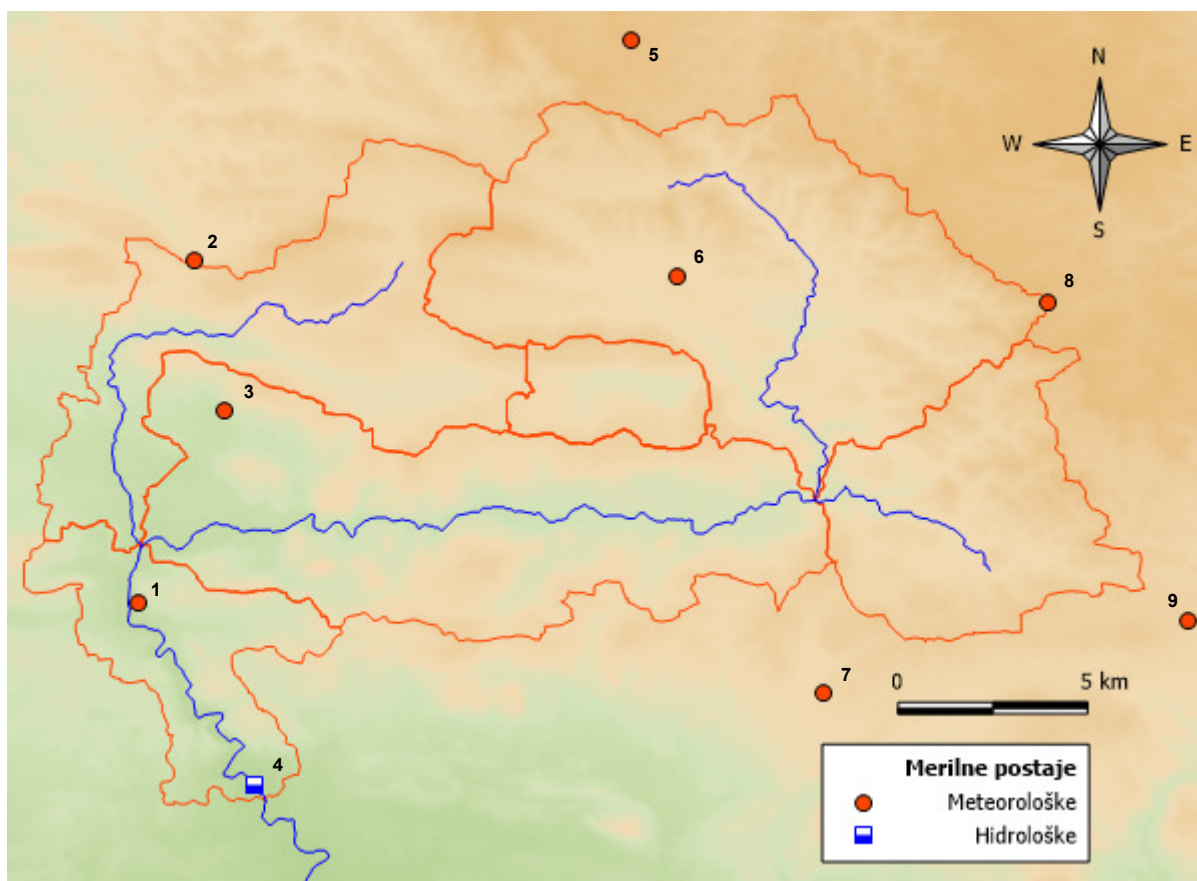
Slika 27: Prikaz ocenjenega pronicanja na območju vodonosnika Querença-Silves (v odstotkih padavin) ter lokacij črpaljšč za javno vodooskrbo, kraških izvirov, opazovalnih vrtin in namakalnih površin (povzeto po Stigter in sod., 2009).

Figure 27: Spatial distribution of recharge within the Querença-Silves aquifer (expressed as percentage of precipitation), together with the locations of public supply wells, springs, observation wells and irrigated areas (adapted from Stigter et al., 2009).

Vodonosnik Querença-Silves napajajo padavine, ki skozi porozno matično kamnino odtekajo neposredno v podzemlje (avtogeno napajanje), in vodotoki, ki pritekajo z nekraškega obrobja (alogeno napajanje). Vodotoki na stiku s krasom ponikajo in se zopet pojavijo na površju v obliki kraških izvirov (slika 27). Ocenjena letna količina avtogenega in alogenega napajanja vodonosnika Querença-Silves znaša $93,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ oz. 294 mm (Stigter in sod., 2009).

5.1.4 Hidrometeorološki podatki

Za modeliranje smo uporabili podatke z več meteoroloških in ene hidrološke postaje. Lokacije izbranih postaj so prikazane na sliki 28. Večina postaj pripada mreži hidrometeoroloških postaj, s katero upravlja portugalska Agencija za okolje (Agência Portuguesa do Ambiente), medtem ko je meteorološka postaja Alte v pristojnosti Regionalnega direktorata za kmetijstvo in ribištvo Algarve (Direcção Regional de Agricultura e Pescas do Algarve oz. DRAP Algarve). V preglednici 19 so poleg imen postaj podane tudi nadmorske višine in koordinate lokacij posameznih merilnih mest.



Slika 28: Lokacije vseh hidrometeoroloških postaj na območju pokrajine Algarve (Portugalska). Meje podporečij reke Quarteire so označene z rdečimi linijami.

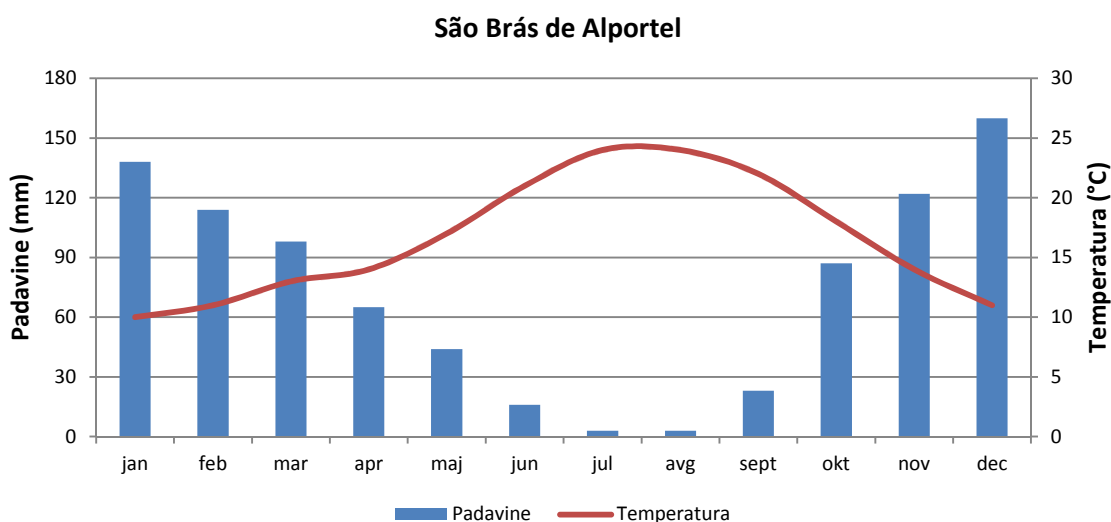
Figure 28: Hydrometeorological stations located within the Algarve region (Portugal). Red lines represent the boundaries of the Quarteira river subcatchments.

Preglednica 19: Opis obravnavanih hidrometeoroloških postaj na območju pokrajine Algarve (Portugalska).

Table 19: Description of the selected hydrometeorological stations within the Algarve region (Portugal).

Oznaka	Ime postaje	Nadmorska višina (m)	Zemljepisna širina (°N)	Zemljepisna dolžina (°W)
1	Paderne	55	37,1656	8,2075
2	Santa Margarida	246	37,2470	8,1910
3	Alte	79	37,2113	8,1817
4	Ponte Rodoviária	23	37,1222	8,1730
5	Sobreira	450	37,2998	8,0609
6	Salir	205	37,2436	8,0474
7	Loulé	212	37,1443	8,0039
8	Barranco do Velho	467	37,2372	7,9371
9	São Brás de Alportel	334	37,1611	7,8954

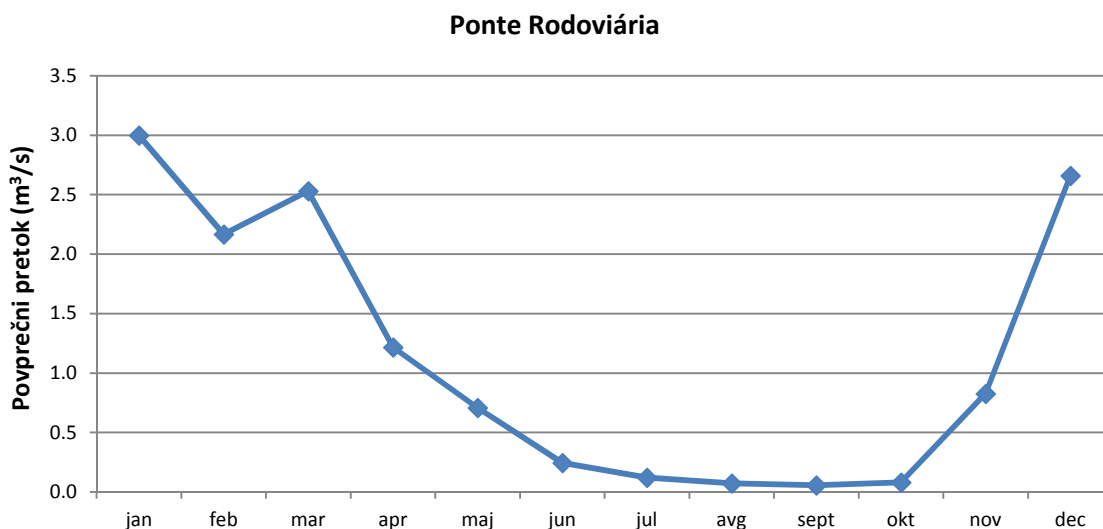
Pokrajina Algarve ima sredozemsko podnebje, čeprav ne leži neposredno ob obali Sredozemskega morja. Za tovrsten tip podnebja so značilna topla poletja in mile zime. Padavinski dogodki se običajno pojavljajo v zimskem obdobju, med oktobrom in marcem, medtem ko so poletni meseci med aprilom in septembrom večinoma suhi. Na sliki 29 je prikazano dolgoletno mesečno povprečje padavin in temperatur za postajo São Brás de Alportel, ki leži na nadmorski višini 334 m. Povprečne mesečne temperature, izmerjene na postaji, se gibljejo med 10 in 24°C, povprečna letna količina padavin pa znaša 873 mm.



Slika 29: Meteorološka postaja São Brás de Alportel (Portugalska) – povprečne mesečne padavine (mm) in temperature (°C) za obdobje 1940–1998.

Figure 29: Meteorological station São Brás de Alportel (Portugal) – average monthly rainfall (mm) and temperatures (°C) for the period 1940–1998.

Na iztoku iz porečja reke Quarteire se nahaja hidrološka postaja Ponte Rodoviária, ki leži na nadmorski višini 23 m. Povprečni mesečni pretoki, izmerjeni na postaji, se gibljejo med 0,06 m³/s (v poletnih mesecih) in 3 m³/s (v zimskih mesecih) – glej sliko 30.



Slika 30: Hidrološka postaja Ponte Rodoviária (Portugalska) – povprečni mesečni pretoki (m³/s) na iztoku iz porečja reke Quarteire, za obdobje 1991–2011.

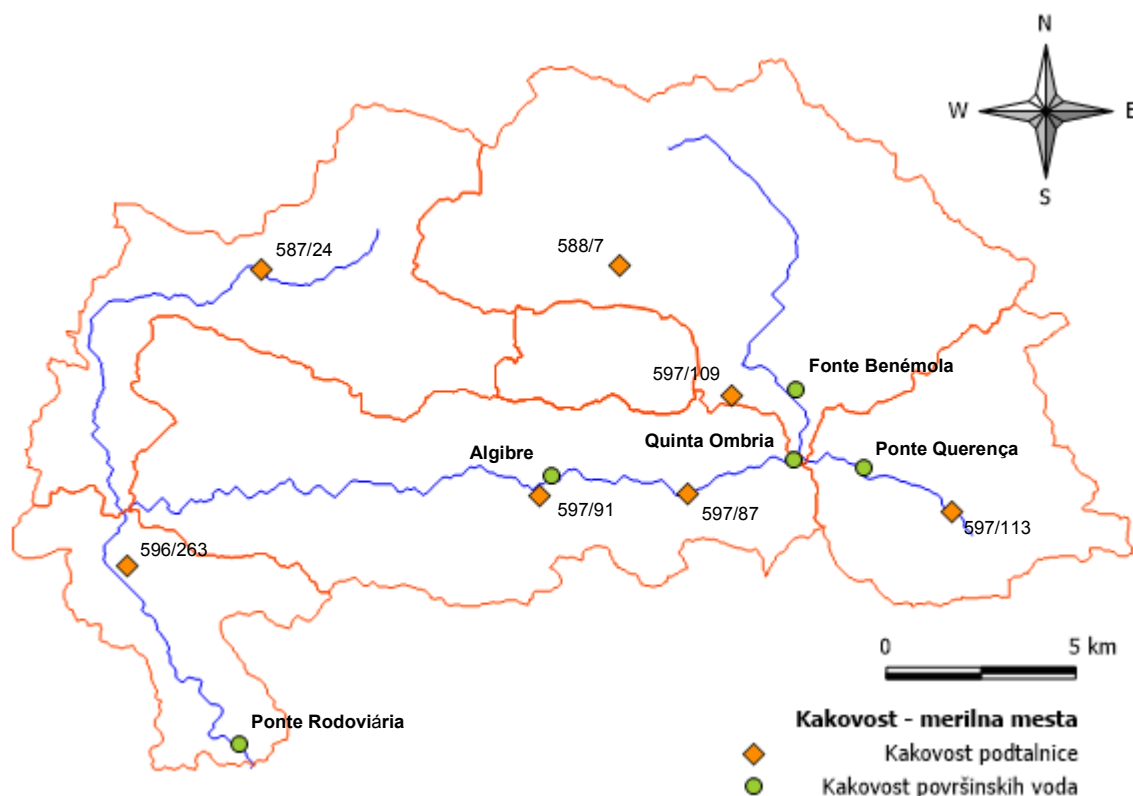
Figure 30: Hydrological station Ponte Rodoviária (Portugal) – mean monthly discharges (m³/s) at the outlet of the Quarteira river catchment for the period 1991–2011.

Hidrometeorološki podatki, izmerjeni na izbranih merilnih postajah (slika 28, preglednica 19), so prosto dostopni preko spletnega pregledovalnika SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, <http://snirh.pt>) oz. preko spletne strani DRAP Algarve (<http://www.drapalg.min-agricultura.pt/>).

5.1.5 Kakovost

Meritve kakovosti površinskih in podzemnih voda na izbranem območju izvaja portugalska Agencija za okolje. Monitoring kakovosti površinskih voda se izvaja enkrat mesečno, monitoring kakovosti podzemnih voda pa le dvakrat do trikrat letno. V površinskih vodah spremljajo naslednje fizikalno-kemijske parametre kakovosti: temperaturo, električno prevodnost, pH, vsebnost kisika ter koncentracijo hranil (celotnega dušika in fosforja, amonija, nitrita, nitrata in ortofosfata). V podtalnici merijo poleg osnovnih fizikalno-kemijskih parametrov še dodatne anorganske in mikrobiološke parametre. Na sliki 31 so prikazane lokacije merilnih mest v porečju reke Quarteire.

Podatki o kakovosti površinskih in podzemnih voda, izmerjeni na izbranih merilnih mestih, so prosto dostopni preko spletnega pregledovalnika SNIRH (<http://snirh.pt>).



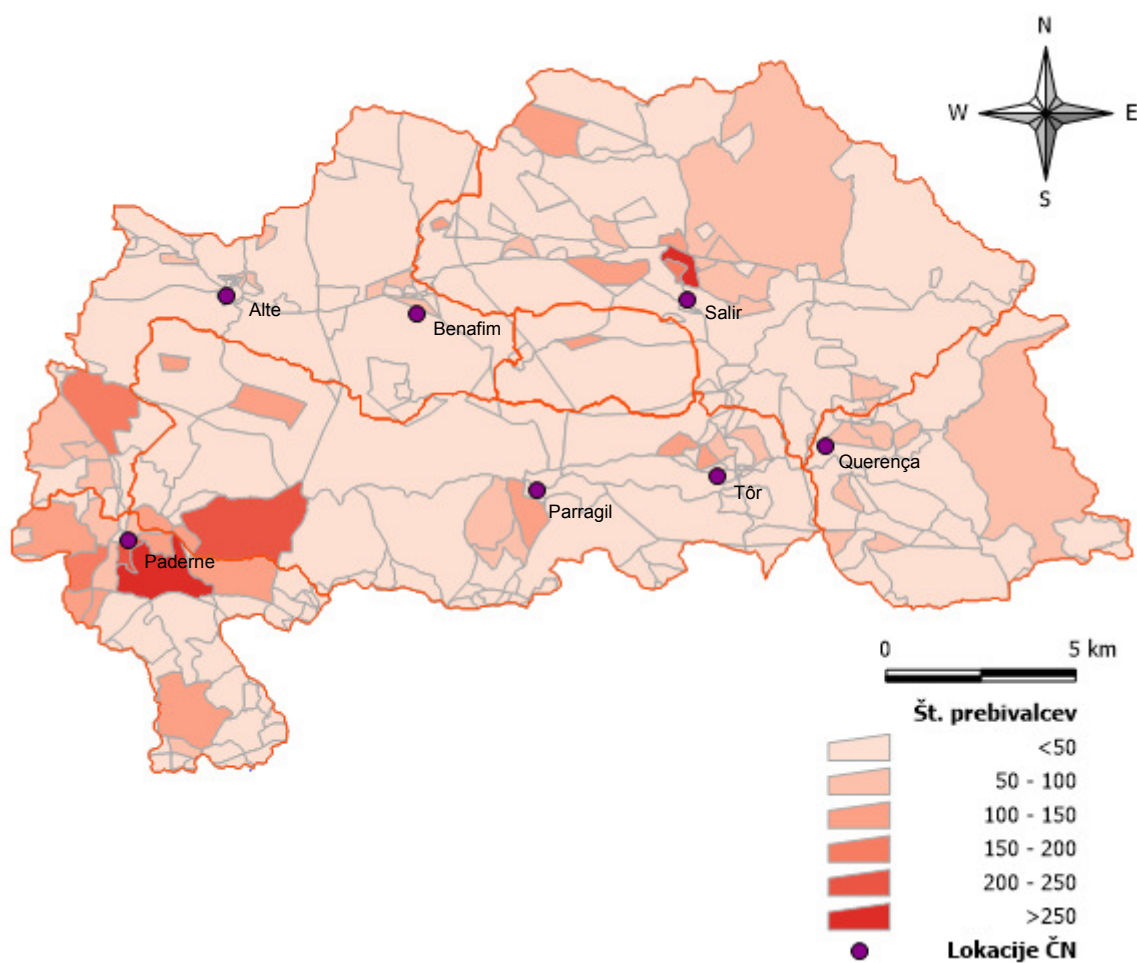
Slika 31: Merilna mesta za določanje kakovosti površinskih in podzemnih voda v porečju reke Quarteira.

Figure 31: Surface water and groundwater quality monitoring stations located within the Quarteira river catchment.

5.1.6 Statistični podatki

Za potrebe določitve priključenosti prebivalcev na čistilne naprave (ČN) oz. greznice smo s strani Komisije za regionalni razvoj in koordinacijo Algarve (CCDR Algarve) pridobili karte statističnih enot, lokacij ČN in pokritosti s kanalizacijskim omrežjem. S prekrivanjem prve tematske karte, ki podaja gostoto poselitve po posameznih statističnih enotah, in karte podporečij, smo določili število prebivalcev po posameznih podporečjih. Iz druge tematske karte smo razbrali lokacije ČN, s prekrivanjem karte statističnih enot in karte pokritosti s kanalizacijskim omrežjem pa smo določili število prebivalcev, priključenih na posamezno ČN. Za vsako podporečje smo predpostavili, da imajo prebivalci, ki niso priključeni na ČN, lastne greznice.

Na sliki 32 je prikazana poselitev obravnavanega območja. Označene so tudi lokacije ČN. Podatki o številu prebivalcev po posameznih podporečjih in o priključenosti na ČN oz. greznice so podani v preglednici 20. Osnovni podatki o izbranih ČN so predstavljeni v preglednici 21.



Slika 32: Poseljenost porečja reke Quarteire po posameznih statističnih enotah, z lokacijami čistilnih naprav.

Figure 32: Population densities within the Quarteira river catchment (per statistical units), together with the wastewater treatment plant locations.

Preglednica 20: Število prebivalcev, priključenih na čistilne naprave oz. greznice (po posameznih podporečjih porečja reke Quarteire).

Table 20: Number of inhabitants connected to wastewater treatment plants or septic tanks (per each subcatchment of the Quarteira river catchment).

	Podporečje					Nave do Barão
	1	2	3	4	5	
število prebivalcev	2.534	927	2.414	2.017	2.205	209
število prebivalcev, priključenih na čistilne naprave	847	17	553	797	693	0
število prebivalcev, priključenih na greznice	1.687	910	1.861	1.220	1.512	209

Preglednica 21: Podatki o čistilnih napravah, ki se nahajajo v porečju reke Quarteire.

Table 21: Information about the wastewater treatment plants located within the Quarteira river catchment.

	Salir	Querença	Tôr	Parragil	Benafim	Alte	Paderne
Začetek obratovanja	1996	2002	1994	2010	2002	1994	1981
Kapaciteta (PE)	1.500	1.000	800	1.160	1.000	1.000	2.500
Pretok (m³/dan)	300	200	160	186	200	200	500
Stopnja čiščenja	2.	3.	2.	3.	3.	2.	3.
Prispevno podporečje	1	2	3	3	4	4	5
Iztok	Moinhos	Mercês	Algibre	Algibre	Vala Grande	Alte	Paderne

PE: populacijski ekvivalent

5.1.7 Odvzemi vode

Porečje reke Quarteire leži nad vzhodnim delom vodonosnika Querença-Silves (slika 27). Vodo iz omenjenega vodonosnika črpajo predvsem za potrebe namakanja kmetijskih površin, pri čemer je namakalnih površin v porečju reke Quarteire, v primerjavi s celotnim prispevnim območjem vodonosnika Querença-Silves, razmeroma malo (še največ v okolici naselja Paderne). Čeprav je na območju vodonosnika evidentiranih več črpališč pitne vode (slika 27), ta le malo prispevajo k javni vodooskrbi. Javni vodovodni sistem na območju pokrajine Algarve namreč temelji na odvzemu površinskih voda iz akumulacij Arade, Funcho, Bravura, Odeleite in Beliche, ki ležijo izven opazovanega območja. Po podatkih iz leta 2002 zagotavljajo omenjene akumulacije več kot 80 % vode, namenjene javni vodooskrbi (Stigter in sod., 2009).

Glede na to, da se voda, načrpana na območju porečja reke Quarteire, uporablja za potrebe lokalnega namakanja in vodooskrbe, tovrstni odvzemi ne vplivajo na vodno bilanco porečja. Pomemben vpliv bi lahko imeli le nepovratni odvzemi za namen namakanja in javne vodooskrbe izven meja porečja ter neposredni odvzemi iz vodotokov, ki pa jih na območju reke Quarteire ni. Iz omenjenega razloga evidentiranih odvzemov vode v modelu nismo upoštevali.

5.2 Modeliranje hidroloških procesov

Za potrebe modeliranja hidroloških procesov na porečju reke Quarteire smo izbrali dve obdobji meritev: 1) med letoma 2000 in 2004, ter 2) med letoma 2009 in 2010. Prvo obdobje meritev smo uporabili za umerjanje parametrov in iskanje najboljše strukture hidrološkega modela, drugo pa za validacijo izbranega modela.

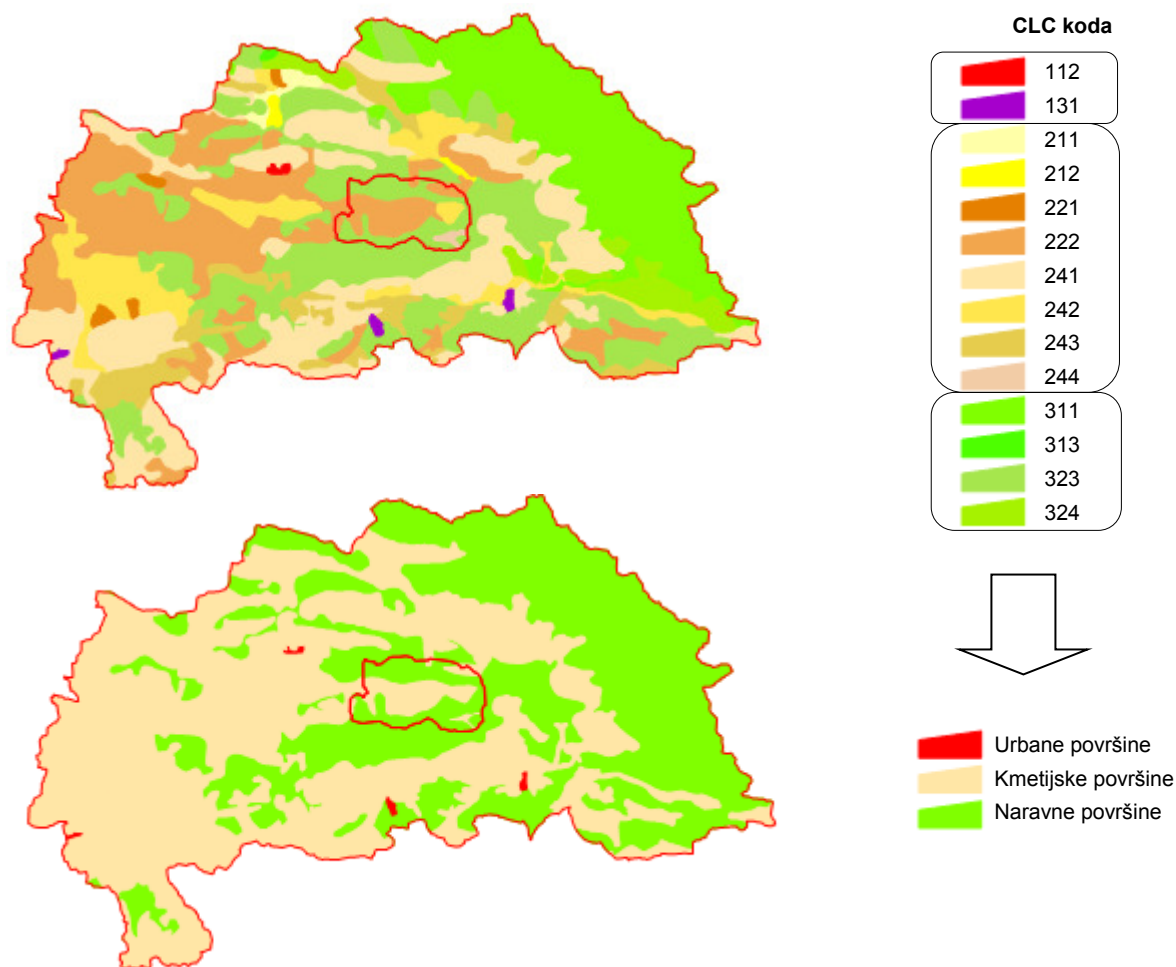
5.2.1 Priprava konceptualnega modela in določitev vrednosti uporabljenih konstant

Za potrebe hidrološkega modeliranja z orodjem ProBMoT smo najprej pripravili konceptualni opis opazovanega porečja oz. konceptualni model (priloga D). Glede na to, da smo razpolagali z meritvami pretokov na eni sami merilni postaji na iztoku iz porečja reke Quarteire (tj. Ponte Rodoviária), smo se odločili, da bomo porečje obravnavali kot celoto in ga ne bomo delili na posamezna podporečja. Kot samostojno enoto smo obravnavali le depresijo Nave do Barão. Površinski odtok z območja omenjene depresije sicer ne prispeva k pretoku reke Quarteire, prispeva pa bazni odtok, ki se generira na območju depresije.

Posamezne komponente obravnavanega sistema smo zapisali v datoteko s končnico `pbm`, v obliki razdelkov, entitet in procesov. Na najvišji ravni smo definirali celotno porečje reke Quarteire in ga opisali z razdelkom `watershed`. Omenjeni razdelek smo razdelili na dva podrazdelka, pri čemer predstavljata razdelek `sub1` porečje reke Quarteire brez depresije Nave do Barão, razdelek `sub2` pa območje že omenjene depresije. Oba razdelka (`sub1` in `sub2`) smo nadalje razdelili na posamezne podrazdelke, ki sovpadajo z različnimi hidrološkimi odzivnimi enotami oz. rabami zemljišč. Odločili smo se, da bomo obravnavali tri različne hidrološke odzivne enote: a) urbane površine (`urban`), b) kmetijske površine (`rural`) in c) naravne površine (`natural`). Omenjene enote smo oblikovali s pomočjo karte rabe zemljišč, na osnovi prve ravni razvrščanja rab po sistemu CLC (slika 33). Na ta način smo oblikovali pet ločenih podrazdelkov: `sub1.urban`, `sub1.rural`, `sub1.natural`, `sub2.rural` in `sub2.natural`. Vsi uporabljeni (pod)razdelki predstavljajo primerke predloge `SpatialUnit`, ki smo jo predhodno definirali v domenski knjižnici (priloga B).

V vsakem izmed obravnavanih podrazdelkov smo definirali vse hidrološke procese, predstavljene v poglavju 2.2.1, ter vse sodelujoče entitete, z njihovimi odvisnimi in neodvisnimi spremenljivkami. V razdelkih `sub1` in `sub2` smo upoštevali entitete in procese, namenjene izračunu skupne količine vode in pretokov na nivoju posameznega podporečja. Na podoben način smo v razdelku `watershed` definirali entitete in procese, namenjene izračunu skupne količine vode in pretoka na nivoju celotnega porečja.

Podati smo morali tudi natančne vrednosti parametrov oz. konstant, ki nastopajo v izbranih entitetah in procesih. V preglednici 22 so prikazane uporabljene vrednosti konstant po posameznih podrazdelkih. Pri konstantah, ki smo jih umerjali, so podani razponi pričakovanih vrednosti. Ti so bodisi enaki razponom, definiranim v domenski knjižnici (glej prilogo C), ali pa so še bolj omejeni. Iz preglednice je razvidno, da smo skupno umerjali 30 konstant oz. parametrov.



Slika 33: Oblikovanje hidroloških odzivnih enot na območju reke Quarteire, na osnovi združevanja različnih tipov rabe zemljišč.

Figure 33: Formation of hydrological response units within the Quarteira river catchment based on the aggregation of different land use types.

Preglednica 22: Uporabljene vrednosti oz. razponi vrednosti konstant po posameznih podrazdelkih.

Table 22: Values/ranges of constants that were used in specific subcompartments.

Konstanta	Podrazdelki					Enota
	sub1. urban	sub1. rural	sub1. natural	sub2. rural	sub2. natural	
area	10	16.218	13.887	577	675	ha
imp	0,8	0	0	0	0	-
factor	1	1	1	0	0	-
cn	87–96	71–78	64–78	72–88	69–77	-
k	1–3	1–3	1–3	1–3	1–3	-
coverCoeff	0–0,6	0,7–1,1	0,7–1,1	0,7–1,1	0,7–1,1	-
soilWaterCapacity	140–190	140–190	140–190	140–190	140–190	mm
rc	0,1–0,3	0,1–0,3	0,1–0,3	0,1–0,3	0,1–0,3	-
sc	0–0,08	0–0,08	0–0,08	0–0,08	0–0,08	-

Vrednosti konstant $area$ (površina, v ha) in imp (delež neprepustnih površin) smo določili s pomočjo modificirane karte rabe zemljišč (slika 33, spodaj), pri čemer smo konstanto imp upoštevali samo pri razdelku $sub1.urban$ s prevladujočo urbano rabo. Konstanta $factor$ predstavlja prispevek površinskega odtoka k pretoku v odvodniku. Ker površinski odtok z območja depresije Nave do Barão ne prispeva k pretoku reke Quarteire, smo pri razdelkih $sub2.rural$ in $sub2.natural$ upoštevali vrednost konstante 0. Vrednosti ostalih konstant smo umerjali.

Mejne vrednosti konstante cn (parameter CN) smo določili na osnovi karte rabe zemljišč, pedološke karte in preglednic 1–4. Razpon vrednosti konstante k , ki predstavlja skupno višino padavin, zapadlih v preteklih petih dneh, pri kateri CN doseže vrednost $(CN_1 + CN_3)/2$, smo določili na podlagi primerjave dinamičnih vrednosti CN, izračunanih po metodi Haith (poglavje 2.2.1.1, slika 2) in predhodne vlažnosti tal.

Za oceno mejnih vrednosti konstante $coverCoeff$ (parameter CV) smo uporabili preglednico 5. Razpone vrednosti konstante $soilWaterCapacity$, ki predstavlja količino rastlinam dostopne vode (v mm), smo določili na podlagi kart, dostopnih preko spletne strani Skupnega raziskovalnega centra Evropske komisije (<http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/>). Slednje podajajo informacijo o povprečnem volumskem deležu rastlinam dostopne vode (parameter AWF, v mm vode/m tal), ki ga je potrebno pomnožiti s povprečno globino glavne mase koreninskega sistema (predpostavljena vrednost 1 m).

Glede na to, da se izbrano testno porečje nahaja na kraških tleh, lahko pričakujemo počasen odziv baznega odtoka na spremembe v polnjenju plitve nasičene plasti tal. Iz omenjenega razloga smo za parameter rc (recesijska konstanta) izbrali razpon vrednosti med 0,1 in 0,3. Ker za umerjanje parametra sc (konstanta ponikanja) nismo našli posebnih priporočil, smo za omenjeno konstanto izbrali razpon vrednosti med 0 in 0,08.

5.2.2 Priprava datotek z vhodnimi podatki

Neodvisne spremenljivke, ki smo jih obravnavali v posameznem podrazdelku konceptualnega modela, so predstavljene v preglednici 23. Ker smo razdelek $watershed$, ki opisuje izbrano porečje, razdelili na 5 podrazdelkov, in ker smo v vsakem izmed njih obravnavali 8 neodvisnih spremenljivk, je bilo skupno število obravnavanih neodvisnih spremenljivk enako 40.

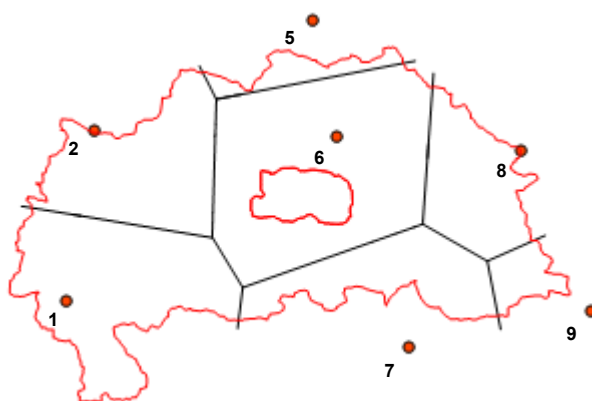
Za vsako izmed neodvisnih spremenljivk smo v datoteki z vhodnimi podatki (končnica data) podali časovni niz merjenih oz. predhodno izračunanih vrednosti. Ker smo obravnavali dve različni časovni obdobji, smo pripravili dve ločeni podatkovni datoteki, prvo za obdobje med letoma 2000 in 2004, drugo pa za obdobje med letoma 2009 in 2010.

Preglednica 23: Seznam neodvisnih spremenljivk, ki smo jih obravnavali v posameznem podrazdelku konceptualnega modela, namenjenega opisu hidrološkega stanja v porečju reke Quarteire.

Table 23: List of all the exogenous variables that we took into account in a single subcompartment of the conceptual model used to describe the Quarteira river catchment hydrology.

Entiteta	Spremenljivka	Opis	Enota
prec	amountOfWater	višina padavin	mm/dan
ant	amountOfWater	vsota padavin, zapadlih v preteklih petih dneh	mm/dan
weather	temperature	povprečna dnevna temperatura	°C
	maxTemperature	maksimalna dnevna temperatura	°C
	minTemperature	minimalna dnevna temperatura	°C
	radiation	jakost sončnega obsevanja	MJ/(m ² ·dan)
	daylightHours	število sončnih ur v dnevno	h/dan
	satVapPressure	nasičen parni tlak	mbar

Osnovni problem pri ocenjevanju padavin, zapadlih na izbranem območju, izhaja iz dejstva, da so padavinski podatki zajeti točkovno, na lokacijah posameznih merilnih postaj. Za določitev vpliva posamezne merilne postaje na količino padavin znotraj obravnavanega območja uporabljamo t. i. utežne faktorje (Brilly in Šraj, 2005). V našem primeru smo za oceno vrednosti utežnih faktorjev uporabili metodo Thiessenovih poligonov (Shaw, 1994). Pri omenjeni metodi obravnavano območje razdelimo na poligone, ki pripadajo posameznemu merilnemu mestu (slika 34). Poligoni so omejeni z ravnimi linijami, ki so enako oddaljene od dveh sosednjih merilnih mest. Utežni faktor predstavlja delež površine obravnavanega območja, ki leži znotraj izbranega poligona. Utežne faktorje pomnožimo s padavinami, izmerjenimi na posamezni merilni postaji. Vsota na ta način izračunanih vrednosti predstavlja padavine, zapadle na izbranem območju.



Slika 34: Oblikovanje Thiessenovih poligonov na območju reke Quarteire, za obdobje umerjanja (2000–2004). Uporabljene oznake meteoroloških postaj se navezujejo na preglednico 19.

Figure 34: Quarteira river catchment delineation by using Thiessen polygons, for the period 2000–2004. The numbers used to annotate the meteorological stations are explained in Table 19.

Ker smo imeli za obdobje med letoma 2000 in 2004 na razpolago meritve padavin s sedmih meteoroloških postaj, za obdobje med letoma 2009 in 2010 pa podatke z ene same postaje (Alte, glej

sliko 28 oz. preglednico 19), smo Thiessenove poligone oblikovali samo za obdobje umerjanja (slika 34), medtem ko smo za validacijsko obdobje v celotnem porečju reke Quarteire upoštevali padavine, izmerjene na postaji Alte.

V preglednici 24 je za vsako izmed obeh obravnavanih obdobj podan seznam meteoroloških postaj, ki smo jih uporabili za določitev vrednosti meteoroloških spremenljivk po posameznih podrazdelkih. Dnevne vrednosti meteoroloških spremenljivk smo pridobili preko spletnega pregledovalnika SNIRH (<http://snirh.pt>) in spletne strani DRAP Algarve (<http://www.drapalg.min-agricultura.pt/>).

Preglednica 24: Seznam meteoroloških postaj, ki smo jih uporabili za določitev vrednosti meteoroloških spremenljivk v posameznih podrazdelkih.

Table 24: List of meteorological stations that were used for the determination of meteorological variables in each subcompartment.

Meteorološka spremenljivka	Podrazdelki				
	sub1.urban	sub1.rural	sub1.natural	sub2.rural	sub2.natural
2000–2004					
padavine	TP	TP	TP	6	6
temperature	9	9	9	9	9
jakost sončnega sevanja	9	9	9	9	9
2009–2010					
padavine	3	3	3	3	3
temperature	9	9	9	9	9
jakost sončnega sevanja	9	9	9	9	9

TP: Thiessenovi poligoni (slika 34), 3: Alte, 6: Salir, 9: São Brás de Alportel

Za obe obravnavani obdobji smo število sončnih ur v posameznem dnevu prilagodili povprečnim vrednostim, objavljenim na spletni strani <http://www.algarve.climatemps.com/>, vrednosti nasičenega parnega tlaka pa smo izračunali s pomočjo enačbe (9) (glej poglavje 2.2.1.2).

Glede na to, da uporaba različnih padavinskih postaj v obeh obravnavanih časovnih obdobjih vzbuja dvom v primerljivost dobljenih rezultatov, smo poiskali leto (natančneje leto 2006), v katerem imamo na razpolago meritve padavin z vseh osmih meteoroloških postaj, predstavljenih na sliki 28. Primerjava padavin, izračunanih s pomočjo Thiessenovih poligonov (775 mm), in padavin, izmerjenih na postaji Alte (809 mm), pokaže, da so slednje na letnem nivoju višje za 4,39 %. Na podlagi izračunane vrednosti koeficienta korelacije (0,88) lahko sklepamo na visoko linearno povezanost med obema nizoma padavin. Primerjava padavin, izmerjenih na postajah Salir (804 mm) in Alte (809 mm), ki smo ju uporabili za določitev padavin na območju depresije Nave do Barão (v podrazdelkih sub2.rural in sub2.natural), kaže na skoraj popolno ujemanje merjenih padavin na letnem nivoju. Visok je tudi izračunan koeficient korelacije med obema nizoma padavin (0,87). Omenjena analiza nam pove, da je bilo v letu 2006 odstopanje med padavinami, izračunanimi s pomočjo

Thiessenovih poligonov (slika 34), in padavinami, izmerjenimi na postaji Alte, minimalno. Za potrebe naše študije smo predpostavili, da se tovrstno razmerje ohrani tudi v obdobju med letoma 2009–2010.

V vsako izmed obeh podatkovnih datotek smo poleg dnevni vrednosti vseh neodvisnih spremenljivk vnesli še vrednosti odvisne spremenljivke `watershed.totalF.rate` (pretok na nivoju celotnega porečja), na podlagi katere smo umerjali parametre hidrološkega modela. V ta namen smo preko spletnega pregledovalnika SNIRH (<http://snirh.pt>) pridobili vrednosti povprečnih dnevnih pretokov, izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária.

5.2.3 Iskanje najboljše strukture hidrološkega modela (obdobje 2000–2004)

Za potrebe iskanja najboljše strukture hidrološkega modela smo uporabili podatkovno datoteko s podatki za obdobje med letoma 2000 in 2004. V datoteki z nastavitvami (končnica xml) smo izbrali ukaz `exhaustive_search`, namenjen iskanju vseh možnih struktur modela in umerjanju parametrov generiranih modelov.

Na podlagi knjižnice (priloga B) in konceptualnega modela (priloga D) je ProBMoT algoritem za izbrano porečje generiral 32 različnih hidroloških modelov. Ti so se med seboj razlikovali v matematičnem izrazu, uporabljenem za izračun referenčne evapotranspiracije (ET_0). V vsakem posameznem podrazdelku je lahko ProBMoT za izračun ET_0 uporabil Hamonovo ali Hargreavesovo enačbo (poglavje 2.2.1.2, enačbi (8) in (10)).

Generiranje 32 različnih struktur modela s sočasn timer umerjanjem 30 parametrov, pri čemer je bilo za umerjanje vsakega posameznega parametra izvedenih 1.000 računskih iteracij (skupno 960.000), je trajalo približno 63 ur. V ta namen smo uporabili osebni računalnik s procesorjem i7 2600K, frekvenco 3,40 GHz in delovnim pomnilnikom 8 GB.

Kot rezultat smo dobili niz generiranih struktur modela z umerjenimi parametri, pri čemer je bila vsaki strukturi pripisana izračunana vrednost korena srednje kvadratne napake (RMSE). Rangiranje modelov na osnovi vrednosti RMSE je prikazano v preglednici 25. Kot je razvidno iz omenjene preglednice, se izračunane vrednosti RMSE gibljejo med 3,275 (model 29) in 3,964 (model 2). Ob pregledu generiranih struktur hidroloških modelov lahko ugotovimo, da se model, ki v vseh podrazdelkih za izračun ET_0 uporablja Hamonovo enačbo (model 1), nahaja na 15. mestu, medtem ko se model, ki v vseh podrazdelkih uporablja Hargreavesovo enačbo (model 32), nahaja šele na 28. mestu. Iz omenjenega bi lahko sklepali, da uporaba enotne matematične formulacije za opis izbranega procesa, kot jo ponujajo že uveljavljena orodja za modeliranje porečij, ni nujno najbolj optimalna.

Preglednica 25: Prikaz rangiranja hidroloških modelov na osnovi generirane vrednosti RMSE, vrednosti izbranih statističnih kriterijev ter izrazov, uporabljenih za izračun referenčne evapotranspiracije po posameznih podrazdelkih.

Table 25: Ranking of hydrological models based on the generated RMSE values, together with the values of the selected statistical indicators and the formulations used for the calculation of reference evapotranspiration in each subcompartment.

	Model	RMSE	Statistični kriteriji				Podrazdelki				
			r	NS	PBIAS	RSR	sub1. urban	sub1. rural	sub1. natural	sub2. rural	sub2. natural
1	29	3,275	0,756	0,487	6,63	0,716	A	A	B	B	B
2	30	3,282	0,758	0,446	3,36	0,744	B	A	B	B	B
3	21	3,287	0,758	0,444	1,79	0,746	A	A	B	A	B
4	5	3,292	0,756	0,442	5,84	0,747	A	A	B	A	A
5	11	3,308	0,752	0,437	8,64	0,750	A	B	A	B	A
6	20	3,321	0,753	0,433	10,97	0,753	B	B	A	A	B
7	19	3,327	0,760	0,430	6,73	0,755	A	B	A	A	B
8	28	3,335	0,749	0,428	10,92	0,756	B	B	A	B	B
9	14	3,339	0,754	0,426	7,22	0,758	B	A	B	B	A
10	3	3,340	0,758	0,426	1,20	0,758	A	B	A	A	A
11	13	3,353	0,752	0,422	8,81	0,761	A	A	B	B	A
12	27	3,367	0,746	0,417	16,62	0,764	A	B	A	B	B
13	12	3,393	0,758	0,408	3,90	0,770	B	B	A	B	A
14	4	3,446	0,757	0,389	-2,43	0,782	B	B	A	A	A
15	1	3,503	0,774	0,369	-20,38	0,795	A	A	A	A	A
16	7	3,522	0,689	0,362	51,42	0,799	A	B	B	A	A
17	8	3,523	0,688	0,361	50,37	0,799	B	B	B	A	A
18	17	3,552	0,701	0,351	16,32	0,806	A	A	A	A	B
19	10	3,554	0,768	0,350	-13,96	0,806	B	A	A	B	A
20	22	3,557	0,758	0,349	-1,25	0,807	B	A	B	A	B
21	9	3,561	0,701	0,347	14,22	0,808	A	A	A	B	A
22	23	3,564	0,691	0,346	51,81	0,808	A	B	B	A	B
23	15	3,566	0,698	0,346	51,34	0,809	A	B	B	B	A
24	24	3,572	0,690	0,344	53,11	0,810	B	B	B	A	B
25	16	3,581	0,682	0,340	53,00	0,812	B	B	B	B	A
26	26	3,602	0,774	0,332	-15,73	0,817	B	A	A	B	B
27	31	3,610	0,675	0,329	57,65	0,819	A	B	B	B	B
28	32	3,620	0,681	0,326	55,79	0,821	B	B	B	B	B
29	25	3,635	0,769	0,320	-25,59	0,825	A	A	A	B	B
30	18	3,646	0,772	0,316	-23,55	0,827	B	A	A	A	B
31	6	3,812	0,692	0,252	43,25	0,865	B	A	B	A	A
32	2	3,964	0,590	0,191	71,42	0,899	B	A	A	A	A

A: Hamon, B: Hargreaves

Če se osredotočimo na prve tri najvišje rangirane modele (29, 30 in 21), ugotovimo, da v podrazdelkih z naravnim pokrovom (sub1.natural in sub2.natural) vsi trije modeli uporabljajo Hargreavesovo enačbo, ki v primerjavi s Hamonovo enačbo daje višje vrednosti ET_0 . Da rezultati Hamonove enačbe kažejo tendenco k podcenjevanju vrednosti ET_0 z naravnih (gozdnih) površin, je ugotovil že Rao s sodelavci (2011), zato je izbira Hargreavesove enačbe s strani ProBMoT-a logična.

Glede na to, da je RMSE napaka izražena v enotah opazovane spremenljivke (v našem primeru v m^3/s), ni najbolj primerna za oceno napovedne uspešnosti posameznega modela. Zato smo se odločili

pri vsakem generiranem hidrološkem modelu dodatno izračunati vrednosti izbranih (brezdimenzijskih) statističnih kriterijev. V ta namen smo uporabili Pearsonov koeficient korelacije r , koeficient Nash-Sutcliffe (NS), odstotek pristranskosti (angl. percent bias oz. PBIAS) in razmerje med RMSE in standardnim odklonom (ang. RMSE – observations' standard deviation ratio oz. RSR).

Pearsonov koeficient korelacije izračunamo s pomočjo naslednjega izraza:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (48)$$

V zgornji enačbi predstavljajo n število opazovanj oz. meritev, \bar{X} in \bar{Y} pa povprečni vrednosti spremenljivk X in Y . Pearsonov koeficient lahko zavzema vrednosti med -1 in 1. Če je vrednost r enaka 0, potem spremenljivki nista linearno povezani. Vrednost r blizu 1 je indikator pozitivne linearne povezanosti, pri čemer se z večanjem vrednosti ene spremenljivke večja tudi vrednost druge. Če se r približuje vrednosti -1, sta spremenljivki negativno linearno povezani, z večanjem vrednosti prve spremenljivke pa se vrednost druge manjša (Turk, 2011).

Vrednost koeficienta Nash-Sutcliffe izračunamo s pomočjo enačbe (49) (Nash in Sutcliffe, 1970), pri čemer predstavljajo n število opazovanj, X^{obs} merjene vrednosti opazovane spremenljivke (v našem primeru pretoka), X^{mean} povprečno izmerjeno vrednost, X^{sim} pa napovedi modela. Vrednosti koeficienta se gibljejo med $-\infty$ in 1, pri čemer je vrednost 1 indikator popolnega ujemanja med simuliranimi in merjenimi vrednostmi pretokov. Če je vrednost NS manjša od 0, potem s povprečno vrednostjo izmerjenih pretokov dosežemo boljše napoved kot z izbranim modelom.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X^{mean})^2} \quad (49)$$

S koeficientom PBIAS (Yapo in sod., 1996) merimo povprečno nagnjenost modela k napovedovanju višjih oz. nižjih vrednosti napram izmerjenim vrednostim opazovane spremenljivke. Če je vrednost koeficienta pozitivna, potem je model nagnjen k podcenjevanju vrednosti, če pa je negativna, potem je model nagnjen k precenjevanju vrednosti opazovane spremenljivke. Vrednost koeficienta PBIAS izračunamo z enačbo (50).

$$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs})} \quad (50)$$

Koeficient RSR (Moriasi in sod., 2007) predstavlja normalizirano RMSE napako. Izračunamo ga tako, da vrednost RMSE napake delimo s standardnim odklonom, ki podaja oceno povprečnega odstopanja od povprečne vrednosti merjene spremenljivke ($STDEV_{obs}$):

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{mean})^2}} \quad (51)$$

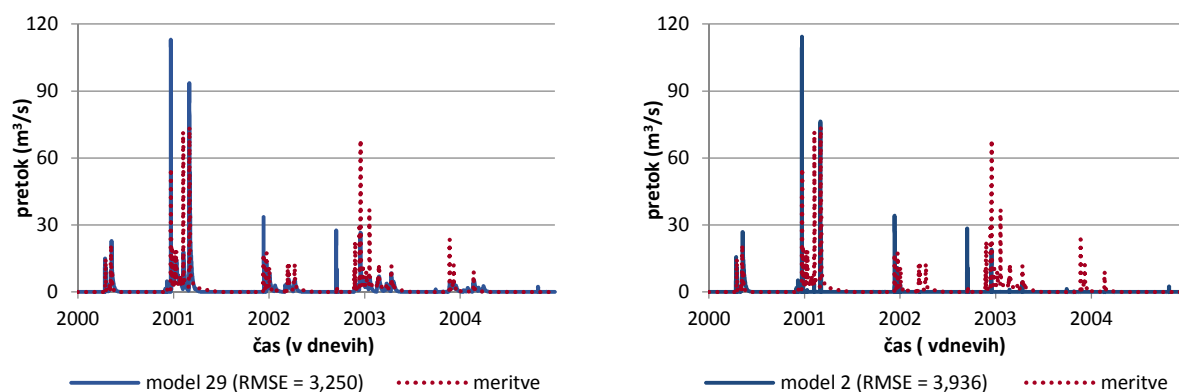
Izračunane vrednosti izbranih statističnih kriterijev so za vsak posamezen generiran hidrološki model predstavljene v preglednici 25. Iz preglednice je razvidno, da rangiranje modelov na osnovi generirane RMSE napake sledi rangiranju po statističnih parametrih NS in RSR. Iz omenjenega lahko sklepamo, da je RMSE napaka primerna za rangiranje oz. medsebojno primerjavo generiranih hidroloških modelov, čeprav nam ne pove veliko o dejanski napovedni uspešnosti posameznega modela, o kateri bo več povedanega v nadaljevanju poglavja 5.2.3.

Umerjene vrednosti parametrov vseh 32 generiranih modelov so zbrane v prilogi E. Bolj kot same vrednosti parametrov, ki so bile omejene z območjem pričakovanih vrednosti (preglednica 22), so nas zanimala razmerja med vrednostmi parametrov po posameznih podrazdelkih. Poudarek je bil predvsem na parametru c_n , ki ima pomemben vpliv na izračun površinskega odtoka in posledično na izračun pretoka v odvodniku. Iz priloge E je razvidno, da pri vseh modelih vrednosti parametra c_n najvišje v podrazdelku s prevladujočo urbano rabo (`sub1.urban`), vrednosti c_n v podrazdelkih s kmetijsko rabo (`sub1.rural` in `sub2.rural`) pa so v večini primerov višje od vrednosti v podrazdelkih z naravnim pokrovom (`sub1.natural` in `sub2.natural`), kar je v skladu s pričakovanji. Ne glede na to, da so bila omenjena razmerja deloma vsiljena s podanim območjem pričakovanih vrednosti, bi lahko ProBMoT v primeru razdelkov `sub2.rural` in `sub2.natural` izbral tudi drugačno razmerje, ker sta se razpona pričakovanih vrednosti za parameter c_n prekrivala. To se je dejansko zgodilo v primeru modelov 9, 11, 25 in 31, ki z izjemo modela 11 dosejajo višje vrednosti RMSE in so posledično slabše rangirani (glej preglednico 25).

V nadaljevanju smo izvedli simulacijo vseh generiranih struktur hidrološkega modela. V ta namen smo v datoteki z nastavitvami (končnica `xml`) izbrali ukaz `simulate_model`. Vsaka simulacija je trajala približno 1 sekundo.

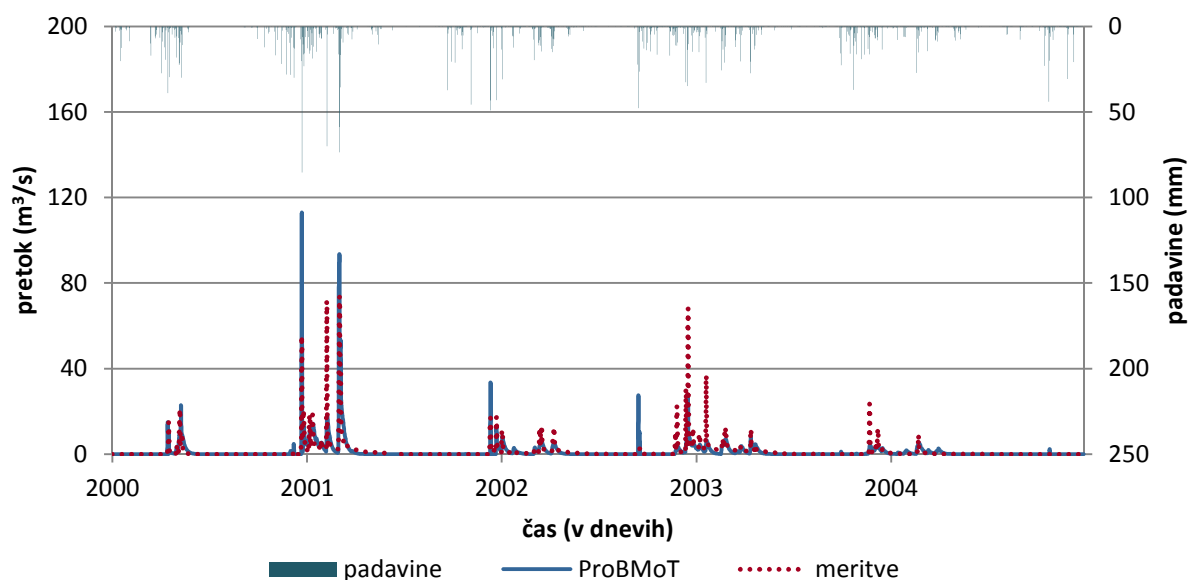
Primerjava rezultatov simulacije najboljšega in najslabšega hidrološkega modela (z vidika izračunane RMSE napake) s pretoki, izmerjenimi na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, je prikazana na sliki 35. Iz rezultatov je razvidno, da model 29 (slika 35, levo) dobro ujame dinamiko meritev. Kakovost ujemanja visokih konic pretokov (nad 20 m³/s) je nekoliko slabša, pri čemer model tovrstne visoke

konice v prvi polovici opazovanega obdobja preceni, v drugi polovici pa podceni. Slednje sicer velja tudi za model 2 (slika 35, desno), je pa pri omenjenem modelu ujemanje rezultatov modela z dinamiko meritev precej slabše (izračunan pretok je večino časa enak 0 m³/s).



Slika 35: Primerjava povprečnih dnevni pretokov, izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, z rezultati simulacije hidrološkega modela z najnižjo (levo) in najvišjo (desno) izračunano vrednostjo RMSE, za obdobje 2000–2004.

Figure 35: Comparison of the average daily flow rates, measured at the Ponte Rodoviária hydrological station, and the simulation results of the hydrological model with the lowest (left) and the highest (right) generated RMSE value, for the period 2000–2004.



Slika 36: Primerjava izmerjenih povprečnih dnevni pretokov (m³/s) in padavin (mm) z rezultati izbranega ProBMoT modela, za obdobje 2000–2004.

Figure 36: Comparison of the average daily flow rates (m³/s), precipitation measurements (mm), and the selected ProBMoT model results, for the period 2000–2004.

Slika 36 prikazuje primerjavo dnevni pretokov, izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, in rezultatov simulacije najboljšega hidrološkega modela (modela 29), v odvisnosti od uporabljenih povprečnih dnevni padavin. Iz slike je razvidno, da ProBMoT ujame sezonsko dinamiko pretokov, pri čemer določene konice preceni oz. podceni.

Glede na to, da večji del porečja reke Quarteire leži na območju kraškega vodonosnika, ki ima lahko daljši odzivni čas na padavinske dogodke, nas je zanimalo, ali bi lahko z upoštevanjem časovnega zamika padavin izboljšali ujemanje rezultatov modela z merjenimi pretoki, zato smo se odločili analizirati odnos med omenjenima časovnima vrstama. V ta namen smo uporabili metodo križne korelacije, s katero ugotavljamo stopnjo linearne odvisnosti med dvema nizoma podatkov pri različnih časovnih zamikih med njima. Metoda se pogosto uporablja za ugotavljanje medsebojne povezanosti padavin in pretokov kraških izvirov (Kovačič, 2009).

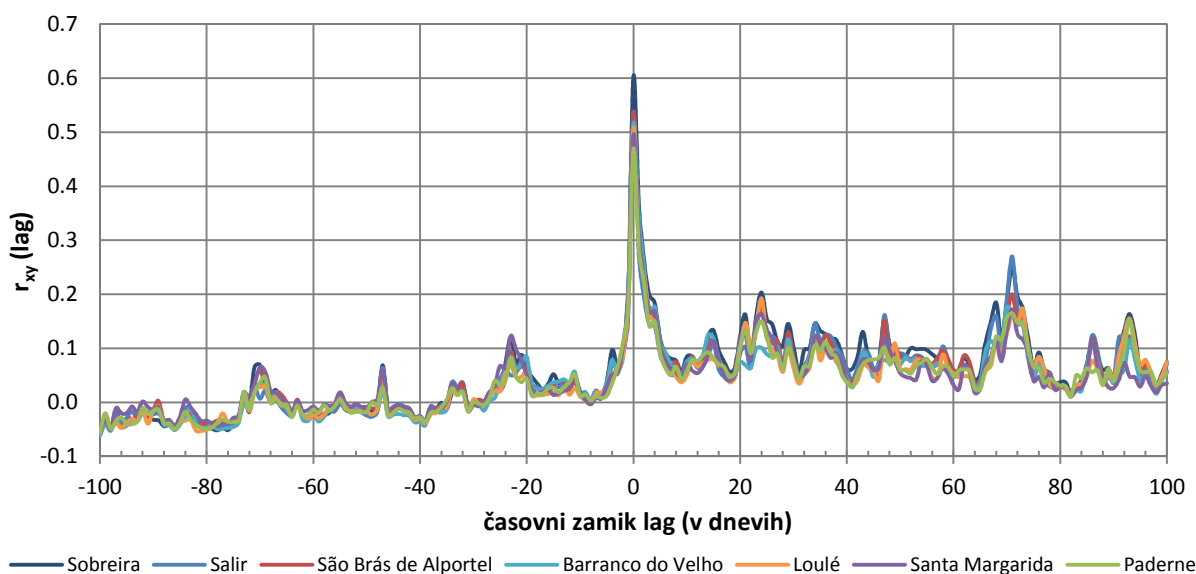
Križnokorelacijski koeficient r_{xy} izračunamo na podlagi naslednje enačbe:

$$r_{xy}(lag) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{n-|lag|} (x_{i+|lag|} - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} & \text{za } lag < 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^{n-lag} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} & \text{za } lag \geq 0 \end{cases} \quad (52)$$

V zgornji enačbi predstavljajo lag časovni zamik med opazovanima nizoma podatkov, n število dogodkov oz. meritev, \bar{x} in \bar{y} pa povprečni vrednosti vseh dogodkov časovnih vrst x in y , pri čemer prva predstavlja vhodni, druga pa izhodni signal iz opazovanega sistema. Korelacijski koeficient r_{xy} zavzema vrednosti med -1 in 1. Če je vrednost r_{xy} enaka 0, potem časovni vrsti nista linearno povezani. Vrednost r_{xy} blizu 1 je indikator pozitivne linearne povezanosti, pri čemer se z večanjem vrednosti v eni časovni vrsti večajo tudi vrednosti v drugi. Če se r_{xy} približuje vrednosti -1, sta časovni vrsti negativno linearno povezani, z večanjem vrednosti v prvi časovni vrsti pa se vrednosti v drugi manjšajo. Rezultat križne korelacije predstavlja korelogram, ki prikazuje potek križnokorelacijske funkcije. Pri pozitivnem časovnem zamiku lag opazujemo vpliv vhodnega na izhodni signal, pri negativnem časovnem zamiku lag pa vpliv izhodnega na vhodni signal. Maksimum križnokorelacijske funkcije predstavlja največjo pozitivno linearno soodvisnost med analiziranimi nizoma podatkov, poravnava križnokorelacijske funkcije v $lag = 0$ pa kaže na istočasno reagiranje vhodnega in izhodnega signala. V primeru preučevanja kraških vodonosnikov podaja časovni razkorak med $lag = 0$ in maksimumom križnokorelacijske funkcije oceno potovalnega časa vode skozi sistem.

Graf na sliki 37 prikazuje rezultate križne korelacije med dnevnimi padavinami, izmerjenimi na sedmih meteoroloških postajah na območju porečja reke Quarteire, in pretoki, izmerjenimi na

hidrološki postaji Ponte Rodoviária, in sicer za obdobje med letoma 2000 in 2004. Dobljene križnokorelacijske krivulje so si po obliki zelo podobne, kar kaže na podoben časovni potek padavin, izmerjenih na izbranih padavinskih postajah. Vse krivulje dosežejo maksimume pri $lag = 0$, pri čemer se maksimalne vrednosti r_{xy} gibljejo med 0,47 (Paderne) in 0,6 (Sobreira). Za vse krivulje je značilno strmo upadanje v smeri negativnih in pozitivnih lag vrednosti. Takšna oblika križnokorelacijskih funkcij kaže na takojšen in izrazit odziv pretoka odvodnika na padavinske dogodke v zaledju (Kovačič, 2009).



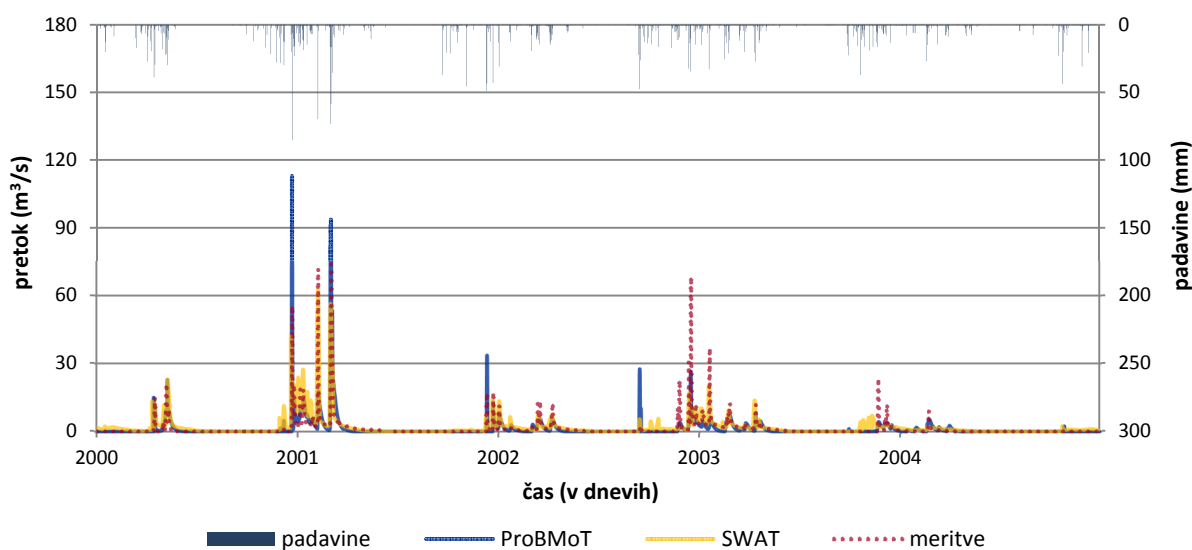
Slika 37: Rezultati križne korelacije med padavinami, izmerjenimi na izbranih meteoroloških postajah, in pretokom reke Quarteire, izmerjenim na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, za obdobje 2000–2004.

Figure 37: Results of the cross-correlation analysis between the precipitation data, measured at the selected meteorological stations, and the Quarteira river flow data, measured at the Ponte Rodoviária hydrological station, for the period 2000–2004.

Iz rezultatov križne korelacije je razvidno, da je odziv pretoka reke Quarteire na padavine, izmerjene na izbranih meteoroloških postajah, največji pri $lag = 0$, kar z drugimi besedami pomeni, da v povprečju daljšega časovnega obdobja na povprečni dnevni pretok reke Quarteire najbolj vplivajo padavine, zapadle v istem dnevu. Razmeroma nizke maksimalne dosežene vrednosti r_{xy} (med 0,47 in 0,6) kažejo na zmerno pozitivno korelacijo med izmerjenimi padavinami in pretokom. Na podlagi omenjenega lahko ugotovimo, da v obravnavanem sistemu ni večjih retenzij in da z upoštevanjem časovnega zamika med obravnavanima časovnima vrstama ne bi dosegli boljšega ujemanja rezultatov modela z meritvami.

Rezultate izbranega modela smo primerjali tudi z rezultati hidrološke študije porečja reke Quarteire, ki jo je izvedel Sohel (2012), pri čemer je za modeliranje dnevnih pretokov uporabil program SWAT

(Arnold in Fohrer, 2005), za umerjanje vrednosti izbranih parametrov pa kombinacijo ročnega in avtomatskega umerjanja s programom SWAT-CUP (Abbaspour, 2013). Na podlagi vizualne primerjave (slika 38) je razvidno, da so odstopanja med rezultati obeh modelov največja na prehodu med letoma 2000 in 2001. V tem obdobju SWAT bolje ujame visoke konice pretokov (nad 40 m³/s), medtem ko ProBMoT doseže boljše ujemanje z nizkimi pretoki (pod 20 m³/s). Na splošno SWAT nekoliko preceni nizke pretoke, medtem ko ProBMoT preceni le posamezne konice. Na prehodu med letoma 2002 in 2003 oba modela podcenita izmerjene konice pretokov.



Slika 38: Primerjava povprečnih dnevni pretokov (m³/s), izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, z rezultati modelov ProBMoT in SWAT, za obdobje 2000–2004.

Figure 38: Comparison of average daily flow rates (m³/s), measured at the Ponte Rodoviária hydrological station, and simulation results, obtained with ProBMoT and SWAT, for the period 2000–2004.

Vizualni primerjavi rezultatov obeh hidroloških modelov je sledila statistična primerjava, pri čemer smo oceno napovedne sposobnosti posameznega modela podali na osnovi izračunanih vrednosti izbranih statističnih kriterijev (glej preglednico 26).

Preglednica 26: Ocena napovedne sposobnosti hidrološkega modela na podlagi vrednosti izbranih statističnih kriterijev (prirejeno po Moriasi in sod., 2007 ter Van Liew in sod., 2003).

Table 26: Hydrological model performance ratings for the selected statistical indicators (adapted from Moriasi et al., 2007, and Van Liew et al., 2003).

Napovedna sposobnost modela	r in NS	PBIAS	RSR
zelo dobra	0,75–1,00	< ±10	0–0,5
dobra	0,65–0,75	±10 – ±15	0,5–0,6
zadovoljiva	0,50–0,65	±15 – ±25	0,6–0,7
nezadovoljiva	< 0,5	> ±25	> 0,7

Iz primerjave statističnih parametrov obeh hidroloških modelov (preglednica 27) je razvidno, da smo s ProBMoT modelom dosegli nekoliko boljše ujemanje z merjenimi vrednostmi pretokov, kot z modelom SWAT, čeprav je napovedna sposobnost modela na podlagi vrednosti NS in RSR še vedno nezadovoljiva.

Preglednica 27: Ocena uspešnosti hidroloških modelov SWAT in ProBMoT pri napovedovanju pretokov reke Quarteira na iztoku iz porečja, na podlagi primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev.

Table 27: Assessment of the ability of hydrological models SWAT and GWLF to predict Quarteira river flow rates at the catchment outlet, based on the comparison of the selected statistical indicator values.

Statistični kriteriji	SWAT	ProBMoT
r	0,70	0,76
NS	0,44	0,49
PBIAS	-2,74	6,63
RSR	0,74	0,72

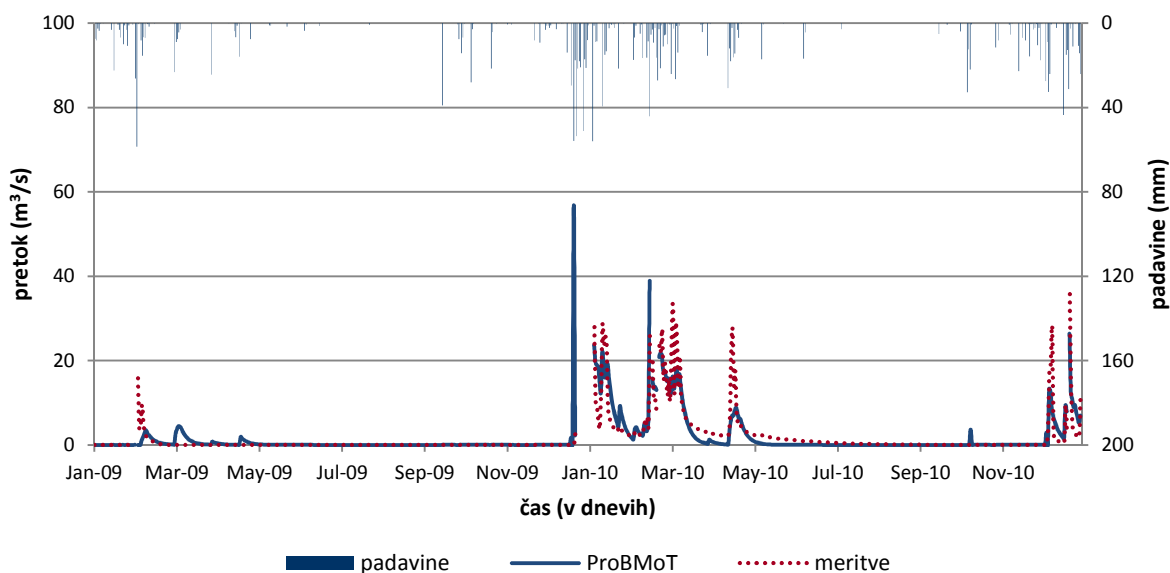
Sohel (2012) je v svoji študiji primerjal tudi sezonsko ujemanje rezultatov modela SWAT s povprečnimi izmerjenimi pretoki. V suhih mesecih obravnavanega obdobja (med aprilom in septembrom) je povprečni izmerjeni pretok znašal 0,46 m³/s, Sohel pa je s svojim modelom izračunal vrednost 0,85 m³/s, s čimer je povprečje poletnih pretokov precenil za 85 %. Z našim ProBMoT modelom smo izračunali vrednost 0,40 m³/s, kar pomeni, da smo za 12 % podcenili povprečne pretoke v suhih mesecih. V mokrih mesecih (med oktobrom in marcem) je povprečni izmerjeni pretok znašal 1,99 m³/s, Sohel pa je s SWAT modelom izračunal vrednost 2,78 m³/s, s čimer je za 40 % precenil povprečne pretoke v mokrih mesecih. Z našim modelom smo izračunali vrednost 1,90 m³/s, kar je le 5 % manj od izmerjenega petletnega povprečja.

5.2.4 Validacija hidrološkega modela (obdobje 2009–2010)

Z validacijo smo želeli potrditi uporabnost izbranega hidrološkega modela, umerjenega na meritve iz prvega opazovanega obdobja (2000 do 2004). V ta namen smo uporabili novo datoteko z vhodnimi podatki, in sicer za obdobje med letoma 2009 in 2010. Vsebina vhodne datoteke je predstavljena v poglavju 5.2.2. Strukture konceptualnega modela nismo spreminjali. Ohranili smo tudi vse (umerjene) vrednosti parametrov oz. konstant.

Na sliki 39 so prikazani rezultati validacije in njihova primerjava s povprečnimi dnevnimi pretoki, izmerjenimi na hidrološki postaji Ponte Rodoviária. Razvidno je, da je bilo med letoma 2009 in 2010 več dni z manjkajočimi meritvami pretokov. Manjka npr. podatek o pretokih z dne 1. februarja 2009, ko je bila izmerjena najvišja dnevna količina padavin (59 mm). Do večjega izpada podatkov je prišlo

tudi v obdobju med 23. decembrom 2009 in 4. januarjem 2010. Sicer model dobro ujame sezonsko dinamiko nihanja merjenih pretokov, pri čemer izmerjene konice večinoma podceni.



Slika 39: Primerjava povprečnih dnevni pretokov (m^3/s), izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, z rezultati validacije izbranega ProBMot modela, za obdobje 2009–2010.

Figure 39: Comparison of average daily flow rates (m^3/s), measured at the Ponte Rodoviária hydrological station, and validation results of the selected ProBMoT model, for the period 2009–2010.

Preglednica 28: Primerjava vrednosti statističnih kriterijev za izbrani hidrološki model, posebej za obdobji umerjanja (2000–2004) in validacije (2009–2010).

Table 28: Comparison of the statistical indicator values calculated for the selected hydrological model, separately for the calibration (2000–2004) and validation period (2009–2010).

Statistični kriteriji	Umerjanje (2000–2004)	Validacija (2009–2010)
r	0,76	0,77
NS	0,49	0,57
PBIAS	6,63	5,69
RSR	0,72	0,66

V preglednici 28 je podana statistična primerjava rezultatov izbranega hidrološkega modela za obdobji umerjanja (2000–2004) in validacije (2009–2010). Sodeč po izračunanih vrednostih r in PBIAS je v obeh obravnavanih obdobjih ujemanje rezultatov modela z meritvami zelo dobro. Na prvi pogled dosežemo v validacijskem obdobju občutno izboljšanje vrednosti NS in RSR, ki kažeta na zadovoljivo napovedno sposobnost modela. Podrobna primerjava vrednosti omenjenih statističnih kriterijev v obeh obravnavanih obdobjih pokaže, da so odstopanja majhna. Vrednost NS se v primerjavi z obdobjem umerjanja poviša za 0,08, medtem ko se vrednost RSR zmanjša za 0,06. Potrebno je tudi opozoriti, da

so bile v obdobju umerjanja vrednosti NS in RSR tik pod vrednostjo, ki predstavlja mejo med razredoma nezadovoljivega in zadovoljivega ujemanja rezultatov modela z meritvami.

Eden izmed možnih razlogov za izboljšanje vrednosti izbranih statističnih kriterijev napram obdobju umerjanja bi lahko bil v drugačni shemi padavinskih postaj, uporabljenih za pripravo vhodnih podatkov, o čemer smo govorili že v poglavju 5.2.2. Ker smo imeli za obdobje 2000–2004 na razpolago meritve padavin s sedmih meteoroloških postaj, za obdobje 2009–2010 pa podatke z ene same postaje (Alte), smo za pripravo padavin v obdobju umerjanja uporabili Thiessenove poligone (slika 34), medtem ko smo v validacijskem obdobju v celotnem porečju reke Quarteire upoštevali padavine, izmerjene na postaji Alte. V poglavju 5.2.2 smo na primeru leta 2006 pokazali, da je odstopanje med padavinami, izračunanimi s pomočjo Thiessenovih poligonov, in padavinami, izmerjenimi na postaji Alte, minimalno, pri čemer so padavine, izmerjene na slednji postaji, na letnem nivoju višje za 4,39 %. Za potrebe naše študije smo predpostavili, da se razmerje med obema shemama padavinskih postaj ohrani tudi v obdobju med letoma 2009–2010, čeprav se dejansko lahko spreminja iz leta v leto. Kljub temu, da je odstopanje majhno, bi lahko nekoliko višje padavine vplivale na višje izračunane vrednosti pretokov ter posledično na izboljšanje ocene napovedne sposobnosti modela v validacijskem obdobju.

Na podlagi omenjenih ugotovitev lahko zaključimo, da je napovedna uspešnost izbranega hidrološkega modela v obeh opazovanih obdobjih primerljiva.

5.3 Modeliranje kakovosti voda

Tako kot pri modeliranju hidroloških procesov smo tudi za potrebe modeliranja kakovosti voda na porečju reke Quarteire izbrali dve obdobji meritev: 1) med letoma 2000 in 2004, ter 2) med letoma 2009 in 2010. Prvo obdobje meritev smo uporabili za umerjanje parametrov in iskanje primerne strukture modela kakovosti, drugo pa za validacijo izbranega modela. Kot osnovo za modeliranje smo uporabili rezultate predhodno umerjenega hidrološkega modela z najboljšo strukturo, predstavljenega v poglavju 5.2.3.

5.3.1 Priprava konceptualnega modela in določitev vrednosti uporabljenih konstant

Najprej smo zopet pripravili konceptualni opis opazovanega porečja oz. konceptualni model (priloga F). Tokrat smo upoštevali samo procese odplavljanja sedimenta in spiranja hranil ter vse sodelujoče entitete. V podrazdelku *sub1.urban* smo upoštevali vse procese spiranja hranil, predstavljene v

poglavju 2.2.2, z izjemo obremenitev s hranili v vezani obliki s kmetijskih površin, pri ostalih podrazdelkih pa nismo upoštevali obremenitev s hranili v vezani obliki z urbanih površin.

Preglednica 29: Vrednosti konstant modela kakovosti voda (po posameznih podrazdelkih).

Table 29: Parameter values of the water quality model (per each subcompartment).

Konstanta	Podrazdelki					Enota
	sub1.urban	sub1.rural	sub1.natural	sub2.rural	sub2.natural	
area	10	16.218	13.887	577	675	ha
imp	0,8	0	0	0	0	-
factor	1	1	1	0	0	-
kUsle	0,038–0,048	0,038–0,048	0,038–0,048	0,038–0,048	0,038–0,048	(t·ha·h)/ (ha·MJ·mm)
cUsle	0	0,04–0,3	0,002–0,06	0,04–0,3	0,002–0,06	-
pUsle	1	0,25–0,5	0,9–1	0,25–0,5	0,9–1	-
lsUsle	2,78	2,93	8,46	2,59	5,17	-
tConc	0,33	8,05	2,42	0,46	0,36	h
erosCoeff	0,1–0,4	0,1–0,4	0,1–0,4	0,1–0,4	0,1–0,4	-
dr	0,08	0,08	0,08	0,22	0,22	-
srDNconc	0,1–0,3	0,1–0,4	0,05–0,2	0,1–0,4	0,05–0,2	mg/l
srDPconc	0,01–0,07	0,05–0,08	0,01–0,04	0,05–0,08	0,01–0,04	mg/l
gwDNconc	0,1–0,4	0,5–0,7	0,1–0,4	0,5–0,7	0,1–0,4	mg/l
gwDPconc	0,01–0,04	0,02–0,06	0,01–0,03	0,02–0,06	0,01–0,03	mg/l
rSNconc	-	500–700	400–600	500–700	400–600	g/t
rSPconc	-	150–450	100–150	150–450	100–150	g/t
numberOfInhabitants	61	6.289	981	122	87	preb
gwTot	335	153	22	11	22	mm/leto
fTot	516	185	44	141	69	mm/leto
sDNproduction	12	12	12	12	12	g/(preb·dan)
sDPproduction	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	g/(preb·dan)
DNplantUptake	0	1,6	1,6	1,6	1,6	g/(preb·dan)
DPplantUptake	0	0,4	0,4	0,4	0,4	g/(preb·dan)
nEnrichmentRatio	-	1–3	1–3	1–3	1–3	-
pEnrichmentRatio	-	1–3	1–3	1–3	1–3	-
nAccRate	0,045–0,056	-	-	-	-	kg/(ha·dan)
pAccRate	0,0045–0,0067	-	-	-	-	kg/(ha·dan)
nDeplRate	0,12	-	-	-	-	1/dan
pDeplRate	0,12	-	-	-	-	1/dan
betaN0	4,04	-	-	-	-	-
betaN1	0,936	-	-	-	-	-
betaN2	0,937	-	-	-	-	-
betaN3	0,692	-	-	-	-	-
betaN4	1,373	-	-	-	-	-
betaP0	0,697	-	-	-	-	-
betaP1	1,008	-	-	-	-	-
betaP2	0,628	-	-	-	-	-
betaP3	0,469	-	-	-	-	-
betaP4	1,790	-	-	-	-	-

Vrednosti uporabljenih konstant (po posameznih podrazdelkih) so prikazane v preglednici 29. Pri konstantah, ki smo jih umerjali, so podani razponi pričakovanih vrednosti. Ti so bodisi enaki razponom vrednosti, definiranim v domenski knjižnici (glej prilogo C), ali pa so še nekoliko bolj omejeni. Skupno število uporabljenih parametrov je bilo 130. Od tega je bilo 34 parametrov

uporabljenih v podrazdelku *sub1.urban*, v preostalih podrazdelkih pa smo uporabili po 24 parametrov. Ker različne alternativne formulacije izbranih procesov uporabljajo različne kombinacije parametrov, se je število dejansko uporabljenih parametrov spreminjalo z izbrano strukturo modela.

Vrednosti konstant *area* (površina) in *imp* (delež neprepustnih površin) smo podali na osnovi modificirane karte rabe zemljišč (slika 33, spodaj), pri čemer smo vrednost konstante *imp* določili samo za podrazdelek s prevladujočo urbano rabo (*sub1.urban*), pri ostalih podrazdelkih pa smo uporabili vrednost *imp* = 0. Konstanta *factor* predstavlja prispevek sedimenta in hranil, vezanih na površinski odtok, k obremenitvi odvodnika. Ker območje depresije Nave do Barão ne prispeva k pretoku reke Quarteire in posledično k obremenitvam s sedimentom in hranili, vezanimi na površinski odtok, smo pri razdelkih *sub2.rural* in *sub2.natural* upoštevali vrednost konstante 0.

Vrednosti dejavnikov USLE enačbe smo umerjali, z izjemo parametra *lsUsle*, katerega vrednosti smo določili z uporabo enačbe (28). Za določitev razponov vrednosti parametra *kUsle* smo uporabili evropsko karto erodibilnosti tal (slika 4). Vrednosti parametra *cUsle* smo določili na podlagi preglednice 8, vrednosti parametra *pUsle* pa s pomočjo preglednice 9. Ker na območju urbane rabe prevladujejo utrjene površine brez rastlinskega pokrova, ki so erozijsko manj izpostavljene, smo za razdelek *sub1.urban* izbrali vrednosti parametrov *cUsle* = 1 in *pUsle* = 0.

Za izračun časov koncentracij po posameznih podrazdelkih (parameter *tConc*) smo uporabili enačbe (33) do (35). Razpone vrednosti erozijskega koeficienta (parameter *erosCoeff*) smo določili na osnovi referenčne literature (Selker, 1990), pri določitvi ranga vrednosti koeficienta odplavljanja (parameter *dr*) pa smo si pomagali z grafom na sliki 3.

Ker se v porečju reke Quarteire meritve koncentracij hranil v površinskem odtoku in tleh ne izvajajo in ker so bile na izbranih merilnih mestih za določanje kakovosti podzemnih voda (slika 31) v obeh obravnavanih obdobjih izvedene le meritve koncentracij dušika, pa še te zgolj dva- do trikrat letno, smo omenjene koncentracije hranil obravnavali kot konstantne vrednosti in ne kot spremenljivke. Pri določitvi razponov povprečnih koncentracij hranil v površinskem odtoku (*srDNconc* in *srDPconc*), podtalnici (*gwDNconc* in *gwDPconc*) ter tleh (*rSNconc* in *rSPconc*) smo si pomagali s smernicami, podanimi v referenčni literaturi (Haith in sod., 1992; Niraula in sod., 2013; Staley, 2006).

Število prebivalcev, priključenih na greznice (parameter *numberOfInhabitants*), smo ocenili s prekrivanjem kart statističnih enot, lokacij ČN in pokritosti s kanalizacijskim omrežjem (glej poglavje 5.1.6). Na podlagi prekrivanja prve tematske karte, ki podaja gostoto poselitve po posameznih statističnih enotah, z modificirano karto rabe zemljišč, smo določili število prebivalcev po posameznih

podrazdelkih. Iz druge tematske karte smo razbrali lokacije ČN, s prekrivanjem karte statističnih enot in karte pokritosti s kanalizacijskim omrežjem pa smo določili število prebivalcev, priključenih na posamezno ČN. Za vsak podrazdelek smo predpostavili, da imajo prebivalci, ki niso priključeni na ČN, lastne greznice. Povprečni letni količini baznega odtoka (parameter g_{wTot}) in vode v vodotoku (parameter f_{Tot}) smo izračunali na podlagi rezultatov umerjenega hidrološkega modela. Vrednosti parametrov $s_{DNProduction}$, $s_{DPProduction}$, $DN_{plantUptake}$ in $DP_{plantUptake}$, ki zajemajo dnevno obremenitev odpadnih voda z dušikom in fosforjem ter dnevno porabo hranil s strani rastlin, smo določili s pomočjo preglednice 7. Ker na območju urbane rabe prevladujejo utrjene površine brez rastlinskega pokrova, smo za parametra $DN_{plantUptake}$ in $DP_{plantUptake}$ v podrazdelku `sub1.urban` izbrali vrednost 0.

Na osnovi referenčne literature (Stoltenberg in White, 1953; Yang in sod., 2014; Zhang in sod., 2004) smo določili tudi razpone vrednosti obogatitvenih razmerij za dušik in fosfor ($n_{EnrichmentRatio}$ in $p_{EnrichmentRatio}$).

Preostali parametri se nanašajo na spiranje hranil z urbanih površin, zato smo jih upoštevali samo v primeru podrazdelka `sub1.urban`. Razpone vrednosti koeficientov $n_{AccRate}$ in $p_{AccRate}$, ki opisujejo hitrost akumulacije izbranega hranila na urbanih površinah, smo razbrali iz preglednice 13, za hitrost spiranja akumuliranega dušika in fosforja ($n_{DeplRate}$ in $p_{DeplRate}$) pa smo upoštevali vrednost 0,12 (Haith in sod., 1992). Vrednosti parametrov tipa β , ki nastopajo v USGS regresijski enačbi za izračun obremenitev s hranili z urbanih površin (enačba (38)), smo določili na podlagi preglednice 14.

5.3.2 Priprava datoteke z vhodnimi podatki

Neodvisne spremenljivke, ki smo jih obravnavali v posameznem podrazdelku konceptualnega modela, so predstavljene v preglednici 30. Skupno število obravnavanih neodvisnih spremenljivk je bilo 53. Od tega je bilo v podrazdelku `sub1.urban` uporabljenih 9 neodvisnih spremenljivk, v preostalih podrazdelkih pa smo uporabili po 11 neodvisnih spremenljivk. Za vsako izmed neodvisnih spremenljivk smo v datoteki z vhodnimi podatki (končnica `data`) podali časovni niz merjenih oz. predhodno izračunanih vrednosti. Ker smo obravnavali dve različni časovni obdobji, smo pripravili dve ločeni podatkovni datoteki, prvo za obdobje med letoma 2000 in 2004, drugo pa za obdobje med letoma 2009 in 2010.

V preglednici 24 je podan seznam meteoroloških postaj, ki smo jih uporabili za določitev dnevnih vrednosti padavin po posameznih podrazdelkih (spremenljivka `prec.amountOfWater`). Vrednosti

spremenljivk `runoff.amountOfWater`, `gw.amountOfWater` in `f.amountOfWater` smo predhodno izračunali z izbranim hidrološkim modelom (glej poglavje 5.2.3).

Preglednica 30: Seznam neodvisnih spremenljivk, ki smo jih obravnavali v posameznem podrazdelku konceptualnega modela, namenjenega opisu stanja kakovosti voda v porečju reke Quarteire.

Table 30: List of all the exogenous variables that we took into account in a single subcompartment of the conceptual model used to describe water quality conditions within the Quarteira river catchment.

Entiteta	Spremenljivka	Opis	Enota
prec	amountOfWater	višina padavin	mm/dan
runoff	amountOfWater	količina vode, ki površinsko odteče	mm/dan
gw	amountOfWater	količina vode, ki odteče z baznim odtokom	mm/dan
f	amountOfWater	količina vode v vodotoku	mm/dan
sed	lnAlpha	spremenljivka, ki vsebuje informacijo o deležu dnevnih padavin, zapadlih v polurnem nalivu z največjo intenziteto	
psDN	load	točkovna obremenitev z dušikom v topni obliki	kg/dan
psDP	load	točkovna obremenitev s fosforjem v topni obliki	kg/dan
ruralSN	load	obremenitev z dušikom v vezani obliki s kmetijskih površin	kg/dan
ruralSP	load	obremenitev s fosforjem v vezani obliki s kmetijskih površin	kg/dan
urbanSN	load	obremenitev z dušikom v vezani obliki z urbanih površin	kg/dan
urbanSP	accumulation	količina dušika, akumuliranega na urbanih površinah	kg/ha
	load	obremenitev s fosforjem v vezani obliki z urbanih površin	kg/dan
	accumulation	količina fosforja, akumuliranega na urbanih površinah	kg/ha

Spremenljivka `sed.lnAlpha` nastopa v izračunu deleža dnevne količine padavin α_{tc} , ki pade v času koncentracije (enačba (32)) in predstavlja parameter modificirane racionalne metode za izračun maksimalnega odtoka s porečja (enačba (31)). Vrednost spremenljivke je odvisna od dnevne višine padavin, natančen postopek določitve pa je predstavljen v navodilih za uporabo programa SWAT (Neitsch in sod, 2011; str. 69–70).

Kot vire točkovnih obremenitev s hranili smo upoštevali samo ČN. Obremenitev z dušikom (spremenljivka `psDN.load`) in fosforjem (spremenljivka `psDP.load`) iz ČN smo izračunali kot produkt števila prebivalcev, priključenih na posamezno ČN, in specifične dnevne obremenitve s posameznim hranilom na prebivalca, pri čemer smo za obremenitev z dušikom predpostavili vrednost 12 g N/(preb·dan), za obremenitev s fosforjem pa 1,5 g P/(preb·dan) (Tchobanoglous in sod., 2003). Izračunano obremenitev smo zmanjšali na osnovi podane stopnje čiščenja na posamezni ČN (preglednica 21). Odstotki zmanjšanja v odvisnosti od stopnje čiščenja so prikazani v preglednici 31.

Kot smo že omenili, smo pri pripravi konceptualnega modela v podrazdelku `sub1.urban` upoštevali vse procese spiranja hranil, z izjemo obremenitev s hranili v vezani obliki s kmetijskih površin, pri ostalih podrazdelkih pa nismo upoštevali obremenitev s hranili v vezani obliki z urbanih površin. V ta namen smo vse spremenljivke, katerih vrednosti bi se sicer računale v izvzetih procesih, vključili v datoteko z vhodnimi podatki in obravnavali kot neodvisne spremenljivke. Spremenljivki

ruralSN.load in ruralSP.load smo upoštevali samo pri podrazdelku sub1.urban, pri preostalih podrazdelkih pa smo upoštevali spremenljivke urbanSN.load, urbanSN.accumulation, urbanSP.load in urbanSP.accumulation. Vrednosti vseh naštetih neodvisnih spremenljivk so bile v obeh obravnavanih obdobjih (2000–2004 in 2009–2010) enake 0.

Preglednica 31: Vpliv stopnje čiščenja na čistilni napravi na učinkovitost odstranitve hranil (v %; prirejeno po Lin, 2001).

Table 31: Influence of the wastewater treatment plant stages on the nutrient removal efficiencies (in %; adapted from Lin, 2001).

Hranilo	Stopnja čiščenja			
	predčiščenje	primarno	sekundarno	terciarno
celotni dušik (total N)	15	25	40	> 90
celotni fosfor (total P)	5	10	30	> 90

V podatkovno datoteko smo poleg dnevnih vrednosti vseh neodvisnih spremenljivk vnesli še vrednosti treh odvisnih spremenljivk, na podlagi katerih smo umerjali parametre modela. Te spremenljivke so watershed.finTN.load, watershed.finTP.load in watershed.totSed.load, predstavljajo pa obremenitev z dušikom, fosforjem in sedimentom na nivoju celotnega porečja. Za potrebe določitve vrednosti omenjenih spremenljivk smo preko spletnega pregledovalnika SNIRH (<http://snirh.pt>) pridobili vrednosti povprečnih dnevnih pretokov, izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, ter dnevne koncentracije dušika, fosforja in suspendiranega sedimenta, izmerjene na isti postaji.

V obdobju med letoma 2000 in 2004 je bilo na merilni postaji Ponte Rodoviária izvedenih 50 meritev vsebnosti celotnega dušika in suspendiranih snovi ter 48 meritev koncentracije celotnega fosforja. Meritve so bile opravljene enkrat mesečno, z izjemo leta 2000, ko so bile izvedene le 3 meritve koncentracije dušika in suspendiranih snovi ter ena meritev koncentracije fosforja. Meritve prav tako niso bile opravljene v mesecu oktobru 2004. Med letoma 2009 in 2010 je bilo izvedenih 21 meritev koncentracije celotnega dušika, 20 meritev vsebnosti celotnega fosforja in 19 meritev koncentracije suspendiranega sedimenta. Do večjega izpada podatkov je prišlo med avgustom in oktobrom 2009 ter v mesecu decembru 2009. Meritve vsebnosti fosforja prav tako niso bile opravljene v mesecu novembru 2009, manjkajo pa tudi meritve koncentracije suspendiranega sedimenta za meseca november in december 2010. Julija 2009 sta bili opravljeni po dve meritvi vsebnosti celotnega dušika, celotnega fosforja in suspendiranih snovi.

Glede na to, da smo za potrebe modeliranja kakovosti voda z orodjem ProBMoT potrebovali dnevne vrednosti koncentracij dušika, fosforja in suspendiranih snovi, smo med posameznimi merjenimi vrednostmi izvedli linearno interpolacijo. Za potrebe določitve dnevnih obremenitev (v kg/dan oz.

t/dan) smo koncentracije, dobljene z linearno interpolacijo (v mg/l), pomnožili s povprečnimi dnevnimi pretoki (v m³/s), izmerjenimi na hidrološki postaji Ponte Rodoviária.

5.3.3 Umerjanje parametrov (obdobje 2000–2004)

Orodje ProBMoT smo želeli uporabiti za iskanje najboljše strukture modela kakovosti voda, a smo naleteli na težavo. Na podlagi knjižnice (priloga B) in nepopolnega konceptualnega modela (priloga F) bi lahko algoritem za izbrano porečje generiral 128 različnih modelov, ki bi se med seboj razlikovali v matematičnih izrazih, uporabljenih za izračun odplavljanja sedimenta in obremenitve s hranili z urbanih površin. V vsakem posameznem podrazdelku bi lahko ProBMoT za izračun količine odplavljenega sedimenta uporabil enačbo (29) (Haith, 1985) ali enačbo (30) (Williams, 1995), v podrazdelku *sub1.urban* pa bi za račun obremenitve z dušikom in fosforjem z urbanih površin lahko izbiral med enačbama (36) (Haith in sod., 1992) in (38) (USGS; Driver in Tasker, 1990). Naštete enačbe so podrobno opisane v poglavju 2.2.2.2. Vsakega izmed treh omenjenih procesov (odplavljanje sedimenta, spiranje dušika in spiranje fosforja) bi torej lahko zapisali na dva alternativna načina, kar bi pomenilo skupno osem različnih modelov za opis podrazdelka *sub1.urban* in po dva različna modela za opis preostalih štirih podrazdelkov. Posledično bi bilo vseh možnih kombinacij enačb oz. modelov celotnega porečja $8 \cdot 2^4$. Glede na to, da je algoritem za generiranje 32 struktur hidrološkega modela porabil 63 ur računskega časa, pri čemer smo umerjali vrednosti skupno 30 parametrov, bi lahko iskanje najprimernejše strukture modela kakovosti trajalo več tednov.

Iz omenjenega razloga smo postopek iskanja najprimernejše strukture modela izpustili in nadaljevali z umerjanjem parametrov (ukaz *fit_model*). V ta namen smo izbrali štiri testne strukture modela, ki smo jih zapisali v štiri ločene konceptualne modele s končnico *pbm* (glej preglednico 32). Prva struktura (model 1) posnema postopek izračuna, ki ga uporablja orodje GWLF (Haith in sod., 1992), tretja struktura (model 3) pa postopek, ki ga za modeliranje kakovosti voda ponuja SWAT (Arnold in Fohrer, 2005). Preostali dve strukturi predstavljata kombinacijo obeh omenjenih pristopov.

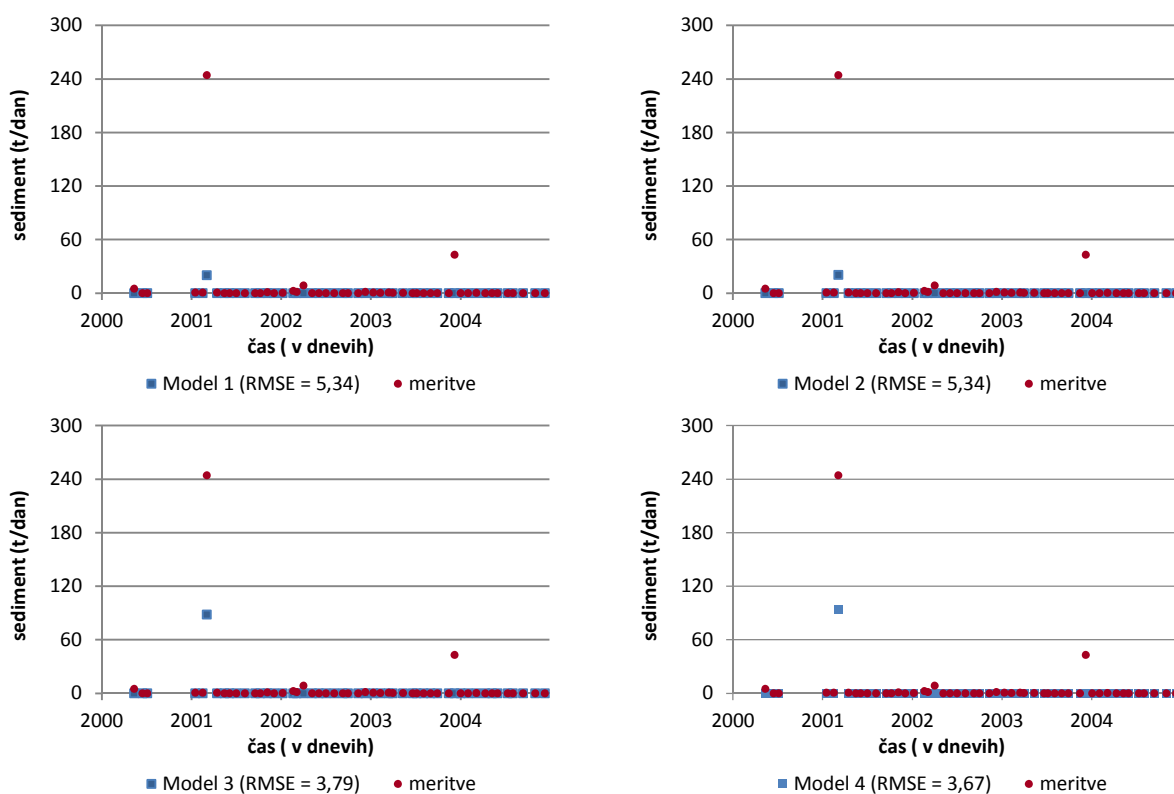
Preglednica 32: Primerjava štirih testnih struktur modela kakovosti voda, ki za opis izbranih procesov uporabljajo različne kombinacije matematičnih izrazov.

Table 32: Comparison of four water quality model structures using different combinations of mathematical expressions to describe the selected processes.

Proces	Model			
	1	2	3	4
Odplavljanje sedimenta	Haith	Haith	Williams	Williams
Obremenitev z dušikom v vezani obliki z urbanih površin	Haith	USGS	USGS	Haith
Obremenitev s fosforjem v vezani obliki z urbanih površin	Haith	USGS	USGS	Haith

Pri prvih dveh modelih (1 in 2) smo umerjali po 56 parametrov. Umerjanje je trajalo približno 113 minut, skupno pa je bilo izvedenih 56.000 računskih iteracij. Pri modelih 3 in 4 je umerjanje 51 parametrov trajalo približno 94 minut, pri čemer je bilo skupno izvedenih 51.000 računskih iteracij. V vseh primerih smo uporabili osebni računalnik s procesorjem i7 2600K, frekvenco 3,40 GHz in delovnim pomnilnikom 8 GB.

Kot rezultat smo dobili štiri strukture modela kakovosti voda z umerjenimi parametri. Vsaki strukturi je bila avtomatsko pripisana izračunana vrednost RMSE (priloga G). V nadaljevanju smo izvedli simulacijo vseh štirih izbranih modelov, pri čemer je simulacija vsakega izmed njih trajala približno 1 sekundo.

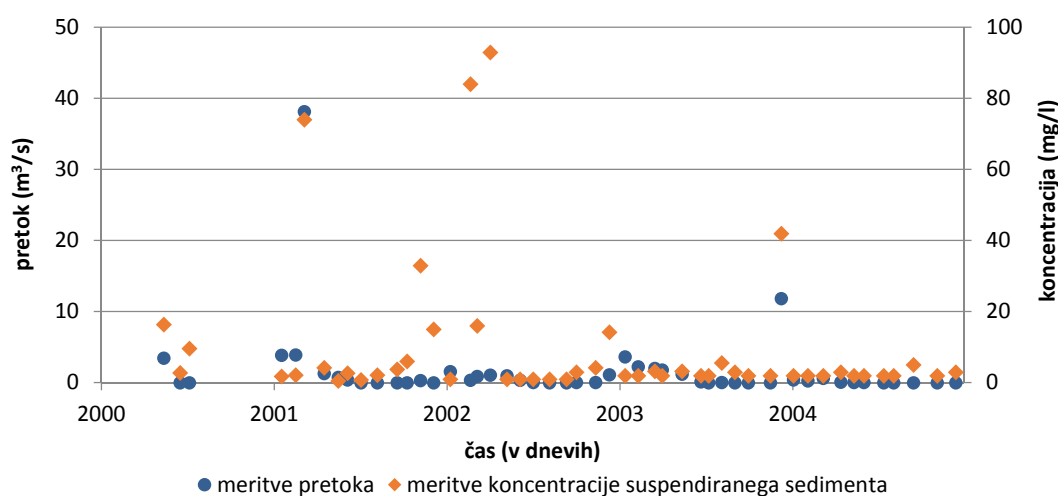


Slika 40: Primerjava rezultatov štirih testnih modelov kakovosti voda in dnevni obremenitev s suspendiranim sedimentom (v t/dan), izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, za obdobje 2000–2004.

Figure 40: Comparison between the results of the four water quality models and the daily suspended sediment loads (in t/day), measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2000–2004.

Slika 40 prikazuje primerjavo izračunanih in merjenih dnevni obremenitev s suspendiranim sedimentom, posebej za vsako izmed obravnavanih modelnih struktur. Kot smo že omenili, smo obremenitev s suspendiranim sedimentom (v t/dan) izračunali kot produkt v določenem delu dneva izmerjene koncentracije suspendiranega sedimenta (v mg/l) in povprečnega dnevnega pretoka (v m³/s).

Iz grafov je razvidno pomanjkanje variabilnosti v podatkih, uporabljenih za umerjanje, in posledično tudi v rezultatih modela. Razloge za pomanjkanje dinamike gre iskati v tem, da je bila večina meritev koncentracij suspendiranega sedimenta izvedena pri nizkih povprečnih dnevni pretokih, kar je razvidno tudi iz slike 41. V obdobju med letoma 2000 in 2004 sta bila tako dejansko evidentirana le dva omembe vredna dogodka s povprečnim dnevnim pretokom nad 10 m³/s in izmerjeno koncentracijo suspendiranega sedimenta nad 40 mg/l. Prvega izmed obeh evidentiranih dogodkov z dne 5. marca 2001 bolje opišeta modela 3 in 4, ki za izračun odplavljanja sedimenta uporabljata Williamsovo enačbo, medtem ko drugega evidentiranega dogodka z dne 10. decembra 2003 ne ujamemo z nobenim izmed štirih testnih modelov.



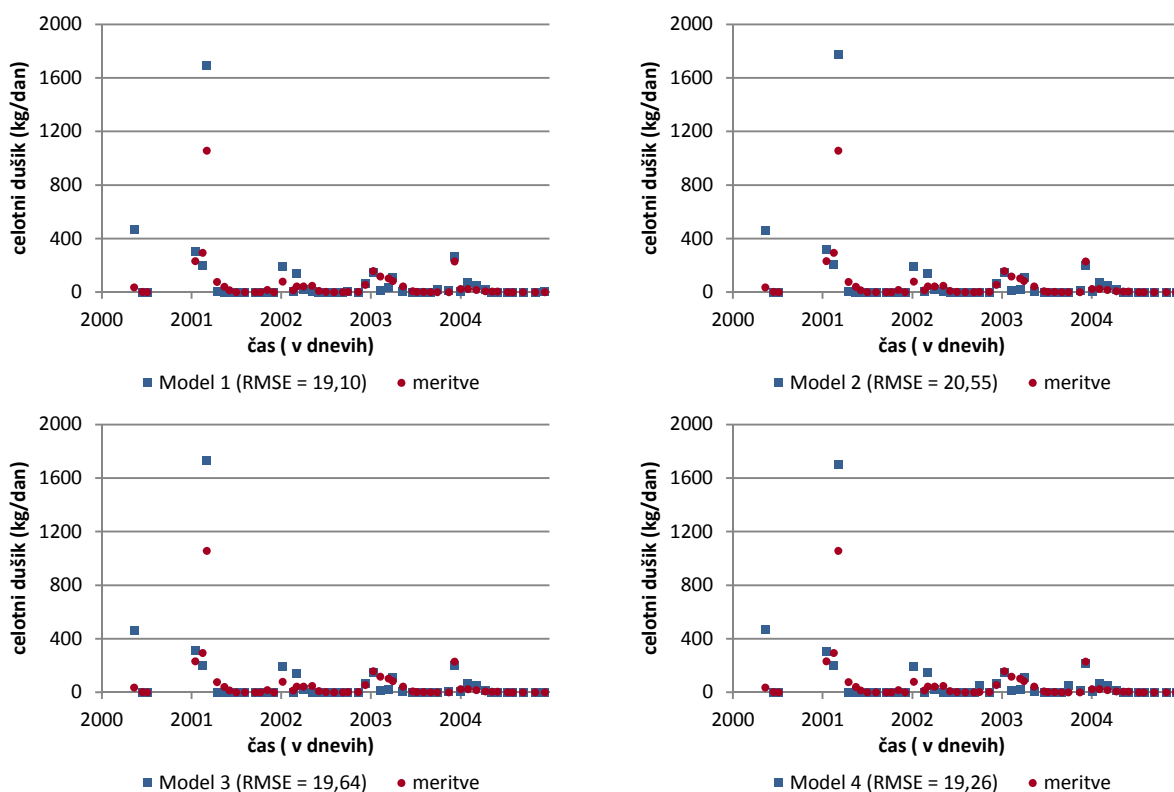
Slika 41: Prikaz povprečnih dnevni pretokov (m³/s) in koncentracij suspendiranega sedimenta (mg/l), izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, v obdobju med letoma 2000 in 2004.

Figure 41: Average daily flow rates (m³/s) and suspended sediment concentrations (mg/l), measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2000–2004.

Slika 42 prikazuje primerjavo izračunanih in merjenih dnevni obremenitev s celotnim dušikom (v kg/dan), posebej za vsako izmed obravnavanih modelni struktur. Razvidno je, da vsi modeli dobro sledijo dinamiki meritev. Slednja je močno povezana z dinamiko letni časov, pri čemer so koncentracije celotnega dušika v reki Quarteiri v zimskem obdobju višje kot v poletni meseci.

Zanimivo je, da so bile pri vseh štirih modelih vrednosti parametra c_{Usle} , ki nastopa v izračunu količine odplavljenega sedimenta, v podrazdelkih `sub1.rural` in `sub1.natural` nižje napram vrednostim v podrazdelkih `sub2.rural` in `sub2.natural` (glej prilogo G). Nižje vrednosti parametra v podrazdelkih `sub1.rural` in `sub1.natural` so tehnično gledano posledica umerjanja na relativno nizke obremenitve vodotoka s suspendiranim sedimentom, h katerim prispeva le razdelek `sub1` (porečje Quarteire brez depresije Nave do Barão), praktično pa nam povedo, da se območje

depresije Nave do Barão bistveno razlikuje od preostalega porečja z vidika pokrovnosti in načina obdelave tal.



Slika 42: Primerjava rezultatov štirih testnih modelov kakovosti voda in dnevnih obremenitev s celotnim dušikom (kg/dan), izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, v obdobju 2000–2004.

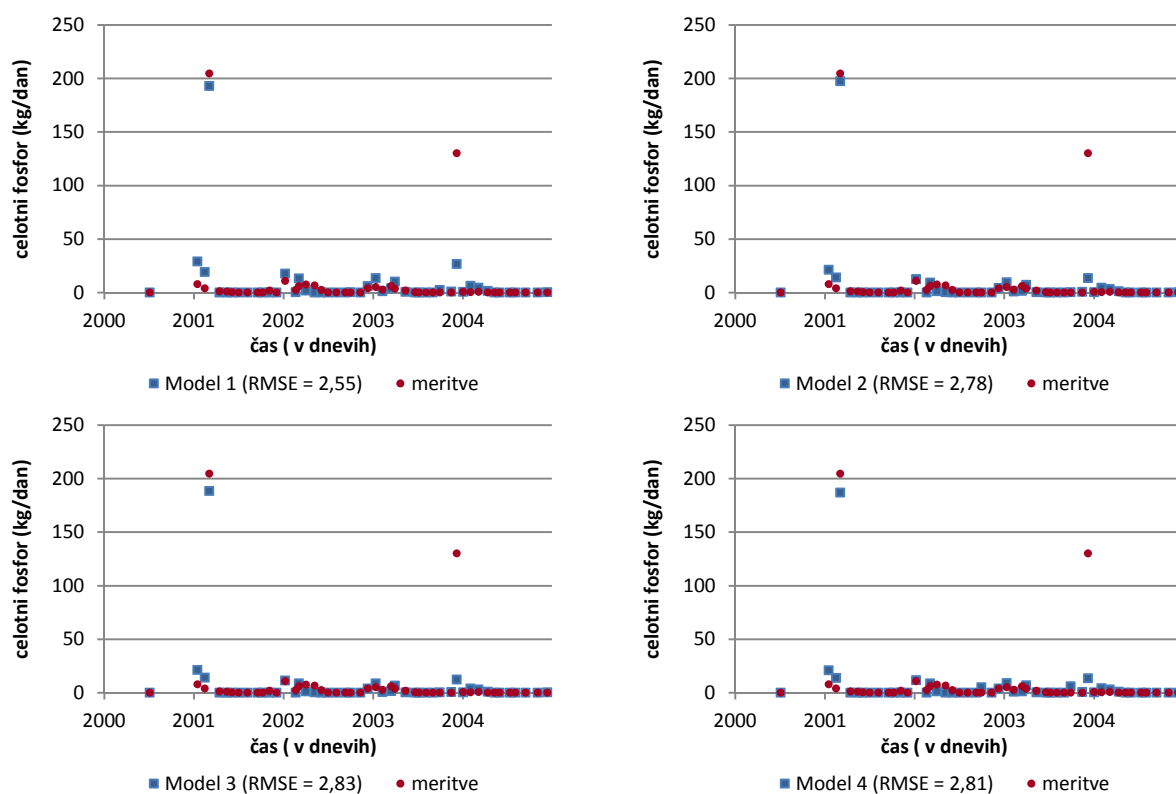
Figure 42: Comparison between the results of the four water quality models and the daily total nitrogen loads (kg/day), measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2000–2004.

Večja odstopanja med merjenimi in simuliranimi vrednostmi celotnega dušika v začetku opazovanega obdobja izhajajo iz neujemanja rezultatov izbranega hidrološkega modela z merjenimi pretoki (slika 36). Analiza dogodkov, ki sta se zgodila 12. maja 2000 in 5. marca 2001, je pokazala, da je bil dejanski izmerjen povprečni dnevni pretok precej nižji od simuliranega, kar pomeni, da smo z izbranim hidrološkim modelom v primeru obeh obravnavanih dogodkov precenili količino površinskega in/ali baznega odtoka. Posledično je bila višja tudi izračunana dnevna obremenitev s celotnim dušikom.

Razmerja med umerjenimi vrednostmi parametrov, ki nastopajo v izračunu obremenitve vodotoka s celotnim dušikom, kažejo na to, da so povprečne dnevne koncentracije dušika v baznem odtoku načeloma višje napram koncentracijam v površinskem odtoku (priloga G). Opazimo lahko tudi to, da so koncentracije višje v podrazdelkih s prevladujočo kmetijsko rabo (*sub1.rural* in *sub2.rural*),

nižje pa v podrazdelkih z naravnim pokrovom (*sub1.natural* in *sub2.natural*). Na problematiko visokih koncentracij dušika (natančneje nitrata) v podtalnici na območju pokrajine Algarve sta opozorila že Ribeiro in Veiga da Cunha (2010), pri čemer sta kot glavnega krivca za omenjeno stanje navedla prav kmetijsko dejavnost.

Slika 43 prikazuje primerjavo izračunanih in merjenih dnevnih obremenitev s celotnim fosforjem (v kg/dan), posebej za vsako izmed obravnavanih modelnih struktur. Razvidno je, da se modeli dobro odzivajo na sezonsko dinamiko merjenih količin celotnega fosforja v reki Quarteiri. Večje odstopanje med izmerjeno in simulirano vrednostjo opazimo samo v primeru dogodka z dne 10. decembra 2003, ko je bilo slabše tudi ujemanje med merjeno in simulirano dnevno obremenitvijo s suspendiranim sedimentom (slika 40). Tovrstno neujemanje potrjuje povezavo med dinamiko suspendiranega sedimenta in fosforja, za katerega je značilno, da se v okolju prednostno premika adsorbiran na delcih sedimenta.



Slika 43: Primerjava rezultatov štirih testnih modelov kakovosti voda in dnevnih obremenitev s celotnim fosforjem (v kg/dan), izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, za obdobje 2000–2004.

Figure 43: Comparison between the results of the four water quality models and the daily total phosphorus loads (in kg/day), measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2000–2004.

Razmerja med umerjenimi vrednostmi parametrov, ki nastopajo v izračunu obremenitve vodotoka s celotnim fosforjem, kažejo na to, da so povprečne dnevne koncentracije fosforja v baznem odtoku pogosto nižje napram koncentracijam v površinskem odtoku. Slednje je skladno z ugotovitvami, da se fosfor zaradi sorpcijske kapacitete tal in slabe mobilnosti v veliki meri zadrži v zgornjih plasteh tal in posledično ni problematičen z vidika onesnaževanja podtalnice (Smolen, 2007). Opazimo lahko tudi to, da so koncentracije višje v podrazdelkih s prevladujočo kmetijsko rabo (*sub1.rural* in *sub2.rural*), nižje pa v podrazdelkih z naravnim pokrovom (*sub1.natural* in *sub2.natural*).

Oceno napovedne sposobnosti testnih modelov kakovosti voda smo podali na osnovi vrednosti izbranih statističnih kriterijev (glej preglednico 33). Ob tem je potrebo opozoriti, da so razponi vrednosti parametra PBIAS v primeru ocenjevanja modelov kakovosti nekoliko drugačni kot v primeru ocenjevanja hidroloških modelov (preglednica 26).

Preglednica 33: Ocena napovedne sposobnosti modela kakovosti voda na podlagi vrednosti izbranih statističnih kriterijev (prirejeno po Moriasi in sod., 2007 in Van Liew in sod., 2003).

Table 33: Water quality model performance ratings for the selected statistical indicators (adapted from Moriasi et al., 2007, and Van Liew et al., 2003).

Napovedna sposobnost modela	r in NS	PBIAS	RSR
zelo dobra	0,75–1,00	< ±25	0–0,5
dobra	0,65–0,75	±25 – ±40	0,5–0,6
zadovoljiva	0,50–0,65	±40 – ±70	0,6–0,7
nezadovoljiva	< 0,5	> ±70	> 0,7

V preglednici 34 je podana primerjava vrednosti statističnih kriterijev za vse štiri strukture modela, pri čemer smo napovedno sposobnost posameznega modela obravnavali posebej za sediment, celotni dušik in celotni fosfor. Iz preglednice je razvidno, da v primeru napovedovanja obremenitev s suspendiranim sedimentom modela 3 in 4, ki za izračun odplavljanja sedimenta uporabljata Williamsovo enačbo, dosežata boljše ujemanje rezultatov modela z meritvami. Glede na to, da je glavna razlika med Haithovo in Williamsovo enačbo za izračun odplavljanja sedimenta v tem, da druga namesto dejavnika erozivnosti padavin upošteva erozivnost površinskega odtoka, lahko sklepamo, da na prispevnem območju reke Quarteire odplavljanje sedimenta bolj sledi dinamiki površinskega odtoka kot pa dinamiki padavin.

Analiza vrednosti izbranih statističnih kriterijev za oceno uspešnosti napovedovanja obremenitev s celotnim dušikom pokaže, da smo z modeloma 1 in 4, ki za račun obremenitev z dušikom z urbanih površin uporabljata Haithovo enačbo, dosegli nekoliko boljše ujemanje rezultatov modela z meritvami. Haithova enačba v nasprotju z USGS enačbo, ki temelji zgolj na empirično določenih regresijskih koeficientih, upošteva funkcijo eksponentnega kopičenja in spiranja, ki sledi določenim

fizikalnim zakonitostim. Iz preglednice 34 je razvidno tudi to, da so vrednosti statističnih kriterijev NS in RSR za oceno uspešnosti napovedovanja obremenitev s celotnim dušikom podobne vrednostim hidrološkega modela (glej preglednico 27). Glede na to, da je dušik zelo mobilni element, vezan na dinamiko površinskega in baznega odtoka, je vpliv predhodnega umerjanja hidrološkega modela na uspešnosti napovedovanja obremenitev s celotnim dušikom pričakovan.

Preglednica 34: Ocena napovedne sposobnosti štirih testnih modelov kakovosti voda na podlagi primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev, posebej za sediment, celotni dušik in celotni fosfor.

Table 34: Assessment of the ability of the four water quality models under study to predict sediment, total nitrogen and total phosphorus loads, based on the comparison of the selected statistical indicator values.

	Modeli			
<i>Sediment</i>	1	2	3	4
r	0,98	0,98	0,98	0,98
NS	0,15	0,15	0,57	0,60
PBIAS	93,54	93,48	71,74	69,96
RSR	0,92	0,92	0,65	0,63
<i>Celotni dušik</i>				
r	0,95	0,95	0,94	0,94
NS	0,52	0,45	0,50	0,51
PBIAS	-32,55	-32,16	-30,16	-33,39
RSR	0,69	0,74	0,71	0,70
<i>Celotni fosfor</i>				
r	0,89	0,87	0,87	0,89
NS	0,80	0,76	0,75	0,76
PBIAS	14,31	25,90	29,60	27,00
RSR	0,45	0,49	0,50	0,49

Iz primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev je razvidno, da v primeru napovedovanja obremenitev s celotnim fosforjem rezultati vseh testnih modelov dosegajo presenetljivo dobro ujemanje z meritvami. Glede na to, da se fosfor v okolju prednostno premika adsorbiran na delcih sedimenta, in da smo z vsemi modeli dosegli razmeroma slabo ujemanje z merjenimi količinami suspendiranega sedimenta, bi pričakovali slabšo uspešnost napovedovanja celotnega fosforja.

Na podlagi vizualne primerjave rezultatov štirih testnih modelov kakovosti voda in primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev lahko zaključimo, da je izmed štirih testnih struktur modela najboljša tista, ki za izračun odplavljanja sedimenta uporablja Williamsovo enačbo, za določitev obremenitve s hranili z urbanih površin pa Haithovo enačbo (model 4). Iz omenjenega bi lahko sklepali, da uporaba fiksne strukture modela, kot jo ponujajo že uveljavljena orodja za modeliranje kakovosti voda na ravni porečij, ni vedno najbolj optimalna, in da lahko s kombiniranjem različnih matematičnih izrazov dosegamo boljše rezultate.

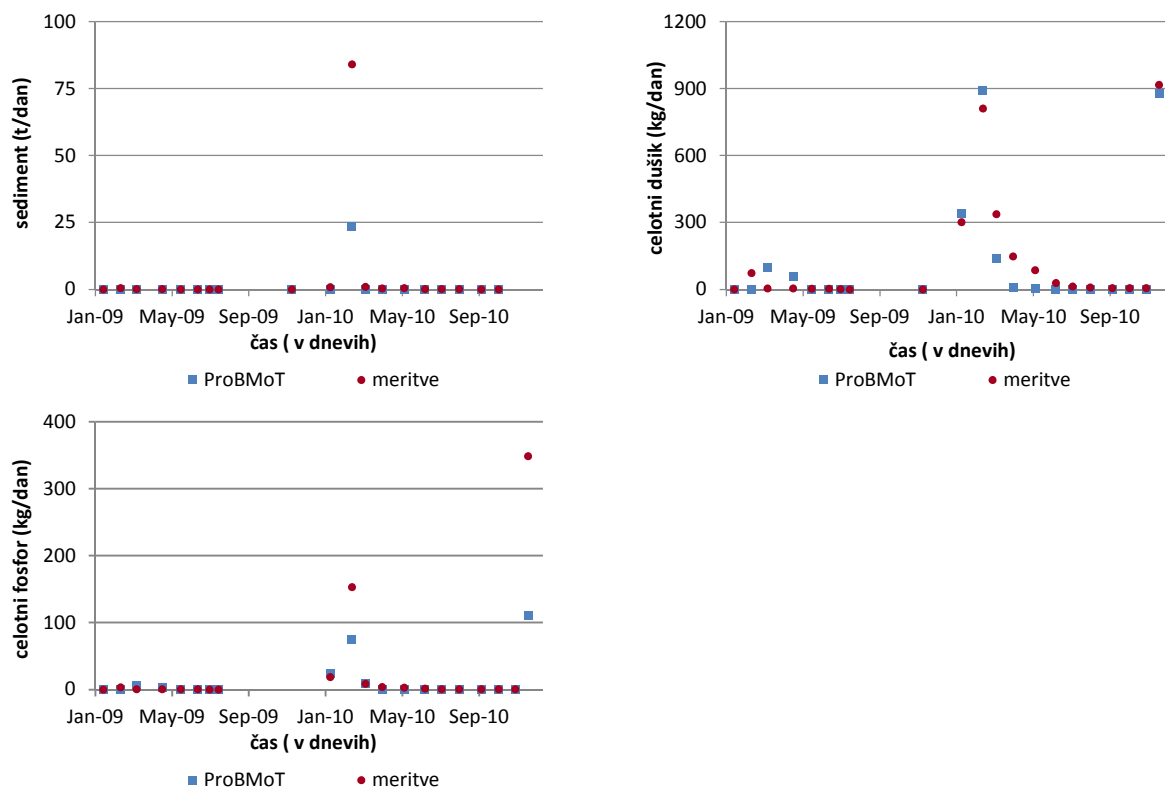
5.3.4 Validacija modela kakovosti voda (obdobje 2009–2010)

Z validacijo smo želeli potrditi uporabnost izbranega modela kakovosti voda, umerjenega na meritve iz prvega opazovanega obdobja (2000–2004). V ta namen smo uporabili novo datoteko z vhodnimi podatki, in sicer za obdobje med letoma 2009 in 2010. Vsebina vhodne datoteke je predstavljena v poglavju 5.3.2. Strukture konceptualnega modela nismo spreminjali. Vse umerjene vrednosti parametrov smo ohranili, spremenili pa smo vrednosti konstant $numberOfInhabitants$, gw_{Tot} in f_{Tot} . Prva konstanta predstavlja število prebivalcev, priključenih na greznice. Glede na to, da je v validacijskem obdobju začela obratovati dodatna ČN (Parragil, glej preglednico 21), se je število priključkov na ČN povečalo, število prebivalcev, priključenih na greznice, pa se je posledično zmanjšalo. Konstanta gw_{Tot} zajema povprečno letno količino baznega odtoka, konstanta f_{Tot} pa povprečno letno količino vode v vodotoku. Obe vrednosti smo za obdobje med letoma 2009 in 2010 izračunali na podlagi rezultatov umerjenega in validiranega hidrološkega modela.

Na sliki 44 so prikazani rezultati validacije in njihova primerjava z dnevnimi količinami sedimenta, celotnega dušika in celotnega fosforja, izmerjenimi na postaji Ponte Rodoviária. Iz grafa, ki predstavlja primerjavo merjenih in izračunanih obremenitev s sedimentom (v t/dan), je razvidno, da z modelom ne ujamemo visoke izmerjene konice z dne 23. februarja 2010. Omenjeno neujemanje je posledica umerjanja modela na nizke izmerjene vrednosti v obdobju med letoma 2000 in 2004, z občutnim pomanjkanjem variabilnosti v podatkih.

Iz primerjave izračunanih in merjenih dnevnih obremenitev s celotnim dušikom (v kg/dan) je razvidno, da model sledi dinamiki letnih časov. Odstopanja med merjenimi in simuliranimi vrednostmi celotnega dušika izhajajo iz neujemanja rezultatov izbranega hidrološkega modela z merjenimi pretoki. Analiza dogodka z dne 17. marca 2010, ko je bilo omenjeno neujemanje največje, je pokazala, da je bil dejanski izmerjen povprečni dnevni pretok (4,95 m³/s) za 24,4 % višji od simuliranega (3,74 m³/s), kar pomeni, da smo z izbranim hidrološkim modelom podcenili količino površinskega in/ali baznega odtoka. Posledično je bila nižja tudi izračunana dnevna obremenitev s celotnim dušikom.

Slika 44 prikazuje tudi primerjavo izračunanih in merjenih dnevnih obremenitev s celotnim fosforjem (v kg/dan). Razvidno je, da se model odziva na povišanje obremenitev v zimskih mesecih. Večje odstopanje med izmerjeno in simulirano vrednostjo opazimo v primeru dveh dogodkov, ki sta se zgodila 23. februarja 2010 in 7. decembra 2010. Oba dogodka sovpadata s podcenjeno obremenitvijo vodotoka s suspendiranim sedimentom.



Slika 44: Primerjava rezultatov validacije izbranega modela kakovosti voda z dnevnimi obremenitvami s suspendiranim sedimentom (t/dan), celotnim dušikom (kg/dan) in celotnim fosforjem (kg/dan). Obremenitve so bile izmerjene na postaji Ponte Rodoviária, v obdobju 2009–2010.

Figure 44: Comparison between the validation results for the selected hydrological model and the daily suspended sediment (t/day), total nitrogen (kg/day) and total phosphorus (kg/day) loads, measured between 2009 and 2010 at the Ponte Rodoviária station.

V preglednici 35 je podana primerjava vrednosti statističnih kriterijev za obdobji umerjanja (2000–2004) in validacije (2009–2010). Iz preglednice je razvidno, da v primeru napovedovanja obremenitev s suspendiranim sedimentom dosežemo slabše ujemanje rezultatov modela z meritvami napram obdobju umerjanja. Ob tem je potrebno poudariti, da so nižje vrednosti NS ter višje vrednosti PBIAS in RSR posledica neujemanja med merjenimi in simuliranimi vrednostmi v primeru enega samega dogodka z dne 23. februarja 2010.

Vrednosti izbranih statističnih kriterijev za oceno uspešnosti napovedovanja obremenitev s celotnim dušikom kažejo na zelo dobro ujemanje rezultatov validacije z dejanskimi meritvami. V primerjavi z obdobjem umerjanja smo dosegli izboljšanje vrednosti vseh statističnih parametrov. Podoben vzorec smo opazili že pri validaciji hidrološkega modela (glej preglednico 28), kar še dodatno potrjuje povezavo med površinskim in baznim odtokom ter mobilnostjo dušika.

Preglednica 35: Primerjava vrednosti statističnih kriterijev za izbrani model kakovosti voda, posebej za obdobji umerjanja (2000–2004) in validacije (2009–2010).

Table 35: Comparison of the statistical indicator values obtained for the selected water quality model, for the calibration (2000–2004) and validation period (2009–2010)

<i>Sediment</i>	Umerjanje (2000–2004)	Validacija (2009–2010)
r	0,98	1,00
NS	0,60	0,45
PBIAS	69,96	73,23
RSR	0,63	0,74
<i>Celotni dušik</i>		
r	0,94	0,97
NS	0,51	0,93
PBIAS	-33,39	12,19
RSR	0,70	0,26
<i>Celotni fosfor</i>		
r	0,89	0,97
NS	0,76	0,52
PBIAS	27,00	57,83
RSR	0,49	0,70

Iz preglednice 35 je razvidno, da smo v primeru napovedovanja obremenitev s celotnim fosforjem dosegli poslabšanje vrednosti izbranih statističnih kriterijev napram obdobju umerjanja (z izjemo parametra *r*). Poslabšanje ocene napovedne uspešnosti modela je podobno poslabšanju ocene uspešnosti napovedovanja obremenitev s suspendiranim sedimentom. Slednje potrjuje povezavo med dinamiko suspendiranega sedimenta in fosforja, za katerega je značilno, da se v okolju prednostno premika adsorbiran na delcih sedimenta.

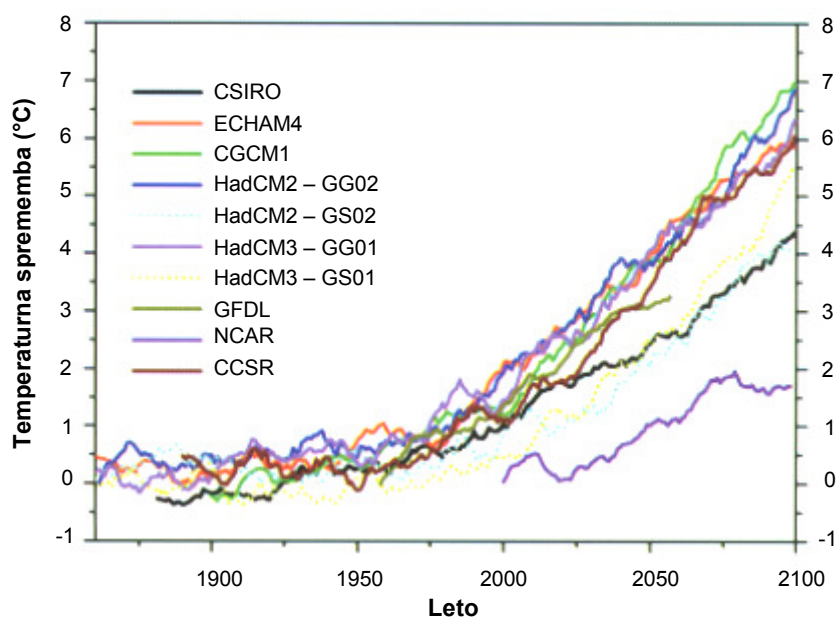
5.4 Preigravanje različnih scenarijev

Modeli, ki smo jih generirali z orodjem ProBMoT, nam lahko pomagajo pri razumevanju obnašanja opazovanega sistema. Z umerjenim (in validiranim) modelom izbranega porečja lahko preigramo različne scenarije, pri čemer ugotavljamo, kakšen učinek bi imela določena sprememba na količinsko in kakovostno stanje voda v izbranem porečju. Spremembe, katerih vplive lahko preiskujemo z našimi modeli, vključujejo podnebne spremembe, spremembe namembnosti oz. rabe zemljišč, ki imajo za posledico spremembo režima površinskega in podpovršinskega toka vode, spremembe v načinu odvajanja odpadne vode (npr. povečanje števila priključkov na ČN in posledično zmanjšanje števila greznic oz. izboljšanje stopnje čiščenja obstoječih ČN) ter spremembe v načinu kmetovanja (npr. prepoved uporabe gnojil ali uvedba drugačnih postopkov obdelave tal).

Z našimi modeli smo testirali dva scenarija: 1) scenarij podnebnih sprememb in 2) scenarij povečanja števila priključkov na obstoječe ČN. Rezultate obeh scenarijev smo primerjali z osnovnim scenarijem za referenčno obdobje 2000–2004 (glej poglavje 6).

5.4.1 Scenarij 1: Podnebne spremembe

Prvi scenarij temelji na dosedanjih raziskavah o vplivu podnebnih sprememb na območju Sredozemlja. Giorgi (2006) je v svoji študiji na podlagi projekcij dvajsetih globalnih klimatskih modelov, ki upoštevajo emisijske scenarije A1B, A2 in B1 (IPCC, 2000), podal odstotek spremembe v padavinah (v %) za 26 svetovnih regij, posebej za mokre (oktober–marec) in suhe (april–september) mesece. Sprememba je bila podana za obdobje 2080–2099 na podlagi primerjave z referenčnim obdobjem 1960–1979. Po ocenah Giorgija naj bi se v Sredozemlju v stotih letih povprečna količina padavin v mokrih mesecih zmanjšala za 9,73 %, v suhih mesecih pa kar za 21,58 %.



Slika 45: Napovedane spremembe povprečnih temperatur na Iberskem polotoku – primerjava projekcij različnih globalnih klimatskih modelov (prirejeno po Santos in sod., 2001).

Figure 45: Predicted evolution of the mean temperature in the Iberian Peninsula – comparison of the projections made by different global climate models (adapted from Santos et al., 2001).

S posledicami podnebnih sprememb na Portugalskem so se ukvarjali tudi v sklopu projekta Climate Change in Portugal – Scenarios, Impacts and Adaptation Measures (SIAM, Santos in sod., 2001). Rezultati projekcij uporabljenih globalnih klimatskih modelov kažejo na to, da bi lahko na jugu Portugalske spremembe v količini padavin ob koncu 21. stoletja znašale do 200 mm/leto. V sklopu projekta SIAM so bile podane tudi pričakovane spremembe v povprečnih temperaturah. Na podlagi

rezultatov uporabljenih klimatskih modelov naj bi se povprečne temperature na območju Iberskega polotoka do leta 2100 dvignile za 1,7 do 7 °C (slika 45).

Z našim prvim scenarijem smo želeli preveriti vpliv pričakovanih podnebnih sprememb na količinsko stanje površinskih in podzemnih voda v porečju reke Quarteire, in sicer za obdobje med letoma 2095 in 2099. V ta namen smo uporabili umerjen in validiran hidrološki model, predstavljen v poglavju 5.2. Umerjenih vrednosti parametrov modela nismo spreminjali, spremenili pa smo vrednosti določenih vhodnih spremenljivk. Kot osnovo smo uporabili povprečne dnevne padavine in temperature, izmerjene v obdobju med letoma 2000 in 2004. Ob predpostavki linearnega trenda zmanjševanja količine padavin med obdobjema 1960–1979 in 2080–2099 ter ob upoštevanju sprememb v padavinah, ki jih je v svoji študiji podal Giorgi (2006), smo dnevne višine padavin v mokrih mesecih znižali za 6,7 %, v suhih mesecih pa za 15,5 %. Povprečne dnevne temperature smo povišali za 4,23 °C. Omenjena vrednost predstavlja povprečno napoved temperaturnih sprememb med letoma 2000 in 2100, izračunano na podlagi rezultatov desetih različnih globalnih klimatskih modelov (slika 45; Santos in sod., 2001). Temu primerno smo povišali tudi vrednosti minimalnih in maksimalnih dnevnih temperatur ter ponovno izračunali vrednosti nasičenega parnega tlaka (enačba (9)). Potrebno je opozoriti, da bi za bolj natančno ugotavljanje vpliva podnebnih sprememb poleg pričakovanih višin padavin in temperatur potrebovali tudi podatke o pričakovanem sončnem obsevanju.

5.4.2 Scenarij 2: Sprememba števila priključkov na obstoječe čistilne naprave

Države Evropske Skupnosti so se s sprejetjem evropske vodne direktive (Direktiva 2000/60/ES) zavezale, da bodo do leta 2015 uredile sistem odvajanja in čiščenja odpadnih voda z občutljivejših območij, z vseh ostalih območij pa do leta 2017. To pomeni, da se bodo morala vsa gospodinjstva z možnostjo priključitve na javni kanalizacijski sistem nanj tudi priključiti. Na redkeje poseljenih območjih, kjer gradnja javne kanalizacije ni ekonomsko upravičena, bodo morali lastniki objektov sami poskrbeti za namestitev malih čistilnih naprav (MČN).

Na podlagi analize pridobljenih statističnih podatkov (glej poglavje 5.1.6) živi v porečju reke Quarteire 10.306 prebivalcev. Od tega je 28 % prebivalcev priključenih na ČN, za preostalih 72 % pa smo predpostavili, da imajo lastne greznice. Obstoječe ČN so dimenzionirane za 800 do 2.500 PE (preglednica 21) in so po naših izračunih podobremenjene. Najbolj podobremenjena je ČN Querença (samo 4,4 % izkoriščenost), najbolj pa ČN Salir (58,3 % izkoriščenost) – glej preglednico 36.

Preglednica 36: Podatki o kapacitetah čistilnih naprav v porečju reke Quarteire, ocenjenem številu priključenih prebivalcev in procentu izkoriščenosti naprav (za obdobje 2000–2004).

Table 36: Capacities of wastewater treatment plants located within the Quarteira river catchment, estimated number of connected inhabitants, and treatment plant utilization rates (for the period 2000–2004).

	Salir	Querença	Tôr	Benafim	Alte	Paderne
Kapaciteta (PE)	1.500	1.000	800	1.000	1.000	2.500
Število priključenih prebivalcev	875	44	298	244	510	714
Izkoriščenost naprav (%)	58,3	4,4	37,3	24,4	51	28,6

PE: populacijski ekvivalent

Z drugim scenarijem smo želeli preveriti vpliv povečanja števila priključkov na ČN na obremenitev reke Quarteire s celotnim dušikom in fosforjem. V ta namen smo predpostavili 80 % izkoriščenost vseh obstoječih ČN, pri čemer bi na greznice ostalo priključenih le še 3.776 prebivalcev. Priključenost prebivalcev na greznice bi se tako v primerjavi z osnovnim scenarijem zmanjšala za 49 %. Za potrebe scenarija smo uporabili umerjen in validiran model kakovosti voda, predstavljen v poglavju 5.3. Kot osnovo smo uporabili meteorološke in hidrološke podatke za obdobje med letoma 2000 in 2004. V datoteki z vhodnimi podatki smo za vsak posamezen podrazdelek spremenili vrednosti neodvisnih spremenljivk `psDN.load` in `psDP.load`, ki predstavljata dnevno obremenitev s celotnim dušikom in fosforjem iz čistilnih naprav. V konceptualnem modelu smo v posameznih podrazdelkih spremenili vrednosti konstant `numberOfInhabitants`, in sicer skladno z novim (zmanjšanim) številom prebivalcev, priključenih na greznice. Ostalih (umerjenih) vrednosti parametrov modela nismo spreminjali.

6 REZULTATI

Rezultate osnovnega modelnega scenarija za porečje reke Quarteire in obdobje 2000–2004 smo primerjali z rezultati scenarijev 1 in 2. Pri scenariju 1, s katerim ugotavljamo vpliv pričakovanih podnebnih sprememb na količinsko stanje voda, smo primerjali vodni bilanci referenčnega obdobja 2000–2004 in obdobja 2095–2099. Primerjava osnovnega scenarija in scenarija 2, pri katerem smo upoštevali povečano število priključkov na ČN, je temeljila na povprečnih letnih obremenitvah s sedimentom (t/dan), celotnim dušikom (kg/dan) in celotnim fosforjem (kg/dan) na iztoku iz porečja reke Quarteire.

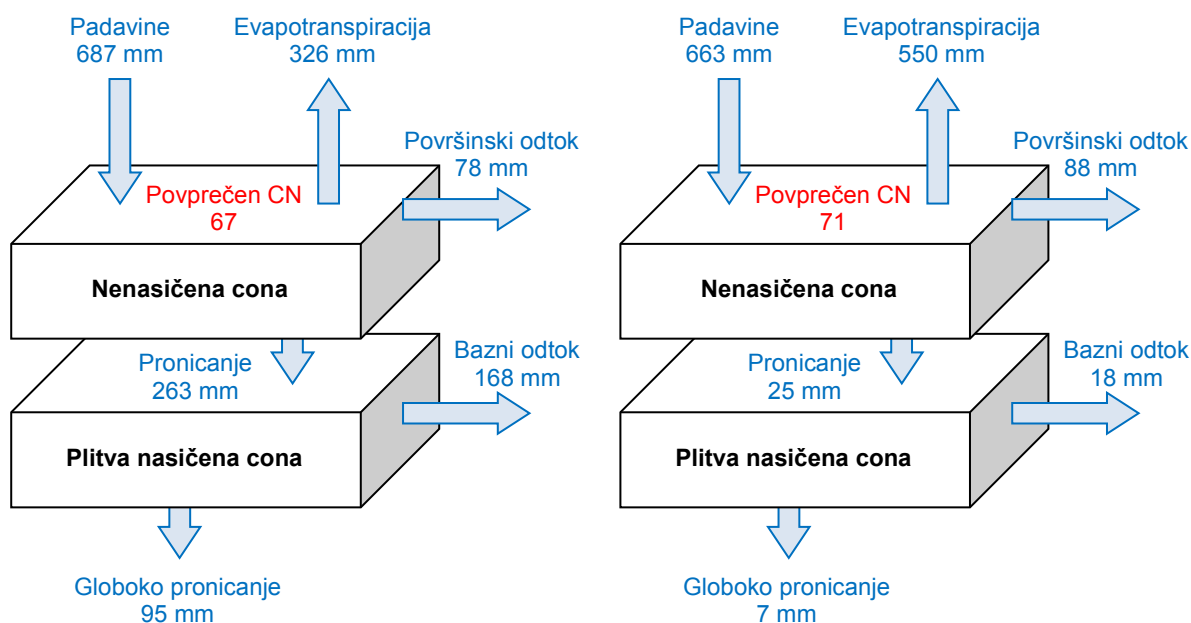
6.1 Osnovni scenarij

Na sliki 46 sta prikazani povprečni letni vodni bilanci porečja reke Quarteire in depresije Nave do Barão (za obdobje 2000–2004), izračunani na osnovi rezultatov najboljšega hidrološkega modela, modela 29 (glej poglavje 5.2.3). Iz rezultatov je razvidno, da se v porečju reke Quarteire 47 % zapadlih padavin izgubi v procesu evapotranspiracije, 38 % padavin pronica v podtalje, 11 % površinsko odteče, 4 % pa se zadržijo v nenasičeni coni tal. Glede na to, da naj bi po ocenah raziskovalcev na obravnavanem območju delež vode, ki pronica v podtalje, znašal do 50 % zapadlih padavin (Stigter in sod., 2009), je izračunan visok delež pronicanja v skladu s pričakovanji. 68 % vode, ki pronica v podtalje, preko baznega odtoka prispeva k pretoku reke Quarteire, preostalih 32 % pa se trajno izgublja in prispeva k vodni bilanci sosednjih porečij.

Že iz slike 27 je razvidno, da naj bi na območju depresije Nave do Barão v primerjavi s celotnim porečjem reke Quarteire v podtalje pronicalo manj padavin. Ocenjena vrednost je 5 % (Stigter in sod., 2009). Z našim modelom smo se tej vrednosti uspeli popolnoma približati, saj sodeč po rezultatih modela v podtalje pronica 4 % zapadlih padavin. Na splošno je izračunana vodna bilanca depresije Nave do Barão skladna z opisom Salvadorja s sod. (2012). Slednji navaja, da se voda, generirana na območju depresije, površinsko zadržuje. Velik del zadržane vode se izgubi v procesu evapotranspiracije, preostanek pa počasi pronica v podtalje.

Na sliki 47 je prikazana primerjava vodnih bilanc po posameznih podrazdelkih. Iz slike je razvidno, da na območju urbanih površin (podrazdelek `sub1.urban`) prevladujeta bazni in površinski odtok, medtem ko je evapotranspiracije razmeroma malo. Na območju kmetijskih površin in površin z naravnim pokrovom se največ padavin izgublja v procesu evapotranspiracije. Vodni bilanci obeh naravnih območij (`sub1.natural` in `sub2.natural`) sta si zelo podobni, medtem ko se bilanci območij s prevladujočo kmetijsko rabo (`sub1.rural` in `sub2.rural`) nekoliko razlikujeta. Kot smo

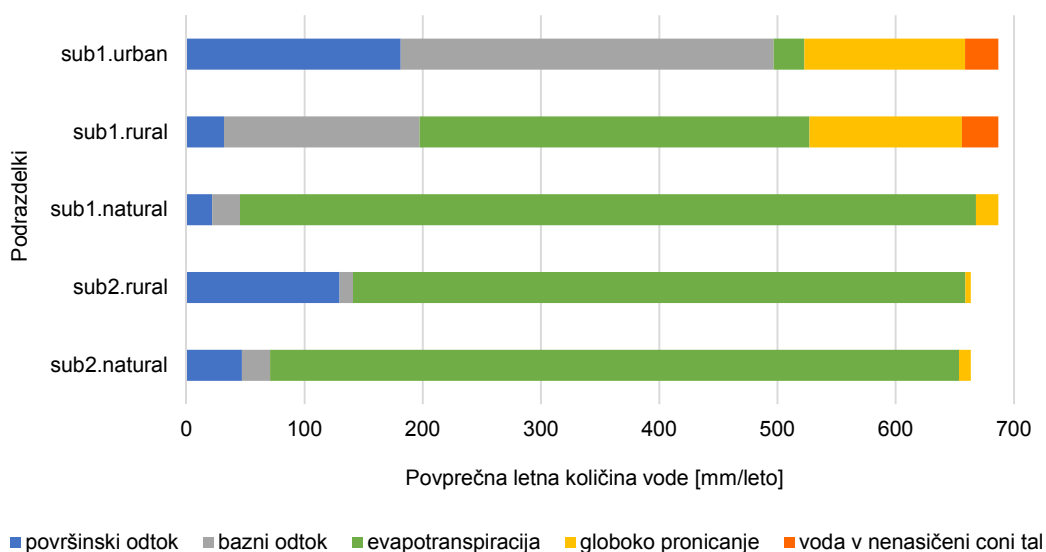
že omenili, je na območju depresije Nave do Barão (*sub2*) bistveno manj pronicanja v podtalje, zato je delež baznega odtoka in globokega pronicanja na območju podrazdelka *sub2.rural* razmeroma majhen v primerjavi s podrazdelkom *sub1.rural*. Ker leži celotno območje depresije Nave do Barão na tleh, ki jih uvrščamo v hidrološko skupino D, so na območju podrazdelka *sub2.rural* pričakovane višje vrednosti parametra CN in posledično površinskega odtoka. Zanimiva je tudi ugotovitev, da je v porečju reke Quarteire delež globokega pronicanja z urbanih površin in površin s prevladujočo kmetijsko rabo (*sub1.urban* in *sub1.rural*) primerljiv, medtem ko je na območju naravnih površin (*sub1.natural*) globokega pronicanja razmeroma malo. Razloge za to gre iskati v dejstvu, da velik del naravnih površin leži na območju gričevja Serra do Caldeirão, za katerega je značilna nizka prepustnost tal (Salvador in sod., 2012).



Slika 46: Povprečni letni vodni bilanci porečja reke Quarteire (levo) in depresije Nave do Barão (desno), za obdobje 2000–2004.

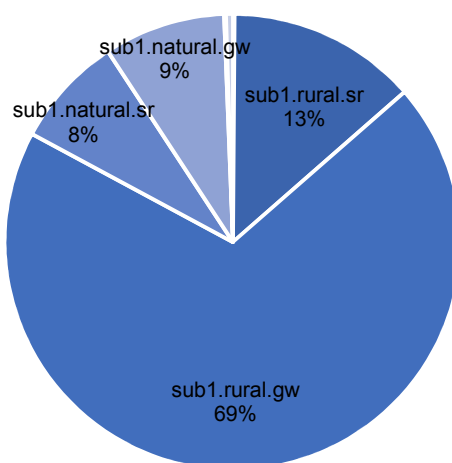
Figure 46: Average annual water balances for the Quarteira river catchment (left) and the Nave do Barão depression (right), for the period 2000–2004.

Analizirali smo tudi prispevke posameznih podrazdelkov k pretoku reke Quarteire (slika 48). K slednjemu največ prispeva bazni odtok s kmetijskih površin (*sub1.rural.gw*), in sicer 69 %. Sledijo prispevki površinskega odtoka s kmetijskih površin (*sub1.rural.sr*, 13 %), baznega odtoka z naravnih površin (*sub1.natural.gw*, 9 %) in površinskega odtoka z naravnih površin (*sub1.natural.sr*, 8 %). Urbane površine (*sub1.urban*) in površine na območju depresije Nave do Barão (*sub2.rural* in *sub2.natural*) k pretoku Quarteire skupno prispevajo le slab procent.



Slika 47: Primerjava povprečnih letnih vodnih bilanc po posameznih podrazdelkih za obdobje 2000–2004. Podrazdelki ponazarjajo hidrološke odzivne enote porečja reke Quarteire s homogeno rabo zemljišč.

Figure 47: Comparison of average annual water balances in different subcompartments, for the period 2000–2004. Subcompartments correspond to the hydrologic response units of the Quarteira river catchment, characterized by homogeneous land use.



Slika 48: Prispevki posameznih podrazdelkov k pretoku reke Quarteire (v %).

Figure 48: Contribution of different subcompartments to the Quarteira river flow (in %).

Povprečno letno obremenitev reke Quarteire s sedimentom (t/leto), celotnim dušikom (kg/leto) in celotnim fosforjem (kg/leto) smo izračunali na osnovi rezultatov najboljšega modela kakovosti voda, modela 4 (glej poglavje 5.3.3). Izračunane količine sedimenta in hranil predstavljajo vsoto prispevkov površinskega in baznega odtoka ter točkovnih izpustov. V preglednici 37 so zbrani podatki za kontrolni prerez na iztoku iz porečja reke Quarteire, na lokaciji merilne postaje Ponte Rodoviária.

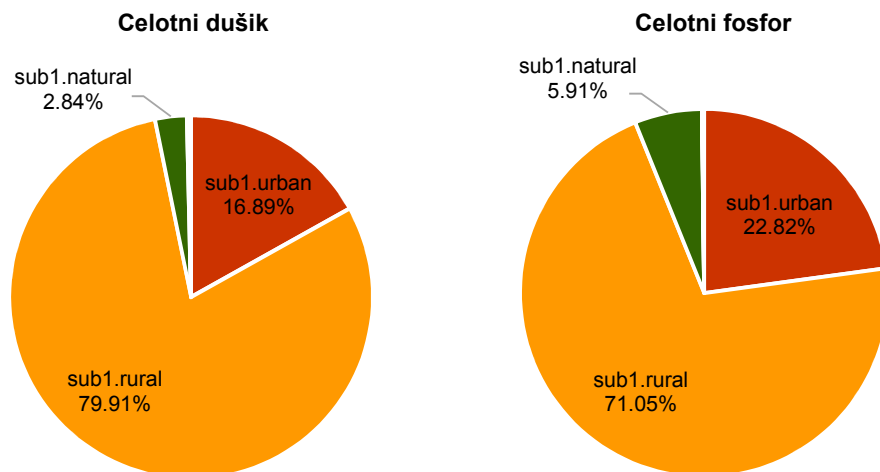
Povprečno letno obremenitev vodotoka s sedimentom, celotnim dušikom in celotnim fosforjem smo preračunali tudi na enoto površine prispevnega območja (t/(ha·leto) oz. kg/(ha·leto)).

Preglednica 37: Povprečna letna obremenitev reke Quarteire s sedimentom, celotnim dušikom in celotnim fosforjem, izračunana na osnovi rezultatov ProBMoT modela.

Table 37: Average annual sediment, total nitrogen and total phosphorus loads transferred to the Quarteira river, calculated based on the ProBMoT model results.

	Povprečna letna obremenitev vodotoka			
	t/leto	t/(ha·leto)	kg/leto	kg/(ha·leto)
Sediment	517	0,02	-	-
Celotni dušik	-	-	22.583	0,75
Celotni fosfor	-	-	1.861	0,06

Iz preglednice 37 je razvidno, da je povprečna letna obremenitev reke Quarteire s sedimentom razmeroma majhna. Slednje je najverjetneje posledica nizke letne količine padavin in dejstva, da leži celotno prispevno območje reke Quarteire na tleh, bogatih z glino. Glede na to, da so tla z visoko vsebnostjo organskih snovi in gline manj podvržena eroziji (Mirsal, 2004), je manjša obremenitev vodotoka s suspendiranim sedimentom pričakovana.

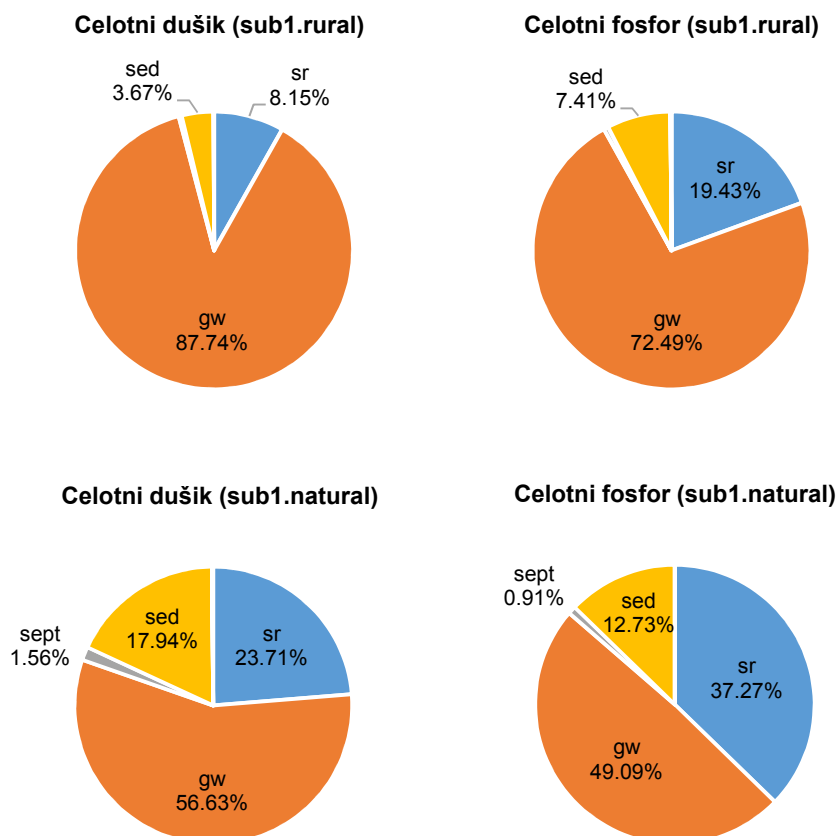


Slika 49: Prispevki posameznih podrazdelkov k obremenitvi reke Quarteire s celotnim dušikom in celotnim fosforjem (v %).

Figure 49: Average annual contribution of different subcompartments to the total nitrogen and total phosphorus loads, transferred to the Quarteira river (in %).

Analizirali smo tudi prispevke posameznih podrazdelkov k obremenitvi reke Quarteire s celotnim dušikom in celotnim fosforjem (slika 49). Največ dušika na letnem nivoju prispevajo kmetijske površine (sub1.rural, 80 %). Sledi prispevek z urbanih površin (sub1.urban, 17 %) in površin z

naravnim pokrovom (*sub1.natural*, 3 %). Površine na območju depresije Nave do Barão (*sub2.rural* in *sub2.natural*) k obremenitvi reke Quarteire s celotnim dušikom prispevajo manj kot en procent. Podobna razmerja med prispevki posameznih podrazdelkov opazimo pri obremenitvah s celotnim fosforjem.



Slika 50: Prispevki površinskega (*sr*) in baznega odtoka (*gw*), spiranja delcev s površja (*sed*) ter iztokov iz greznic (*sept*) k obremenitvi površinskih voda na območju kmetijskih (*sub1.rural*, zgoraj) in naravnih površin porečja reke Quarteire (*sub1.natural*, spodaj) s celotnim dušikom (levo) in celotnim fosforjem (desno), v %.

Figure 50: Contribution of surface runoff (*sr*), baseflow (*gw*), sediment wash-off (*sed*) and septic tank effluents (*sept*) to the total nitrogen (left) and total phosphorus loads (right), transferred to surface waters of the Quarteira river catchment, for rural (*sub1.rural*, above) and natural areas (*sub1.natural*, below), in %.

Na sliki 50 so prikazani prispevki površinskega in baznega odtoka, spiranja delcev s površja ter iztokov iz greznic in čistilnih naprav k obremenitvi površinskih voda na območju kmetijskih (*sub1.rural*) in naravnih površin (*sub1.natural*) s celotnim dušikom in celotnim fosforjem. Urbanih površin (*sub1.urban*) nismo posebej analizirali, ker tam z 99 % prevladuje prispevek spiranja delcev s površja. Iz slike je razvidno, da je na območju kmetijskih površin prevladujoč prispevek baznega odtoka. Nekoliko manj k skupni obremenitvi površinskih voda s hranili prispevata

površinski odtok in spiranje delcev s površja. Greznice k obremenitvi z dušikom prispevajo le 0,36 %, k obremenitvi s fosforjem pa 0,53 %. Še manjši je prispevek čistilnih naprav, ki znaša 0,08 % za celotni dušik in 0,15 % za celotni fosfor.

Prispevek baznega odtoka k obremenitvi površinskih voda s hranili prevladuje tudi na območju naravnih površin, le da je tu v primerjavi s kmetijskimi površinami nekoliko manjši, na račun povečanja prispevkov površinskega odtoka in spiranja delcev s površja. Greznice k obremenitvi z dušikom prispevajo 1,56 %, k obremenitvi s fosforjem pa 0,91 %. Prispevek čistilnih naprav znaša 0,16 % za celotni dušik in 0,15 % za celotni fosfor.

6.2 Scenarij 1

S prvim scenarijem smo želeli preveriti vpliv pričakovanih podnebnih sprememb na količinsko stanje površinskih in podzemnih voda v porečju reke Quarteire, in sicer za obdobje med letoma 2095 in 2099. Scenarij temelji na dosedanjih raziskavah o vplivu podnebnih sprememb na območju Portugalske (Santos in sod., 2001) in širšega Sredozemlja (Giorgi, 2006). Kot osnovo za modeliranje smo uporabili umerjen in validiran hidrološki model, predstavljen v poglavju 5.2, ter povprečne dnevne padavine in temperature, izmerjene v obdobju med letoma 2000 in 2004. Ob predpostavki linearnega trenda manjšanja količine padavin in višanja temperatur smo padavine v mokrih mesecih znižali za 6,70 %, v suhih mesecih pa za 15,50 %, medtem ko smo povprečne dnevne temperature povišali za 4,23 °C.

Preglednica 38: Učinek pričakovanih podnebnih sprememb na vodno bilanco porečja reke Quartere; sprememba povprečnih letnih količin vode glede na osnovni scenarij (v %).

Table 38: Projected climate change impact on the water balance of the Quarteira river catchment; changes in average annual water quantities, as compared to the baseline scenario (in %).

	Osnovni scenarij (mm)	Scenarij 1 (mm)	Sprememba (%)
Padavine	687	617	-10,19
Potencialna evapotranspiracija	982	1.152	17,31
Evapotranspiracija	326	322	-1,23
Površinski odtok	78	61	-21,79
Bazni odtok	168	140	-16,67
Globoko pronicanje	95	76	-20,00

V preglednici 38 so podani podatki o spremembi povprečnih letnih količin vode za obdobje 2095–2099 glede na osnovni scenarij 2000–2004. Razvidno je, da naj bi se do konca 21. stoletja količina povprečnih letnih padavin zmanjšala za 70 mm, kar predstavlja 10,19 %. Posledično naj bi se površinski odtok s porečja reke Quarteire zmanjšal za 21,79 %, bazni odtok pa za 16,67 %. Povišanje

povprečnih dnevni temperatur za 4,23 °C bi imelo za posledico povečanje potencialne evapotranspiracije za 17,31 %. Kljub temu bi se dejanska evapotranspiracija zmanjšala za 1,23 %.

Ob upoštevanju predvidenih podnebnih sprememb bi se povprečni dnevni pretok reke Quarteire zmanjšal za 29,51 %. V mokrih mesecih (oktober–marec) bi se zmanjšal za 25,37 %, v suhih mesecih (april–september) pa kar za 52,50 %.

Na podlagi rezultatov modelnega izračuna lahko sklenemo, da bi imele podnebne spremembe v porečju reke Quarteire, v primeru uresničitve predpostavljenega scenarija, močan vpliv na vodno bilanco. Iz rezultatov je razvidno, da bi se lahko do konca 21. stoletja ob zmanjšanju povprečne letne količine padavin za 70 mm v primerjavi z referenčnim obdobjem 2000–2004 površinski odtok zmanjšal za več kot 20 %, bazni odtok za več kot 15 %, povprečni dnevni pretok reke Quarteire pa za skoraj 30 %. Slednje ima lahko za posledico večje pomanjkanje (pitne) vode, dolgotrajnejše suše (predvsem v poletnem obdobju) in povečanje dezertifikacije. Zmanjšanje povprečnega pretoka v suhih mesecih za več kot 50 % bi lahko imelo za posledico podaljšanje obdobja izsušenosti struge in poslabšanje vodnega ekosistema.

6.3 Scenarij 2

Z drugim scenarijem smo želeli preveriti vpliv povečanja števila priključkov na ČN na obremenitev reke Quarteire s hranili. V ta namen smo predpostavili 80 % izkoriščenost vseh obstoječih ČN, ki so trenutno podobremenjene (preglednica 36). V primerjavi z osnovnim scenarijem bi se število prebivalcev, priključenih na greznice, zmanjšalo za 49 %. Za potrebe scenarija smo uporabili umerjen in validiran model kakovosti voda, predstavljen v poglavju 5.3, ter hidrometeorološke podatke za obdobje med letoma 2000 in 2004.

Rezultati modelnega izračuna kažejo, da bi se v primerjavi z osnovnim scenarijem v primeru uresničitve scenarija 2 obremenitev s celotnim dušikom iz čistilnih naprav povečala za 62,5 %, obremenitev s celotnim fosforjem pa kar za 100 %. Sočasno bi se obremenitev s celotnim dušikom iz greznic zmanjšala za 47,44 %, obremenitev s celotnim fosforjem pa za 50 %.

V preglednici 39 so podani podatki o spremembi povprečnih letnih obremenitev reke Quarteire s celotnim dušikom in fosforjem glede na osnovni scenarij. Razvidno je, da bi se v primeru uresničitve scenarija 2 obremenitev reke Quarteire s celotnim dušikom zmanjšala za 0,12 %, obremenitev s celotnim fosforjem pa le za 0,05 %. Glede na to, da je prispevek greznic in čistilnih naprav k obremenitvi površinskih voda s hranili zanemarljiv (glej sliko 50), je pričakovano zanemarljiv tudi pozitiven učinek zmanjšanja števila greznic in povečanja izkoriščenosti obstoječih čistilnih naprav.

Preglednica 39: Učinek povečanja števila priključkov na čistilne naprave; sprememba povprečnih letnih obremenitev reke Quarteire s celotnim dušikom in celotnim fosforjem glede na osnovni scenarij (v %).

Table 39: Impact of an increase in the number of connections to the waste water treatment plants; changes in the average annual total nitrogen and total phosphorus loads, transferred to the Quarteira river, as compared to the baseline scenario (in %).

	Osnovni scenarij (kg/leto)	Scenarij 2 (kg/leto)	Sprememba (%)
Celotni dušik	22.583	22.557	-0,12
Celotni fosfor	1.861	1.860	-0,05

Ob tem je potrebno opozoriti, da smo primerjavo obstoječega stanja in stanja v primeru uresničitve scenarija 2 izvedli za kontrolni prerez na iztoku iz porečja reke Quarteire, na lokaciji merilne postaje Ponte Rodoviária. Učinek povečane obremenitve s hranili iz posameznih čistilnih naprav zaradi samočistilne sposobnosti vodotoka do omenjenega kontrolnega prereza v veliki meri izzveni. Za ugotavljanje dejanskih učinkov povečanja obremenitev s hranili iz čistilnih naprav (na račun zmanjšanja števila greznic) bi bilo potrebno analizirati rečne odseke dolvodno od posameznih izpustov, kjer lahko pričakujemo lokalno poslabšanje stanja.

7 DISKUSIJA

7.1 Komentar domenske knjižnice in izbranega formalizma

Formalizem, ki smo ga izbrali za zapis domenske knjižnice, je kompatibilen z orodjem ProBMoT (Čerepnalkoski in sod., 2012). Glavna prednost formalizma je, da omogoča natančno strukturiranje znanja o modeliranju povodij oz. porečij, pri čemer je omenjeno znanje razčlenjeno na osnovne komponente, natančneje na posamezne entitete in procese. Entitete predstavljajo glavne elemente (akterje oz. subjekte) opazovanega sistema, procesi pa opisujejo njihove medsebojne odnose. Pomen posamezne komponente in njenih pripadajočih lastnosti, ki jo določajo, je izražen z uporabo metapodatkov (npr. razponov pričakovanih vrednosti, uporabljenih merskih enot itd.). Tovrsten zapis znanja omogoča avtomatsko iskanje vseh možnih struktur modela oz. vseh možnih kombinacij posameznih komponent, vsebovanih v knjižnici, za opis izbranega povodja oz. porečja.

Podoben formalizem, kompatibilen z orodjem za avtomatsko indukcijo modelov Lagrange (Džeroski in Todorovski, 2003), je bil uporabljen za razvoj domenske knjižnice, namenjene modeliranju prehranjevalne verige v jezerih (Atanasova in sod., 2006). Knjižnica je bila kasneje uspešno uporabljena za modeliranje več testnih primerov (Atanasova in sod., 2008; Atanasova in sod., 2011). Kljub temu da oba omenjena formalizma omogočata hierarhično urejen zapis znanja, ima ProBMoT formalizem v primerjavi z Lagrange formalizmom številne prednosti:

- ProBMoT formalizem namesto hierarhije spremenljivk uporablja hierarhijo entitet. Tovrsten zapis omogoča specifikacijo že omenjenih metapodatkov, ki jih z Lagrangeom ni bilo mogoče upoštevati.
- S ProBMoT formalizmom pri vsakem posameznem procesu definiramo seznam sodelujočih entitet, kar daje jasen vpogled v odnose med entitetami in procesi. Za vpogled v omenjene odnose je bilo pri Lagrangeu potrebno podrobno analizirati celotno domensko knjižnico.
- ProBMoT formalizem omogoča združevanje entitet in procesov v neodvisne enote oz. razdelke. Na področju modeliranja povodij oz. porečij lahko z razdelki ponazorimo posamezna podporečja ali posamezne hidrološke odzivne enote. Na ta način lahko gradimo delno distribuirane modele, ki omogočajo ugotavljanje vplivov posameznih podporečij in njihovo medsebojno primerjavo. Tovrsten delno distribuiran pristop uporablja tudi večina že uveljavljenih orodij za modeliranje hidroloških pojavov in procesov spiranja hranil na ravni povodij oz. porečij.
- Na področju modeliranja kompleksnih naravnih sistemov se srečujemo s pomanjkanjem merjenih podatkov za veliko število obravnavanih spremenljivk. Ker pogosto nimamo časa in sredstev za izvajanje večletnih meritev in ker vrednosti določenih spremenljivk niso enostavno

izmerljive, nam ProBMoT omogoča, da vrednosti vseh parametrov modela umerimo na merjene vrednosti najmanj ene odvisne spremenljivke. Tako lahko kljub pomanjkanju meritev umerimo model, res pa je, da je pri interpretaciji rezultatov tovrstnih modelov potrebna določena mera previdnosti in kritičnosti.

Kljub naštetim prednostim pa ima ProBMoT formalizem tudi določene pomanjkljivosti:

- V knjižnico ne moremo zapisati diferenčnih enačb in pogojnih (IF-THEN) stavkov. Na prvi omenjeni problem smo naleteli, ko smo želeli s pomočjo diferenčnih enačb izračunati dnevno količino vode v nenasičeni in plitvi nasičeni coni tal. Posledično smo morali omenjeni enačbi prepisati v diferencialno obliko. Zaradi numeričnega reševanja diferencialnih enačb lahko prihaja do manjših odstopanj v končni vodni bilanci porečja. S problemom pogojnih stavkov smo se soočili, ko smo želeli vrednosti parametra CN, ki nastopa v SCS enačbi za izračun površinskega odtoka, umerjati in sočasno upoštevati njihovo dinamično spreminjanje v odvisnosti od predhodne vlažnosti tal. Za upoštevanje omenjenega pogoja smo morali v enačbo za izračun površinskega odtoka vpeljati dodatni člen, ki sledi zapisu Monodove enačbe za opis kinetike rasti mikroorganizmov.
- Vse enačbe, ki jih zapišemo v knjižnico, morajo uporabljati enako časovno dinamiko. V našem primeru smo v knjižnico vključili enačbe, ki za opis hidroloških pojavov in procesov spiranja hranil uporabljajo dnevni časovni korak. Vključitev matematičnih izrazov z urno časovno dinamiko (npr. enačbe Greena in Ampta za izračun padavinskih izgub) tako ni bila mogoča.
- Pri zapisu procesov oz. enačb v domensko knjižnico moramo biti konsistentni. Paziti moramo, da so primerljive spremenljivke izražene v enakih merskih enotah. To pride do izraza predvsem v primeru, ko za opis določenega procesa upoštevamo več različnih (alternativnih) matematičnih izrazov, pridobljenih iz različnih virov.
- Odsotnost grafičnega vmesnika omejuje širšo uporabo formalizma in orodja za avtomatsko indukcijo modelov.

ProBMoT formalizem nam omogoča, da v knjižnico za modeliranje procesov na ravni porečij vključimo znanje s sorodnih področij, kot sta npr. populacijska dinamika in modeliranje kakovosti vodnih ekosistemov. Tovrstno znanje je bilo v preteklosti že zajeto v domenski knjižnici, namenjeni modeliranju prehranjevalnih verig v jezerih (Atanasova in sod., 2006). Omenjena knjižnica je bila pred kratkim prevedena tudi v ProBMoT formalizem (Čerepnalkoski in sod., 2012). Ker sta naša knjižnica in knjižnica za modeliranje kakovosti vodnih ekosistemov spisani v enakem formalizmu in ker uporabljata enako (dnevno) časovno dinamiko procesov, bi ju lahko združili v enotno knjižnico. Slednja bi podpirala modeliranje tako hidroloških pojavov in procesov spiranja hranil na ravni porečij kot tudi biokemijskih procesov v pripadajočih vodnih ekosistemih. Drug način povezave obeh knjižnic

bi bil preko rezultatov simulacije modelov, generiranih na osnovi knjižnice za modeliranje porečij. Omenjene rezultate (predvsem izračunane pretoke in obremenitve s hranili) bi lahko uporabili v postopku indukcije modelov kakovosti vodnih ekosistemov.

Da bi lahko ugotovili dejansko uporabno vrednost predlaganega formalizma, bi morali v knjižnico vključiti večje število alternativnih matematičnih izrazov za opis posameznih procesov. Res pa je, da se z naraščanjem števila upoštevanih alternativnih izrazov večja tudi prostor vseh možnih rešitev.

7.2 Modeliranje z orodjem ProBMoT in vloga modelarja

Glavna naloga uporabnika orodja ProBMoT oz. modelarja je priprava konceptualnega modela, s katerim opiše opazovani sistem (npr. izbrano porečje). Priprava konceptualnega modela temelji na prekrivanju različnih tematskih kart (npr. digitalnega modela višin, karte rabe zemljišč itd.), ki jih lahko analiziramo v poljubnem GIS orodju. Glede na to, da gre razvoj na področju modeliranja porečij v smeri povezovanja računskih modelov z GIS orodji, ki omogočajo avtomatsko pripravo vhodnih podatkov in izračun vrednosti določenih parametrov modela, bo potrebno v prihodnje razmisliti tudi o tovrstni nadgradnji oz. povezavi.

Na podlagi domenske knjižnice in konceptualnega modela, ki ga poda uporabnik, ProBMoT generira različne strukture modela za opis opazovanega sistema. Posamezne strukture so najprej prevedene v nize enačb in nato umerjene na meritve, s ciljem določitve najboljšega modela oz. modela, ki v največji možni meri opiše obnašanje opazovanega sistema. Izbor (popolne oz. nepopolne) strukture konceptualnega modela neposredno vpliva na število generiranih modelov za izbrani primer. Več kot je upoštevanih alternativnih izrazov za opis posameznih procesov, večji je prostor vseh možnih rešitev. Posledično je večje tudi število generiranih struktur, ki vstopajo v proces umerjanja parametrov.

Potrebno je poudariti, da lahko uporabnik prostor vseh možnih rešitev, ki ga preiskuje ProBMoT, omeji. Več strukture, kot poda, manjše je število generiranih rešitev. Pri pripravi konceptualnega modela lahko uporabnik za opis posameznega procesa izbere točno določen matematični izraz. Na ta način nabor vseh možnih struktur modela za opis opazovanega sistema zoži na en sam matematični model. Lahko pa se odloči tudi za izbiro točno določenih vrednosti parametrov, ki sodelujejo v obravnavanih matematičnih izrazih. Na ta način se izogne tako iskanju najbolj primerne strukture modela kot tudi postopku umerjanja parametrov.

Velikost konceptualnega modela, s katerim modelar opiše opazovani sistem, je v veliki meri odvisna tudi od izbranega števila (pod)razdelkov. Z vsakim dodatnim (pod)razdelkom se namreč število

alternativnih struktur modela eksponentno poveča, temu primerno pa se podaljša tudi računski čas. Slednja težava je rešljiva, in sicer z uporabo grid tehnologij, ki omogočajo delitev računskih nalog in vzporedno modeliranje medsebojno neodvisnih procesov.

Glede na to, da je osnovni namen modeliranja z orodjem ProBMoT grajenje modelov in iskanje najprimernejše strukture modela, ProBMoT ne predvideva analize občutljivosti parametrov. Z občutljivostno analizo ugotavljamo velikost vpliva posameznih parametrov na rezultate izbranega modela s točno določeno strukturo, ki je modelar v primeru uporabe ProBMoTa ne pozna vnaprej. Zato je še toliko bolj pomembno, da uporabnik v postopku priprave konceptualnega modela pametno izbere območje pričakovanih vrednosti parametrov, ki jih želi umeriti.

7.3 Primerjava predlaganega pristopa z ostalimi, že uveljavljenimi pristopi

Naš pristop kot osnovne komponente za modeliranje uporablja entitete in procese, ki nastopajo v preiskovani domeni. Posledično dopušča bolj podroben opis poljubnega opazovanega sistema. V naši knjižnici so vse komponente zapisane v enotnem formalizmu, njihova struktura pa je jasna in pregledna. Takšen zapis omogoča avtomatsko gradnjo modelov iz posameznih komponent, shranjenih v knjižnici, pri čemer iščemo strukturo modela, ki zagotavlja najboljše možno ujemanje med rezultati modela in merjenimi vrednostmi opazovanih spremenljivk.

Glavna razlika med našim in ostalimi pristopi k integriranemu okoljskemu modeliranju je v tem, da naš pristop omogoča avtomatsko generiranje vseh možnih struktur modela in avtomatsko izbiro najprimernejše oz. optimalne strukture modela za opazovani primer (na osnovi umerjanja parametrov). Iz pregleda referenčne literature je razvidno, da ostali pristopi (npr. Argent in sod., 2009; Gregersen in sod., 2005; Voinov in sod., 1999) omogočajo le ročno izbiro alternativnih matematičnih izrazov oz. alternativnih modulov za opis posameznih procesov. V tem primeru mora uporabnik (oz. modelar) sam izbrati module, ki jih želi povezati v model. Pri tem mora paziti, da izbere medsebojno kompatibilne module, ki ustrezajo kompleksnosti opazovanega sistema.

Našo knjižnico za modeliranje okoljskih procesov na ravni povodij, zapisano v ProBMoT formalizmu, lahko obravnavamo kot ontologijo, ker vsebuje organizirano in strukturirano domensko znanje o modeliranju. Podobno kot ostale ontologije tudi naša knjižnica definira koncepte (entitete) in odnose med njimi (proces). Taksonomska klasifikacija entitet in procesov omogoča dedovanje oz. prenašanje lastnosti staršev na potomce (podentitete in podproces), kar je bistvena značilnost ontologij.

Kljub temu je domenska knjižnica v primerjavi z običajno ontologijo veliko bolj izpopolnjena, saj poleg nizanja konceptov in odnosov med njimi vključuje tudi opise njihovih lastnosti, pri čemer v

primeru entitet govorimo o spremenljivkah in konstantah, v primeru procesov pa o enačbah. Tovrstne lastnosti konceptov predstavljajo osnovne komponente oz. gradnike, s pomočjo katerih oblikujemo specifične modele opazovanih sistemov.

7.4 Komentar testnega primera in rezultatov

Domensko knjižnico in orodje ProBMoT smo testirali na primeru porečja reke Quarteire, ki leži v pokrajini Algarve na jugu Portugalske. Omenjeno porečje smo izbrali zato, ker je bilo kot testno območje vključeno v vzporedni raziskovalni projekt IMPACT (www.impact.igb-berlin.de), namenjen razvoju modelov za določitev vpliva antropogenih dejavnikov na rečni ekosistem. Za omenjeno porečje je značilno sredozemsko podnebje s sezonsko dinamiko padavin, ki se pojavljajo predvsem v mokrih mesecih (med oktobrom in marcem). Vzhodni gričevnat del porečja prekrivajo listnati gozd, sklerofilno rastlinje in grmičevje, na zahodnem ravninskem delu porečja pa prevladujejo kmetijske površine, predvsem sadovnjaki. Velik del porečja reke Quarteire leži na območju kraškega vodonosnika Querença-Silves. Vodonosnik napajajo padavine, ki skozi porozno matično kamnino odteka neposredno v podzemlje, in vodotoki, ki pritekajo z nekraškega obrobja. Vodotoki na stiku s krasom ponikajo in se zopet pojavijo na površju v obliki kraških izvirov.

Modeliranje kraške hidrologije je zaradi specifične zgradbe in delovanja kraških vodonosnikov izjemno zahtevno. V naši domenski knjižnici celotna hidrologija temelji na modificirani SCS metodi (NRCS, 1986), ki upošteva dinamično spreminjanje vrednosti parametra CN v odvisnosti od predhodne vlažnosti tal. V primeru nizke predhodne vlažnosti tal je vrednost parametra CN nižja, kot bi bila na podlagi splošno uveljavljenih NRCS preglednic. Posledično je infiltracija v kraški vodonosnik večja, površinski odtok pa temu primerno manjši. Omenjen pristop je bil že večkrat uspešno uporabljen za izračun površinskega odtoka s kraških območij (Barfield in sod., 2004; Campbell in Sullivan, 2002; Vale in Holman, 2009; Doglioni in sod., 2012).

Orodje ProBMoT smo najprej uporabili za generiranje različnih struktur hidrološkega modela. V ta namen smo uporabili hidrometeorološke podatke za obdobje 2000–2004. Na osnovi izvedene RMSE napake, primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev za oceno napovedne uspešnosti modelov (r , NS, PBIAS in RSR) ter interpretacije rezultatov in umerjenih vrednosti parametrov smo izbrali najboljšo strukturo hidrološkega modela za opazovani primer. Zanimiva je bila ugotovitev, da je rangiranje modelov na osnovi RMSE napake, kot ga uporablja orodje ProBMoT, povsem enakovredno rangiranju modelov na osnovi statističnih parametrov NS in RSR, ki se pogosto uporabljata za oceno napovedne uspešnosti hidroloških modelov in modelov kakovosti voda.

Rezultati simulacije izbranega hidrološkega modela kažejo dobro ujemanje s sezonsko dinamiko merjenih pretokov na iztoku iz porečja, pri čemer je bila kakovost ujemanja visokih konic pretokov (nad 20 m³/s) nekoliko slabša. Glavni razlog za neujemanje rezultatov modela z visokimi konicami pretokov je najverjetneje v tem, da ProBMoT kot kriterijsko funkcijo v postopku optimizacije uporablja RMSE napako. Slednja enakovredno obravnava vse opazovane točke oz. meritve, pri čemer poda agregirano oceno odstopanja napovedi modela od dejanskih merjenih vrednosti opazovane spremenljivke. V našem primeru smo obravnavali vodotok, za katerega so značilni nizki povprečni dnevni pretoki, visoke konice pa nastopijo le nekajkrat letno. Ker RMSE v vseh opazovanih točkah omenjeno odstopanje obravnava enakovredno in ker se izogiba velikim razlikam med napovedmi modela in meritvami, se v našem primeru bolje približa prevladujočim (nizkim) vrednostim pretokov, medtem ko visoke konice večinoma podceni. Omenjen problem bi lahko rešili z ločenim obravnavanjem mokrih in suhih mesecev ali pa z vpeljavo uteženega umerjanja, pri čemer bi vsaki posamezni opazovani točki pripisali določeno utež. Na ta način bi lahko definirali pomembne točke oz. meritve (npr. posamezne visoke konice pretokov), ki se jim mora model kar najbolje približati.

Na neujemanje rezultatov modela z visokimi konicami pretokov bi lahko vplivala tudi napačna ocena predhodne vlažnosti tal, ki smo jo določili kot vsoto padavin, zapadlih v preteklih petih dneh (Barfield in sod., 2004). Precenjene konice izmerjenih pretokov bi lahko bile posledica nižje, podcenjene konice pa posledica višje dejanske predhodne vlažnosti tal. Razlog za višjo dejansko predhodno vlažnost tal napram izračunani bi lahko bil pojav lokalnih padavinskih dogodkov, ki so še posebej pogosti na območjih s sredozemskim podnebjem (EEA, 1997). Za tovrstne lokalne padavinske dogodke je značilno hitro upadanje količine padavin z oddaljenostjo od centra padavinskega dogodka. Posledično izbrane meteorološke postaje določenih lokalnih padavinskih dogodkov ne evidentirajo, njihov vpliv pa vseeno lahko zaznamo kot povišan pretok vode v odvodniku. Nižja dejanska predhodna vlažnost tal napram izračunani bi lahko bila posledica lokalnih padavin na mestu izbranih meteoroloških postaj. Ker predstavljajo padavinski podatki z meteoroloških postaj točkovne vrednosti in ker jih zaradi pomanjkanja podatkov o prostorski razporeditvi padavin povprečimo na celotno območje, lahko v primeru evidentiranega dogodka lokalne narave s povprečenjem padavin na širše območje dobimo napačno predstavo o dejanski količini padavin in namočenosti tal.

Rezultate izbranega hidrološkega modela smo primerjali z rezultati predhodno izdelane hidrološke analize porečja reke Quarteire (Sohel, 2012), v kateri je bil za modeliranje izbranega porečja uporabljen program SWAT (Arnold in Fohrer, 2005). SWAT je izrazito kompleksen konceptualni model. V primerjavi z našim modelom upošteva številne dodatne procese, npr. medtok, kapilarni dvig in dodatne izgube vode v primeru vodotokov z nadpovprečno prepustno rečno strugo. Posledično vsebuje tudi bistveno večje število parametrov, kot smo jih uspeli zajeti z orodjem ProBMoT. Soheli (2012) je samo za opis hidroloških procesov uporabil 24 različnih parametrov.

Iz primerjave vrednosti statističnih kriterijev obeh hidroloških modelov je razvidno, da smo v primerjavi s SWAT modelom z izbranim ProBMoT modelom dosegli izboljšanje vrednosti r , NS in RSR ter rahlo poslabšanje vrednosti PBIAS, ki pa še vedno izkazuje zelo dobro napovedno sposobnost modela. Izvedli smo tudi primerjavo sezonskega ujemanja rezultatov obeh hidroloških modelov s povprečnimi pretoki, izmerjenimi na iztoku iz porečja. Ugotovili smo, da model SWAT povprečni dnevni pretok v mokrih mesecih (oktober–marec) preceni za 40 %, v suhih mesecih (april–september) pa kar za 85 %, medtem ko izbrani ProBMoT model vrednosti povprečnih dnevni pretokov podceni – v mokrih mesecih za 5 %, v suhih mesecih pa za 12 %.

Z enostavnejšim modelom in posledično manjšim številom uporabljenih parametrov v primerjavi s kompleksnejšim modelom SWAT smo tako uspeli doseči primerljivo oceno napovedne sposobnosti modela in boljše sezonsko ujemanje med simuliranimi in merjenimi vrednostmi povprečnih dnevni pretokov. Na ta način smo potrdili hipotezo, da so rezultati našega orodja primerljivi z rezultati ostalih, že uveljavljenih orodji za modeliranje (hidroloških) procesov na ravni porečij.

V nadaljevanju smo izvedli validacijo izbranega hidrološkega modela, pri čemer smo uporabili hidrometeorološke podatke za obdobje 2009–2010. Ugotovili smo, da so vrednosti izbranih statističnih kriterijev v validacijskem obdobju podobne vrednostim v obdobju umerjanja. Sodeč po vrednostih r in PBIAS dosežemo z modelom zelo dobro ujemanje rezultatov modela z meritvami, na podlagi vrednosti NS in RSR pa lahko napovedno sposobnost modela ocenimo kot zadovoljivo.

Rezultati umerjenega in validiranega hidrološkega modela so bili uporabljeni kot vhodni podatki modela kakovosti voda. Avtomatskega iskanja najboljše strukture modela kakovosti za izbrano porečje žal nismo uspeli izvesti, ker bi za to porabili preveč časa (po vsej verjetnosti več tednov). Zato smo izbrali štiri testne strukture modela, ki so se med seboj razlikovale v matematičnih izrazih, namenjenih izračunu količine odplavljenega sedimenta ter obremenitev z dušikom in fosforjem z urbanih površin. Umerjanje parametrov izbranih modelov kakovosti voda je temeljilo na evidentiranih obremenitvah vodotoka s sedimentom in hranili. Ob tem je potrebno opozoriti, da smo evidentirane obremenitve s suspendiranim sedimentom, celotnim dušikom in celotnim fosforjem na lokaciji iztoka iz porečja izračunali kot produkt v določenem delu dneva odvzete koncentracije (v mg/l) in srednjega dnevnega pretoka (m^3/s), kar ustvarja določeno negotovost pri uporabi tovrstnih podatkov. Podatki o koncentracijah suspendiranega sedimenta, celotnega dušika in celotnega fosforja v vodotoku so bili pridobljeni s strani SNIRH, z enomesečno frekvenco vzorčenja.

Iz primerjave merjenih in simuliranih obremenitev s suspendiranim sedimentom je bilo razvidno pomanjkanje variabilnosti v podatkih, uporabljenih za umerjanje, in posledično tudi v rezultatih vseh štirih testnih modelov. Razloge za pomanjkanje dinamike gre iskati v tem, da je bila večina meritev

koncentracij suspendiranega sedimenta izvedena pri nizkih povprečnih dnevni pretokih. Primerjava izračunanih in merjenih dnevni obremenitev s hranili je pokazala, da vsi modeli sledijo dinamiki letni časov, pri čemer je količina hranil v reki Quarteiri v mokrih mesecih višja kot v suhih. Ugotovili smo, da večja odstopanja med merjenimi in simuliranimi vrednostmi celotnega dušika izhajajo iz neujemanja rezultatov izbranega hidrološkega modela z merjenimi pretoki, medtem ko je za odstopanja med merjenimi in simuliranimi vrednostmi celotnega fosforja krivo neujemanje med merjeno in simulirano dnevno obremenitvijo s suspendiranim sedimentom. Glede na to, da je dušik zelo mobilni element, vezan na dinamiko površinskega in baznega odtoka, je vpliv rezultatov hidrološkega modela na uspešnosti napovedovanja obremenitev z dušikom pričakovani. Prav tako je pričakovana povezava med dinamiko suspendiranega sedimenta in fosforja, za katerega je značilno, da se v okolju prednostno premika adsorbiran na delcih sedimenta.

Na podlagi primerjave vrednosti izbranih statistični kriterijev smo ugotovili, da je izmed štirih testni struktur modela najboljša tista, ki za izračun odplavljanja sedimenta uporablja Williamsovo enačbo (Williams, 1995), za določitev obremenitve s hranili z urbanih površin pa Haithovo enačbo (Haith in sod., 1992). Williamsova enačba nastopa v modelu SWAT. Namesto dejavnika erozivnosti padavin upošteva erozivnost površinskega odtoka, zato lahko sklepamo, da na prispevnem območju reke Quarteire odplavljanje sedimenta bolj sledi dinamiki površinskega odtoka kot pa dinamiki padavin. Haithova enačba za račun obremenitev s hranili z urbanih površin nastopa v modelu GWLF (Haith in sod., 1992). Omenjena enačba upošteva funkcijo eksponentnega kopičenja in spiranja, ki sledi določenim fizikalnim zakonitostim, zato je v primerjavi z alternativno USGS enačbo (Driver in Tasker, 1990), ki nastopa v modelu SWAT in temelji zgolj na empirično določenih regresijskih koeficientih, očitno bolj univerzalna in posledično bolj primerna za obravnavani primer. Na podlagi omenjenih ugotovitev lahko sklenemo, da uporaba fiksne strukture modela, kot jo ponujajo že uveljavljena orodja za modeliranje kakovosti voda na ravni porečij, ni vedno najbolj optimalna, in da lahko s kombiniranjem različni matematični izrazov dosegamo boljše rezultate.

V nadaljevanju smo izvedli validacijo izbranega modela kakovosti voda, pri čemer smo uporabili hidrometeorološke podatke za obdobje 2009–2010. V primeru napovedovanja obremenitev s suspendiranim sedimentom in celotnim fosforjem smo dosegli poslabšanje vrednosti izbranih statistični kriterijev napram obdobju umerjanja. Nasprotno smo pri napovedovanju obremenitev s celotnim dušikom dosegli izboljšanje ocene napovedne sposobnosti modela. Podobno izboljšanje smo opazili že pri validaciji hidrološkega modela, kar še dodatno potrjuje povezavo med površinskim in baznim odtokom ter mobilnostjo dušika.

Z umerjenim in validiranim hidrološkim modelom ter modelom spiranja hranil lahko preigramo različne scenarije, pri čemer ugotavljamo, kakšen učinek bi imela določena sprememba na količinsko

in kakovostno stanje voda v izbranem porečju. V našem primeru smo z zgrajenimi modeli preizkusili dva različna scenarija: 1) scenarij podnebnih sprememb in 2) scenarij povečanja števila priključkov na obstoječe ČN. S prvim scenarijem smo želeli preveriti vpliv pričakovanih podnebnih sprememb na količinsko stanje površinskih in podzemnih voda v porečju reke Quarteire, in sicer za obdobje 2095–2099. V ta namen smo v primerjavi z referenčnim obdobjem 2000–2004 upoštevali zmanjšanje dnevne količine padavin za 6,70 % (v mokrih mesecih) oz. 15,50 % (v suhih mesecih) ter zvišanje povprečne dnevne temperature za 4,23 °C. Rezultati modelnega izračuna kažejo, da bi imele podnebne spremembe v porečju reke Quarteire, v primeru uresničitve predpostavljenega scenarija, močan vpliv na vodno bilanco. Do konca 21. stoletja bi se ob zmanjšanju povprečne letne količine padavin za 70 mm v primerjavi z referenčnim obdobjem 2000–2004 površinski odtok zmanjšal za več kot 20 %, bazni odtok za več kot 15 %, povprečni dnevni pretok reke Quarteire pa za skoraj 30 %.

Z drugim scenarijem smo želeli preveriti vpliv povečanja števila priključkov na ČN na obremenitev reke Quarteire s celotnim dušikom in fosforjem. V ta namen smo predpostavili 80 % izkoriščenost vseh obstoječih ČN, pri čemer bi se priključenost prebivalcev na greznice v primerjavi z osnovnim scenarijem zmanjšala za 49 %. V primeru uresničitve scenarija 2 bi se obremenitev s celotnim dušikom iz ČN povečala za 62,5 %, obremenitev s celotnim fosforjem pa kar za 100 %. Sočasno bi se obremenitev s celotnim dušikom iz greznic zmanjšala za 47,44 %, obremenitev s celotnim fosforjem pa za 50 %. Obremenitev reke Quarteire s celotnim dušikom bi se na kontrolnem profilu na iztoku iz porečja zmanjšala za 0,12 %, obremenitev s celotnim fosforjem pa le za 0,05 %. Zanemarljiv pozitiven učinek zmanjšanja števila greznic in povečanja izkoriščenosti obstoječih ČN pripisujemo zanemarljivemu prispevku greznic in ČN k obremenitvi površinskih voda s hranili.

Težko je reči, ali sta testirana scenarija dejansko uresničljiva. Najbolj vprašljivi so rezultati, povezani s scenarijem podnebnih sprememb, kjer že uporabljeni podatki vključujejo veliko mero negotovosti in lahko rezultati služijo le kot okvirna informacija. Podnebni scenarij je potrebno razumeti le kot enega izmed možnih scenarijev, a le, če se bodo podnebne spremembe res razvijale v smeri povečanja povprečnih dnevniških temperatur in zmanjšanja količine povprečnih dnevniških padavin.

Dokazali smo, da se tako hidrološki model kot tudi model kakovosti voda logično odzivata na spremenjene vrednosti parametrov in vhodnih podatkov, uporabljene v primeru testiranja obeh hipotetičnih scenarijev. Ker je simulacija modelov z že umerjenimi parametri izredno hitra (običajno traja približno 1 sekundo), bi lahko generirane modele vključili v sisteme za podporo odločanju, a bi v ta namen najbrž potrebovali uporabniku prijazen grafični vmesnik, ki bi na podlagi izbire zelenega scenarija uporabnika usmerjal k spreminjanju točno določenih vrednosti parametrov oz. h generiranju novih nizov vrednosti izbranih vhodnih spremenljivk.

8 ZAKLJUČKI

V doktorski nalogi je predstavljen nov pristop k modeliranju hidroloških pojavov in procesov spiranja hranil na ravni porečij, ki temelji na knjižnici znanja in orodju za avtomatsko odkrivanje enačb, imenovanem ProBMoT. Omenjeni pristop omogoča avtomatsko testiranje več alternativnih struktur modelov, njihovo avtomatsko umerjanje in simulacijo. Dva poglobljena prispevka naloge sta: 1) razvoj knjižnice znanja o modeliranju procesov, ki se odvijajo na ravni povodij oz. porečij in 2) aplikacija domenske knjižnice in orodja ProBMoT na izbranem testnem primeru.

8.1 Oblikovanje domenske knjižnice

V knjižnici smo zbrali osnovno domensko znanje, ki omogoča modeliranje hidroloških pojavov in procesov spiranja hranil (dušika in fosforja) na ravni porečij. Za zapis znanja v knjižnico smo uporabili poseben formalizem, ki ga podpira orodje za avtomatsko odkrivanje enačb ProBMoT. Glavna prednost formalizma je, da omogoča natančno strukturiranje znanja, pri čemer je slednje razčlenjeno na osnovne komponente, natančneje na posamezne entitete, procese in razdelke. Entitete predstavljajo gradnike opazovanega sistema, ki jih lahko opišemo z atributi (spremenljivkami in konstantami). Procesni opisujejo odnose med entitetami (natančneje med njihovimi atributi) v obliki matematičnih izrazov oz. enačb, razdelke pa uporabljamo predvsem za strukturiranje dinamičnega sistema, ki ga želimo modelirati (npr. za razmejitev porečja na posamezna podporečja). Oblikovana knjižnica dejansko zajema splošno znanje, ki se nanaša na skupino entitet, procesov oz. razdelkov, in ga lahko uporabimo za opis več specifičnih primerov.

V naši knjižnici smo obravnavali pet osnovnih entitet: vodo, podnebje, površje, sediment in hranila, ki so bile nadalje razdeljene v več podentitet. Med procese na ravni porečij smo uvrstili procese kroženja vode, odplavljanja sedimenta in spiranja hranil. Za opis posameznih procesov smo uporabili splošno uveljavljene enačbe (npr. SCS enačbo za izračun površinskega odtoka in USLE enačbo za določitev količine odplavljenega sedimenta), ki jih ponuja večina obstoječih orodij za modeliranje hidroloških pojavov in procesov spiranja hranil na ravni porečij. Pri posameznih procesih smo v knjižnici upoštevali tudi več alternativnih matematičnih izrazov. Ob tem smo morali biti še posebej pozorni na konsistentno uporabo merskih enot, sploh v primeru upoštevanja več (alternativnih) enačb, pridobljenih iz različnih virov.

Zaradi določenih omejitev formalizma (nezmožnosti uporabe diferenčnih enačb in pogojnih stavkov) smo morali določene matematične izraze preoblikovati v ustrezno (algebrsko ali diferencialno) obliko oz. jih kako drugače prilagoditi (npr. z vpeljavo dodatnega člana v izbrano enačbo).

8.2 Aplikacija domenske knjižnice in orodja ProBMoT na testnem primeru

Orodje ProBMoT smo v kombinaciji z oblikovano domensko knjižnico preizkusili na izbranem testnem primeru, pri čemer smo ga uporabili za avtomatsko generiranje različnih struktur in umerjanje hidrološkega modela ter za umerjanje štirih izbranih struktur modela kakovosti voda. Najboljšo strukturo hidrološkega modela in modela kakovosti voda smo izbrali na podlagi izvednotene RMSE napake, primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev za oceno napovedne uspešnosti modelov ter interpretacije rezultatov in umerjenih vrednosti parametrov. Z obema modeloma smo uspeli ujeti sezonsko dinamiko opazovanih pojavov, pri čemer je bila kakovost ujemanja visokih konic pretokov ter visokih obremenitev s sedimentom in hranili nekoliko slabša. Analiza povprečne letne vodne bilance in povprečnih letnih obremenitev s sedimentom in hranili je potrdila določene ugotovitve predhodnih raziskav. S tem smo dokazali, da je avtomatizirano modeliranje možno uporabiti za hidrološko modeliranje in modeliranje kakovosti voda na ravni porečij.

Rezultate umerjenega hidrološkega modela smo primerjali z rezultati modela SWAT, ki je znan predvsem po svoji kompleksnosti in velikemu številu uporabljenih parametrov. Iz primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev je razvidno, da oba modela dosegata primerljivo uspešnost napovedovanja pretokov. Primerjava sezonskega ujemanja rezultatov obeh hidroloških modelov s povprečnimi pretoki, izmerjenimi na iztoku iz izbranega porečja, kažejo v prid našemu modelu. Z bistveno enostavnejšim modelom smo torej uspeli doseči primerljive (in v določenih pogledih celo boljše) rezultate. Na ta način smo dokazali, da so rezultati našega pristopa primerljivi z rezultati obstoječih konceptualnih pristopov.

Z umerjenim hidrološkim modelom in modelom kakovosti voda smo preizkusili dva različna scenarija možnih sprememb, ki bi lahko vplivale na količinsko in kakovostno stanje voda v izbranem porečju: 1) scenarij podnebnih sprememb in 2) scenarij povečanja števila priključkov na ČN. Dokazali smo, da se oba uporabljena modela logično odzivata na spremenjene vrednosti parametrov in vhodnih podatkov. Ker je simulacija modelov z že umerjenimi parametri izredno hitra, bi lahko generirane modele brez večjih težav vključili v sisteme za podporo odločanju na področju celostnega upravljanja z vodnimi viri.

8.3 Nadaljnje delo

V prihodnje predvidevamo dodatne izboljšave domenske knjižnice, pri čemer imamo v mislih predvsem upoštevanje različnih procesov transformacije hranil v tleh in dinamične narave določenih parametrov (npr. koeficienta pokrovnosti), ki smo jih v trenutni verziji knjižnice obravnavali kot

konstante. Hkrati želimo v knjižnico vključiti večje število alternativnih matematičnih izrazov za opis posameznih že vključenih procesov.

Uporabnost predstavljenega pristopa želimo preveriti z modeliranjem več različnih porečij. Pri tem bi želeli preizkusiti vse optimizacijske metode, ki jih ponuja ProBMoT (npr. metodo uteženega umerjanja, ki je trenutno še v fazi implementacije). Naš cilj je v najkrajšem (še sprejemljivem) možnem računskem času poiskati najprimernejšo strukturo modela (tako za modeliranje hidroloških procesov kot tudi obremenitev s hranili) z najprimernejšimi vrednostmi izbranih parametrov. Z najboljšim modelom želimo preveriti učinke različnih strategij upravljanja s porečji na količinsko in kakovostno stanje voda ter kakovost pripadajočih vodnih ekosistemov. S povezovanjem naše knjižnice z ostalimi knjižnicami, ki pokrivajo sorodna področja, želimo omogočiti celostno modeliranje vodnih virov na ravni porečij.

Predvidevamo tudi vzpostavitev grafičnega vmesnika, ki bi modelarja usmerjal pri oblikovanju konceptualnega modela za izbrani primer in mu olajšal pripravo vhodnih datotek. Želimo si tudi uvedbe določenih novih funkcij, s katerimi bi lahko dodatno omejili prostor vseh možnih struktur modela, ki je trenutno preveč odprt. Slednje je razvidno predvsem iz prevelikega števila generiranih modelov, katerih umerjanje bi lahko trajalo predolgo za praktično uporabo.

9 POVZETEK

V doktorski disertaciji predstavljamo nov pristop k modeliranju hidroloških pojavov in kakovosti voda na ravni porečij, ki omogoča avtomatsko indukcijo delno distribuiranih modelov na podlagi domenske knjižnice, optimizacijskega algoritma in merjenih podatkov. Osnovo za tovrstno modeliranje predstavlja že omenjena domenska knjižnica, ki smo jo razvili v sklopu naloge. V knjižnici je zbrano in v ustrezni obliki zapisano znanje s področja hidrološkega modeliranja in modeliranja procesov spiranja hranil na ravni porečij. Knjižnica vsebuje tudi določene alternativne izraze oz. enačbe za opis izbranih procesov.

Formalizem, ki smo ga uporabili za zapis knjižnice, je kompatibilen z orodjem ProBMoT (Čerepnalkoski in sod., 2012). Na podlagi domenske knjižnice in konceptualnega modela, s katerim opišemo izbrano porečje, ProBMoT generira vse možne strukture modela opazovanega sistema. V postopku modeliranja se vsaka posamezna struktura modela prevede v niz algebrskih in/ali navadnih diferencialnih enačb. Vsaka struktura gre skozi proces umerjanja parametrov, pri čemer je glavno vodilo čim manjše odstopanje med meritvami in rezultati simulacije modela. ProBMoT uporablja za oceno velikosti omenjenega odstopanja koren povprečne kvadratne napake (RMSE), numerična optimizacija pa temelji na diferencialni evoluciji (Storn in Price, 1997). Kot rezultat dobimo niz kandidatnih modelov s popolnoma določeno strukturo in vrednostmi parametrov. Kandidatni modeli so razvrščeni na podlagi RMSE napake. Nižja vrednost RMSE je indikator boljšega ujemanja modela z meritvami.

Predlagani pristop smo testirali na porečju reke Quarteire, ki leži v pokrajini Algarve na jugu Portugalske. Omenjeno porečje smo izbrali zato, ker je bilo kot testno območje vključeno v vzporedni raziskovalni projekt IMPACT (<http://www.impact.igb-berlin.de/>), namenjen razvoju modelov za določitev vpliva antropogenih dejavnikov na rečni ekosistem. Za omenjeno porečje sta značilna sredozemsko podnebje in kraško površje. Za potrebe modeliranja smo porečje razdelili na več hidroloških odzivnih enot, ki sovpadajo z različnimi rabami zemljišč.

Domensko knjižnico in orodje ProBMoT smo najprej uporabili za generiranje različnih struktur hidrološkega modela. V ta namen smo uporabili hidrometeorološke podatke za obdobje 2000–2004. Na osnovi iz vrednotene RMSE napake, primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev za oceno napovedne uspešnosti modelov (r , NS, PBIAS in RSR) ter interpretacije rezultatov in umerjenih vrednosti parametrov smo izbrali najboljšo strukturo hidrološkega modela za opazovani primer. Rezultati simulacije izbranega hidrološkega modela kažejo dobro ujemanje s sezonsko dinamiko merjenih pretokov na iztoku iz porečja, pri čemer je bila kakovost ujemanja visokih konic pretokov

(nad 20 m³/s) nekoliko slabša. Model smo tudi validirali, pri čemer smo uporabili hidrometeorološke podatke za obdobje 2009–2010.

Rezultate izbranega hidrološkega modela smo primerjali z rezultati predhodno izdelane hidrološke analize porečja reke Quarteire (Sohel, 2012), v kateri je bil za modeliranje izbranega porečja uporabljen program SWAT (Arnold in Fohrer, 2005). Z enostavnejšim modelom in manjšim številom uporabljenih parametrov v primerjavi s kompleksnejšim modelom SWAT smo dosegli primerljivo oceno napovedne sposobnosti modela in boljše sezonsko ujemanje med simuliranimi in merjenimi vrednostmi povprečnih dnevni pretokov.

V nadaljevanju smo izvedli avtomatsko iskanje najboljše strukture modela kakovosti voda za izbrano porečje. Zaradi dolgotrajnosti izračuna smo prostor možnih rešitev omejili na štiri testne strukture modela, ki so se med seboj razlikovale v matematičnih izrazih, namenjenih izračunu količine odplavljenega sedimenta ter obremenitev z dušikom in fosforjem z urbanih površin. Iz primerjave merjenih in simuliranih obremenitev s suspendiranim sedimentom je bilo razvidno pomanjkanje variabilnosti v podatkih, uporabljenih za umerjanje, in posledično tudi v rezultatih vseh štirih testnih modelov. Primerjava izračunanih in merjenih dnevni obremenitev s hranili je pokazala, da vsi modeli sledijo dinamiki letnih časov, pri čemer je količina hranil v reki Quarteiri v mokrih mesecih višja kot v suhih.

Izmed štirih testnih struktur modela kakovosti voda se je najbolje izkazala tista, ki za izračun odplavljanja sedimenta uporablja Williamsovo enačbo (Williams, 1995), za določitev obremenitve s hranili z urbanih površin pa Haithovo enačbo (Haith in sod., 1992). Izbrani model kakovosti voda smo tudi validirali, pri čemer smo uporabili hidrometeorološke podatke za obdobje 2009–2010.

Z umerjenim in validiranim hidrološkim modelom ter modelom kakovosti voda smo preizkusili dva različna scenarija možni sprememb, ki bi lahko vplivale na količinsko in kakovostno stanje voda v izbranem porečju: 1) scenarij podnebni sprememb in 2) scenarij povečanja števila priključkov na čistilne naprave (ČN). Pri prvem scenariju smo v primerjavi z referenčnim obdobjem 2000–2004 upoštevali zmanjšanje dnevne količine padavin za 6,70 % (v mokrih mesecih) oz. 15,50 % (v suhih mesecih) ter povišanje povprečne dnevne temperature za 4,23 °C. Rezultati modelnega izračuna kažejo, da bi imele podnebne spremembe v porečju reke Quarteire, v primeru uresničitve predpostavljenega scenarija, močan vpliv na vodno bilanco. Do konca 21. stoletja bi se ob zmanjšanju povprečne letne količine padavin za 70 mm v primerjavi z referenčnim obdobjem 2000–2004 površinski odtok zmanjšal za več kot 20 %, bazni odtok za več kot 15 %, povprečni dnevni pretok reke Quarteire pa za skoraj 30 %.

Z drugim scenarijem smo želeli preveriti vpliv povečanja števila priključkov na ČN na obremenitev reke Quarteire s celotnim dušikom in fosforjem. V ta namen smo predpostavili 80 % izkoriščenost vseh obstoječih ČN, pri čemer bi se priključenost prebivalcev na greznice v primerjavi z osnovnim scenarijem zmanjšala za 49 %. V primeru uresničitve scenarija 2 bi se obremenitev s celotnim dušikom iz ČN povečala za 62,5 %, obremenitev s celotnim fosforjem pa kar za 100 %. Sočasno bi se obremenitev s celotnim dušikom iz greznic zmanjšala za 47,44 %, obremenitev s celotnim fosforjem pa za 50 %. Obremenitev reke Quarteire s celotnim dušikom bi se na kontrolnem profilu na iztoku iz porečja zmanjšala za 0,12 %, obremenitev s celotnim fosforjem pa le za 0,05 %.

V sklopu doktorske naloge smo uspeli predlagan pristop k modeliranju hidroloških pojavov in procesov spiranja hranil testirati na relativno zahtevnem primeru kraškega porečja. Glede na to, da je analiza povprečne letne vodne bilance in povprečnih letnih obremenitev s sedimentom in hranili potrdila ugotovitve predhodnih raziskav, lahko sklenemo, da je avtomatizirano modeliranje možno uporabiti za hidrološko modeliranje in modeliranje kakovosti voda na ravni porečij. Primerjava ProBMoT rezultatov z rezultati orodja SWAT je pokazala, da predstavlja predlagan avtomatiziran pristop primerljivo alternativo obstoječim konceptualnim pristopom. S testiranjem različnih modelnih scenarijev smo potrdili logično odzivanje zgrajenih modelov na spremenjene vrednosti parametrov in vhodnih podatkov. Ker je simulacija modelov z že umerjenimi parametri izredno hitra, bi lahko generirane modele brez večjih težav vključili v sisteme za podporo odločanju na področju celostnega upravljanja z vodnimi viri.

Glavna prednost predlaganega pristopa je v tem, da omogoča avtomatsko generiranje vseh možnih struktur modela in avtomatsko izbiro najprimernejše oz. optimalne strukture modela za opazovani primer (na osnovi umerjanja parametrov). Generirani modeli so popolnoma transparentni in so s tega vidika podobni tradicionalnim konceptualnim modelom. Prilagodljiv način oblikovanja knjižnice omogoča vključitev dodatnih procesov oz. matematičnih izrazov. Uporaba knjižnice in predlaganega pristopa omogoča odkrivanje novih modelov opazovanega sistema in enostavno testiranje alternativnih enačb za opis izbranih procesov.

10 SUMMARY

We introduce an automated modelling (AM) framework allowing automated induction of semi-distributed hydrologic and water quality models using a modelling knowledge library, an optimization algorithm, and measured data. The key step in this procedure is encoding of existing watershed modelling knowledge into a domain specific library, which was developed within the presented research. The knowledge encoded in the library comprises hydrological and nutrient loading processes on a watershed scale. Moreover, the library includes alternative formulations for the selected processes.

The formalism selected to build the watershed modelling library is compliant with the AM tool ProBMoT (Čerepnalkoski et al., 2012). Using the components from the library, ProBMoT generates candidate model structures that adhere to the conceptual model which is used for the specification of the observed watershed. In the process of AM procedure, each model structure is translated into a set of algebraic and/or ordinary differential equations. The resulting sets of equations enter the parameter estimation subsystem which optimizes the parameters' values by minimizing the discrepancy between the observed data and the data simulated by the model. ProBMoT supports the use of different objective functions for measuring the discrepancy, among which we use the root mean square error (RMSE). Differential evolution (Storn and Price, 1997) is used for estimating the parameter values. The result of the automated modelling procedure is a list of models with fully specified structure and parameter values, ranked according to their RMSE values. Lower RMSE values indicate better fit between the simulation results and the measurements.

The proposed AM methodology was applied to the Quarteira river catchment, located in the Algarve region, southern Portugal. The catchment was a subject of a parallel research project called IMPACT (<http://www.impact.igb-berlin.de/>), with the aim to develop a model framework to assess the effect of anthropogenic stressors on river biota. The Quarteira river catchment is characterized by a Mediterranean climate and karstic surface. For the purpose of our research, we divided the study area into hydrological response units corresponding to different land use types.

In the first step, the domain library and the ProBMoT tool were adopted for the generation of different hydrological model structures. To this end, we used the hydrometeorological data for the period 2000–2004. We selected the most appropriate hydrological model for the study area based on the automatically calculated RMSE values, values of the statistical indicators used to assess the model performance (namely r , NS, PBIAS and RSR) and the interpretation of model results and calibrated parameter values. The results of the selected hydrological model show good agreement between the

measured and calculated seasonal flow dynamics at the outlet of the catchment, while the model fails to adequately match some of the higher flow peaks (greater than 20 m³/s). The model was also validated, based on the hydrometeorological data for the period 2009–2010.

We compared the simulation results obtained by using the best generated hydrological model with the results of the previously performed hydrological analysis of the Quarteira river catchment (Sohel, 2012) using the SWAT model (Arnold and Fohrer, 2005). According to the selected statistical model efficiency indicators, the performance of our hydrological model was similar to the performance of the much more complex SWAT model. Additionally, we achieved a better fit to the seasonal average daily flow rates.

In the second step, automated search of the best water quality model structure was performed. Due to high computational requirements we limited the search space of potential models to four experimental model structures, using different mathematical formulations for the calculation of sediment yields and nutrient loadings from urban areas. The comparison of measured and simulated suspended sediment loads indicated a lack of variability in the data used for model calibration, and consequently in the results of all experimental models. All of the models follow seasonal dynamics of the measured nutrient loads, indicating higher nitrogen and phosphorus levels during the wet season.

As it turned out, the best water quality model structure among the four experimental ones was the one using the Williams equation (Williams, 1995) for the sediment yield calculation and the Haith equation (Haith et al., 1992) for the calculation of nutrient loadings from the urban areas. The selected water quality model was also validated, based on the hydrometeorological data for the period 2009–2010.

The calibrated (and validated) hydrological and water quality models were tested in terms of determining the effects of possible changes on the catchment water quantity and quality, by using two different scenarios: 1) the climate change scenario and 2) the scenario considering an increase in a number of the connections to the existing wastewater treatment plants (WWTPs). For the first scenario analysis, we reduced the average daily precipitation values for 6,70 % (during wet season) and 15,50 % (for the dry season), as compared to the baseline scenario. We also increased the average daily temperatures (for 4,23 °C). The model calculation results suggest substantial impact of the expected climate change on the water balance of the Quarteira river catchment. By the end of the 21st century, the average yearly precipitation decrease of 70 mm (as compared to the baseline scenario) could cause a 20 % decrease in surface runoff, a 15 % decrease in baseflow and an almost 30 % decrease in average daily flow rates of the Quarteira river.

Using the second scenario analysis, we tested the influence of the increase in a number of the connections to the WWTPs on the total nitrogen and total phosphorus loadings to the Quarteira river. To this end, we assumed 80 % utilization of the existing WWTPs. This would cause a 49 % decrease in a number of the connections to the septic tanks, as compared to the baseline scenario. The total nitrogen and total phosphorus loadings from the WWTPs would increase for 62,5 % and 100 %, respectively. The realization of scenario 2 would cause a decrease of 47,44 % and 50 % in the total nitrogen and total phosphorus loadings from septic tanks. The resulting loads of the total nitrogen and total phosphorus at the outlet of the catchment would decrease for 0,12 % and 0,05 %, respectively.

Within the doctoral thesis, we managed to successfully apply the proposed AM framework to a relatively complex karstic catchment. Since the analysis of the average annual water balance and the average annual sediment and nutrient loadings confirmed the findings of previous research work, we can conclude that the proposed AM approach can be used for hydrological and water quality modelling at the watershed scale. The comparison of ProBMoT and SWAT results confirms the hypothesis that the proposed AM approach presents a comparable alternative to the existing conceptual modelling approaches. By testing various model scenarios, we confirmed a logical response of the generated models on the modified input data and parameter values. Because the simulation of complete models with fixed parameter values is very fast, the generated models could be easily incorporated into decision support systems in the field of integrated water resources management.

The main advantage of the proposed methodology is that the models are generated and optimized automatically, thus enabling automated selection of the most appropriate model structure to describe the observed system (based on the parameter calibration). At the same time, the generated models are completely transparent, much like the traditional conceptual models. The knowledge library is written in a flexible manner and can be easily extended with additional processes and/or process formulations. Utilization of the library and the proposed modelling approach enables the discovery of new models for a given system and testing of alternative expressions to describe the selected processes.

VIRI

Abbaspour, K.C. 2013. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual. Dübendorf, Eawag: 103 str.

Agência Portuguesa do Ambiente. 2013a. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.
<http://snirh.pt> (Pridobljeno 16. 2. 2013.)

Agência Portuguesa do Ambiente. 2013b. Atlas da Água.
<http://geo.snirh.pt/AtlasAgua> (Pridobljeno 16. 2. 2013.)

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements, Rim, FAO: 300 str.

Amy, G., Pitt, R., Singh, R., Bradford, W.L., LaGraffi, M.B. 1974. Water quality management planning for urban runoff. EPA 440/9-75-004. Washington, DC, U.S. EPA: 246 str.

Argent, R.M., Perraud, J.M., Rahman, J.M., Grayson, R.B., Podger, G.M. 2009. A new approach to water quality modelling and environmental decision support systems. Environ. Model. Softw. 24: 809–818.

Arnold, J.G., Fohrer, N. 2005. SWAT2000, current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. Hydrol. Process. 19, 3: 563–572.

Atanasova, N., Todorovski, L., Džeroski, S., Kompare, B. 2006. Constructing a library of domain knowledge for automated modelling of aquatic ecosystems. Ecol. Model. 194: 14–36.

Atanasova, N., Todorovski, L., Džeroski, S., Kompare, B. 2008. Application of automated model discovery from data and expert knowledge to a real-world domain, Lake Glumsø. Ecol. Model. 212: 92–98.

Atanasova, N., Džeroski, S., Kompare, B., Todorovski, L., Gal, G. 2011. Automated discovery of a model for dinoflagellate dynamics. Environ. Model. Softw. 26, 5: 658–668.

Barfield, B.J., Felton, G.K., Stevens, E.W., McCann, M. 2004. A simple model of karst spring flow using modified NRCS procedures. J. Hydrol. 287: 34–38.

Behrendt, H., Venohr, M., Hirt, U., Hofmann, J., Opitz, D., Gericke, A. 2007. The model system MONERIS. Version 2.0. User's manual. Berlin, Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries in the Forschungsverbund Berlin e.V.: 117 str.

- Bertalanffy, L. 1972. The History in Status of General System Theory. *Acad. Manage. J.* 15, 4: 407–426.
- Bizjak, A. 2008. Vodno načrtovanje in načrti upravljanja voda. *Dela* 30: 101–121.
- Bosen, J.F. 1960. A formula for approximation of saturation vapor pressure over water. *Mon. Weather Rev.* 88, 8: 275–276.
- Brečko Grubar, V. 2007. Vloga naravnogeografskih značilnosti porečja pri sonaravnem upravljanju z vodnimi viri v porečju Kamniške Bistrice. *Dela* 28: 305–321.
- Brilly, M., Šraj, M. 2005. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.
- Bunch, D.S., Gay, D.M., Welsch, R.E. 1993. Algorithm 717: Subroutines for maximum likelihood and quasi-likelihood estimation of parameters in nonlinear regression models. *ACM T. Math. Software* 19: 109–130.
- Campbell, C.W., Sullivan, S.M. 2002. Simulating time-varying cave flow and water levels using the Storm Water Management Model. *Eng. Geol.* 65: 133–139.
- Cesar, P. 2011. Primerjava različnih metod izračuna evapotranspiracije. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Cesar): 133 f.
- Chow, V.T. 1959. *Open-channel hydraulics*. New York, McGraw-Hill: 680 str.
- Climatemaps. 2013. Algarve.
<http://www.algarve.climatemaps.com> (Pridobljeno 16. 2. 2013.)
- Cohen, S.D., Hindmarsh, A.O. 1996. CVODE, A Stiff/Nonstiff ODE Solver in C. *Comput. Phys.* 10, 2: 138–143.
- Čerepnalkoski, D., Taskova, K., Todorovski, L., Atanasova, N., Džeroski, S. 2012. The influence of parameter fitting methods on model structure selection in automated modelling of aquatic ecosystems. *Ecol. Model.* 245: 136–165.
- David, O., Ascough II, J.C., Lloyd, W., Green, T.R., Rojas, K.W., Leavesley, G.H., Ahuja, L.R. 2013. A software engineering perspective on environmental modelling framework design: The Object Modelling System. *Environ. Model. Softw.* 39: 201–213.

Direcção Regional de Agricultura e Pescas do Algarve. 2013. Agrometeorologia – Informação atual e séries anuais registados nas estações meteorológicas automáticas.

<http://www.drapalg.min-agricultura.pt> (Pridobljeno 16. 2. 2013.)

Direktiva 2000/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike. UL L št. 327/1, 22.12.2000: 275–346.

Dogliani, A., Simeone, V., Giustolisi, O. 2012. The activation of ephemeral streams in karst catchments of semi-arid regions. *Catena* 99: 54–65.

Donigian, A.S., Bicknell, B.R., Imhoff, J.C. 1995. Hydrological simulation program – Fortran (HSPF). V: Singh, V.P. (ur.). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, CO, WRP: str. 395–442.

Driver, N.E., Tasker, G.D. 1990. Techniques for estimation of storm-runoff loads, volumes, and selected constituent concentrations in urban watersheds in the United States. Washington, DC, U.S. G.P.O.: 44 str.

http://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2363/pdf/wsp_2363.pdf (Pridobljeno 6. 5. 2013.)

Džeroski, S., Todorovski, L. 2003. Learning population dynamics models from data and domain knowledge. *Ecol. Model.* 170: 129–140.

EEA. 1997. Water resources problems in Southern Europe. Topic report No 15/1996. Copenhagen, EEA: 45 str.

<http://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-056-1> (Pridobljeno 11. 4. 2013.)

Engman, E.T. 1983. Roughness coefficients for routing surface runoff. V: Shen, H.T. (ur.). *Proceedings of the Conference on Frontiers in Hydraulic Engineering*, Cambridge, MA, August 9–12, 1983. New York, ASCE: str. 560–565.

European Commission – Joint Research Centre. 2013. European Soil Portal.

<http://eusoils.jrc.ec.europa.eu> (Pridobljeno 20. 3. 2013.)

Frantar, P. 2008. Vodna bilanca, GIS in ontologija. V: Perko, D., Zorn, M., Razpotnik, N., Čeh, M., Hladnik, D., Krevs, M., Podobnikar, T., Repe, B., Šumrada, R. (ur.). *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007–2008*. Ljubljana, Založba ZRC: str. 143–152.

Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.* 33, L08707: 1–4.

- Green, W.H., Ampt, G. 1911. Studies of soil physics: Part I. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1–24.
- Gregersen, J.B., Gijssbers, P.J.A., Westen, S.J.P., Blind, M. 2005. OpenMI, the essential concepts and their implications for legacy software. *Adv. Geosci.* 4: 37–44.
- Gregersen, J.B., Gijssbers, P.J.A., Westen, S.J.P. 2007. OpenMI, Open Modelling Interface. *J. Hydroinform.* 9: 175–191.
- GURS. Tehnična navodila za določanje bonitete zemljišč. Ljubljana, GURS, 91 str.
- Haith, D.A. 1985. An event-based procedure for estimating monthly sediment yields. *Trans. ASAE* 28, 6: 1916–1920.
- Haith, D.A., Shoemaker, L.L. 1987. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients. *Water Resour. Bull.* 23: 471–478.
- Haith, D.A., Mandel, R., Shyan Wu, R. 1992. GWLF – Generalized Watershed Loading Functions. Version 2.0. User's manual. Ithaca, NY, Cornell University, Department of Agricultural & Biological Engineering: 62 str.
- Hamon, W.R. 1961. Estimating Reference evapotranspiration. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, J. Hydraul. Div.* 87 (HY3): 107–120.
- Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., Riley, J.P. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. Drain Eng.* 111, 2: 113–124.
- Hawkins, R.H. 1978. Runoff curve numbers with varying site moisture. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, J. Irr. Drain. Div.* 104 (IR4): 389–398.
- Horton, R.E. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Union* 14: 446–460.
- IMPACT. 2013. Developing an Integrated Model to Predict Abiotic Habitat Conditions and Biota of Rivers Application in Climate Change Research and Water Management.
<http://www.impact.igb-berlin.de> (Pridobljeno 16. 2. 2013.)
- IPCC. 2000. Special Report on Emissions Scenarios. IPCC: 21 str.
<https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf> (Pridobljeno 10. 12. 2013.)

Korošec, P., Šilc, J., Filipič, B. 2012. The differential anti-stigmergy algorithm. *Inform. Sciences* 192: 82–97.

Kovačič, G. 2009. Hidrologija kraškega izvira Malenščica in njegovega hidrografskega zaledja. Doktorska disertacija. Koper, Univerza na Primorskem, Fakulteta za humanistične študije Koper (samozaložba G. Kovačič): 329 f.

Kuo, C.Y., Cave, K.A., Loganathan, G.V. 1988. Planning of urban best management practices. *Water Resour. Bull.* 24, 1: 125–132.

Laniak, G.F., Olchin, G., Goodall, J., Voinov, A., Hill, M., Glynn, P., Whelan, G., Geller, G., Quinn, N., Blind, M., Peckam, S., Reaney, S., Gaber, N., Kennedey, R., Hughes, A. 2013. Integrated environmental modelling: A vision and roadmap for the future. *Environ. Model. Softw.* 39: 3–23.

Leavesley, G.H., Markstrom, S.L., Restrepo, P.J., Viger, R.J. 2002. A modular approach to addressing model design, scale, and parameter estimation issues in distributed hydrological modelling. *Hydrol. Process.* 16: 173–187.

Lin, S.D. 2001. *Water and Wastewater Calculations Manual*. New York, McGraw-Hill: 854 str.

Menzel, R.G. 1980. Enrichment ratios for water quality modelling. V: Knisel, W.G. (ur.). *CREAMS. A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. Washington, DC, USDA: str. 486–492.

Mirsal, I.A. 2008. *Soil Pollution. Origin, Monitoring & Remediation*. 2nd Edition. Berlin, Heidelberg, Springer: 312 str.

Monod, J. 1949. The Growth of Bacterial Culture. *Annu. Rev. Microbiol.* 3: 371–394.

Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. V: Fogg, G.E. (ur.). *The state and movement of water in living organisms: proceedings of the 19th Symposium of the Society for Experimental Biology*, Swansea, UK, 8–12 September 1964. Cambridge, Cambridge University Press: str. 205–234.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50: 885–900.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 3: 282–290.

- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2011. Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation. Version 2009. Temple, TX, Texas Water Resources Institute: 618 str.
- Niraula, R., Kalin, L., Srivastava, P., Anderson, C.J. 2013. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF. *Ecol. Model.* 268: 123–133.
- Novotny, V., Chesters, G. 1981. *Handbook of Nonpoint Pollution: Sources and Management*. New York, Van Nostrand Reinhold: 555 str.
- NRCS. 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55. Washington, DC, USDA: 164 str.
<http://www.cpesec.org/reference/tr55.pdf> (Pridobljeno 6. 5. 2013.)
- NRCS. 1998. *Soil Quality Resource Concerns: Available Water Capacity*. Washington, DC, USDA: 2 str.
http://urbanext.illinois.edu/soil/sq_info/awc.pdf (Pridobljeno 10. 5. 2013.)
- Ogrosky, H.O., Mockus, V. 1964. Hydrology of agricultural lands. V: Chow, V.T. (ur.). *Handbook of Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill: poglavje 21, str. 1–97.
- Panagos, P., Meusburger, K., Alewell, C., Montanarella, L. 2012. Soil erodibility estimation using LUCAS point survey data of Europe. *Environ. Model. Softw.* 30: 143–145.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond. A* 193, 1032: 120–145.
- Pintar, M. 2006. *Osnove namakanja s poudarkom na vrtninah in sadnih vrstah v zahodni, osrednji in južni Sloveniji*. Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano: 55 str.
http://www.mko.gov.si/fileadmin/mko.gov.si/pageuploads/publikacije/Namakanje/11_Osnove_namak_s_poud_na_vrtninah_in_sadnih_vrstah_v_Z_O_J_Slov.pdf (Pridobljeno 28. 5. 2013.)
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Wea. Rev.* 100: 81–92.
- Rao, L.Y., Sun, G., Ford, C.R., Vose, J.M. 2011. Modelling Reference evapotranspiration of two forested watersheds in the southern Appalachians. *Trans. ASABE* 54, 6: 2067–2078.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agricultural Handbook Number 703. Washington, DC, USDA ARS: 384 str.

Repe, B. 2006. Svetovna klasifikacija prsti. Geografski obzornik 53, 1: 8–22.

Ribeiro, L., Veiga da Cunha, L. 2010. Groundwater in the Southern Member States of the European Union: Country report for Portugal. EASAC: 29 str.

http://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Portugal_Groundwater_country_report.pdf

(Pridobljeno 10. 12. 2013.)

Salvador, N., Monteiro, J.P., Hugman, R., Stigter, T.Y., Reis, E. 2012. Quantifying and modelling the contribution of streams that recharge the Querença-Silves aquifer in the south of Portugal. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 12: 3217–3227.

Santos, F.D., Forbes, K., Moita, R. 2001. Climate Change in Portugal – Scenarios, Impacts and Adaptation Measures SIAM. Executive summary and conclusions.

Sartor, J.D., Boyd, G.B. 1972. Water pollution aspects of street surface contaminants. EPA-R2-72-081. Washington, DC, U.S. EPA: 236 str.

Schwarz, G.E., Hoos, A.B., Alexander, R.B., Smith, R.A. 2006. The SPARROW Surface Water Quality Model – Theory, Application and User Documentation. Reston, VA, USGS: 248 str.

<http://pubs.usgs.gov/tm/2006/tm6b3/PDF.htm> (Pridobljeno 20. 1. 2012.)

Selker, J.S., Haith, D.A., Reynolds, J.E. 1990. Calibration and testing of a daily rainfall erosivity model. Trans. ASAE, 33, 5: 1612–1618.

Shaw, E.M. 1994. Hydrology in practice. 3rd edition. London, Chapman & Hall: 569 str.

Smedema, L.K., Rycroft, D.W. 1983. Land drainage: Planning and design of agricultural drainage systems. Ithaca, NY, Cornell University Press: 376 str.

Smolen, M.D. 2007. Phosphorus and Water Quality. Stillwater, OK, Oklahoma State University, Division of Agricultural Sciences and Natural Resources: 4 str.

<http://poultrywaste.okstate.edu/files/BAE-1521web.pdf> (Pridobljeno 10. 12. 2013.)

Sohel, S.I. 2012. Ecohydrological Modelling of a Mediterranean Catchment (Quarteira, Portugal) using SWAT: Model Setup, Calibration and Validation. Magistrsko delo. Kiel, Christian-Albrechts-University, Department of Hydrology and Water Resources Management (samozaložba S.I. Sohel): 66 f.

- Staley, N.A. 2006. Modelling Channel Erosion at the Watershed Scale: A Comparison of GWLF, SWAT, and CONCEPTS. Magistrska naloga. Blacksburg, VA, State University, Virginia Polytechnic Institute and State University (samozaložba N.A. Staley): 161 f.
- Stankovski, V. 2009. Tehnologije semantične mreže pri računalniško integrirani graditvi. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba V. Stankovski): 217 f.
- Stewart, B.A., Woolhiser, D.A., Wischmeier, W.H., Caro, J.H., Frere, M.H. 1975. Control of water pollution from cropland. Volume 1: A manual for guideline development. EPA-600/2-75-026a. Washington, DC, U.S. EPA, Office of Research and Development: 118 str.
- Stigter, T.Y., Monteiro, J.P., Nunes, L.M., Vieira, J., Cunha, M.C., Ribeiro, L., Nascimento, J., Lucas, H. 2009. Screening of sustainable groundwater sources for integration into a regional drought-prone water supply system. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13: 1185–1199.
- Stoltenberg, N.L., White, J.L. 1953. Selective loss of plant nutrients by erosion. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 17: 406–410.
- Storn, R., Price, K. 1997. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *J. Global Optim.* 11: 341–359.
- Škerjanec, M., Atanasova, N., Čerepnalkoski, D., Džeroski, S., Kompare, B. 2014. Development of a knowledge library for automated watershed modelling. *Environ. Model. Softw.* 54: 60–72.
- Tarboton, D.G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *W. Resour. Res.* 33, 2: 309–319.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Boston, McGraw-Hill: 1819 str.
- Todorovski, L., Bridewell, W., Shiran, O., Langley, P. 2005. Inducing hierarchical process models in dynamic domains. V: *Proceedings of the Twentieth National Conference on Artificial Intelligence*. Menlo Park, CA, AAAI Press: str. 892–897.
- Turk, G. 2011. *Verjetnostni račun in statistika*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 240 str.
- U.S. EPA. 1999. Protocol for Developing Nutrient TMDLs. EPA 841-B-99-007. Washington, DC, U.S. EPA, Office of Water: 137 str.

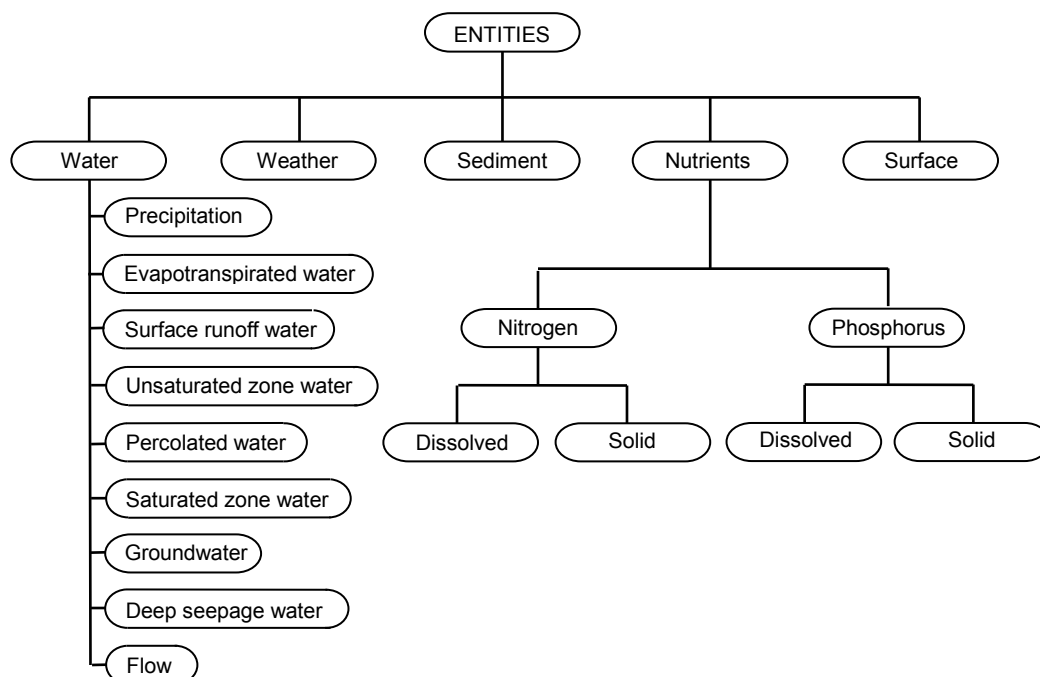
- Vale, M., Holman, I.P. 2009. Understanding the hydrological functioning of a shallow lake system within a coastal karstic aquifer in Wales, UK. *J. Hydrol.* 376: 285–294.
- Van Liew, M.W., Arnold, J.G., Garbrecht, J.D. 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASABE* 46, 6: 1539–1551.
- Van Liew, M.W., Arnold, J.G., Bosch, D.D. 2005. Problems and Reference of autocalibrating a hydrological model. *Trans. ASAE* 48, 3: 1025–1040.
- Vanoni, V.A. 1975. Sedimentation Engineering, Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54. New York, ASCE.
- Voinov, A., Costanza, R., Wainger, L.A., Boumans, R.M.J., Villa, F., Maxwell, T., Voinov, H. 1999. Patuxent landscape model, integrated ecological economic modelling of a watershed. *Environ. Model. Softw.* 14: 473–491.
- Voinov, A., Fitz, C., Boumans, R., Costanza, R. 2004. Modular ecosystem modelling. *Environ. Model. Softw.* 19: 285–304.
- Welsh, W.D., Vaze, J., Dutta, D., Rassam, D., Rahman, J.M., Jolly, I.D., Wallbrink, P., Podger, G.M., Bethune, M., Hardy, M.J., Teng, J., Lerat, J. 2013. An integrated modelling framework for regulated river systems. *Environ. Model. Softw.* 39: 81–102.
- Williams, J.R. 1995. The EPIC model. V: Singh, V.P. (ur.). Computer models of watershed hydrology. Highlands Ranch, CO, Water Resources Publications: str. 909–1000.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. Washington, DC, USDA: 58 str.
- Worden, K., Manson, G. 2012. On the identification of hysteretic systems. Part I: Fitness landscapes and evolutionary identification. *Mech. Syst. Signal Process.* 29: 201–212.
- Yang, Y., Ye, Z., Liu, B., Zeng, X., Fu, S., Lu, B. 2014. Nitrogen enrichment in runoff sediments as affected by soil texture in Beijing mountain area. 2014. *Environ. Monit. Assess.* 186: 971–978.
- Yapo, P.O., Gupta, H.V., Sorooshian, S. 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *J. Hydrol.* 181: 23–48.
- Zhang, X., Zheng, J., Li, S. 2004. The enrichments of organic matter and total nitrogen in sediment as affected by relevant factors. *J. Geogr. Sci.* 14, 4: 495–502.

Ta stran je namenoma prazna.

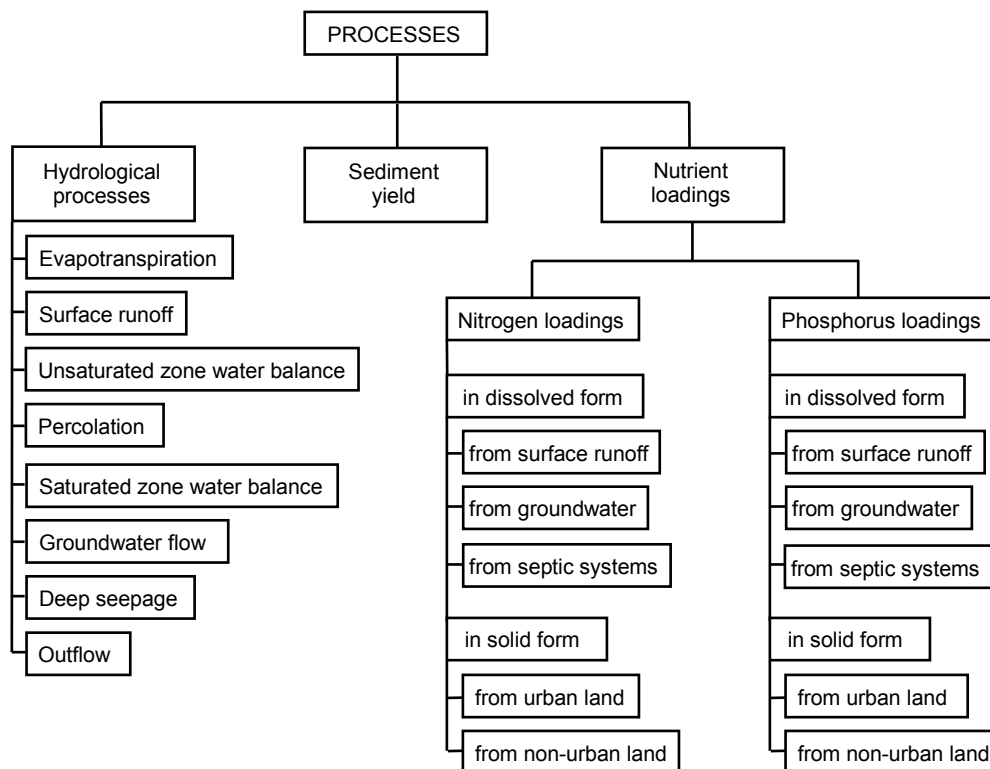
PRILOGA A: HIERARHIČNI PRIKAZ PREDLOG A) ENTITET IN B) PROCESOV, VSEBOVANIH V KNJIŽNICI (V ANGLEŠČINI)

APPENDIX A: HIERARCHICAL REPRESENTATION OF THE A) ENTITY AND B) PROCESS INSTANCES, INCLUDED IN THE LIBRARY (IN ENGLISH)

A



B



Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B: DOMENSKA KNJIŽNICA

APPENDIX B: THE DOMAIN LIBRARY

library WatershedModelling;

//Compartments

```
template compartment SpatialUnit {
    entities:
        Water,
        Precipitation,
        SurfaceRunoffWater,
        EvapotranspirationWater,
        ReferenceEvapotranspirationWater,
        EvapotranspirationLimit,
        UnsaturatedZoneWater,
        UnsaturatedZoneWaterDelta,
        PercolationWater,
        ShallowSaturatedZoneWater,
        ShallowSaturatedZoneWaterDelta,
        Groundwater,
        SeepageFlowWater,
        Flow,
        SubFlow,
        TotalFlow,
        Weather,
        Surface,
        Sediment,
        SubSediment,
        TotalSediment,
        Nutrient,
        Nitrogen,
        DissolvedNitrogen,
        SurfaceRunoffDissolvedNitrogen,
        GroundwaterDissolvedNitrogen,
        SepticDissolvedNitrogen,
        DissolvedNitrogenPointSource,
        SolidNitrogen,
        RuralSolidNitrogen,
        UrbanSolidNitrogen,
        UrbanSolidNitrogenDelta,
        TotalNitrogen,
        SubTotalNitrogen,
        FinalTotalNitrogen,
        Phosphorous,
        DissolvedPhosphorous,
        SurfaceRunoffDissolvedPhosphorous,
        GroundwaterDissolvedPhosphorous,
        SepticDissolvedPhosphorous,
        DissolvedPhosphorousPointSource,
        SolidPhosphorous,
        RuralSolidPhosphorous,
        UrbanSolidPhosphorous,
        UrbanSolidPhosphorousDelta,
        TotalPhosphorous,
        SubTotalPhosphorous,
        FinalTotalPhosphorous;
```


processes:

SurfaceRunoff,
Evapotranspiration,
ReferenceEvapotranspiration,
ReferenceEvapotranspirationHamon,
ReferenceEvapotranspirationHargreaves,
EvapotranspirationLimitation,
UnsaturatedZoneWaterBalanceChange,
UnsaturatedZoneWaterBalance,
Percolation,
ShallowSaturatedZoneWaterBalanceChange,
ShallowSaturatedZoneWaterBalance,
GroundwaterDischarge,
SeepageFlow,
Outflow,
SedimentYield,
SedimentYieldHaith,
SedimentYieldWilliams,
NutrientLoad,
DissolvedLoad,
DissolvedNitrogenLoad,
SurfaceRunoffDissolvedNitrogenLoad,
GroundwaterDissolvedNitrogenLoad,
SepticDissolvedNitrogenLoad,
DissolvedPhosphorousLoad,
SurfaceRunoffDissolvedPhosphorousLoad,
GroundwaterDissolvedPhosphorousLoad,
SepticDissolvedPhosphorousLoad,
SolidLoad,
SolidNitrogenLoad,
RuralSolidNitrogenLoad,
NitrogenAccumulation,
NitrogenAccumulationChange,
UrbanSolidNitrogenLoad,
UrbanSolidNitrogenLoadHaith,
UrbanSolidNitrogenLoadUSGS,
SolidPhosphorousLoad,
RuralSolidPhosphorousLoad,
PhosphorousAccumulation,
PhosphorousAccumulationChange,
UrbanSolidPhosphorousLoad,
UrbanSolidPhosphorousLoadHaith,
UrbanSolidPhosphorousLoadUSGS,
LoadSummation,
NitrogenLoadSummation,
DissolvedNitrogenLoadSummation,
SolidNitrogenLoadSummation,
TotalNitrogenLoad,
PhosphorousLoadSummation,
DissolvedPhosphorousLoadSummation,
SolidPhosphorousLoadSummation,
TotalPhosphorousLoad,
SedimentLoad,
SubOutflow,
SubNitrogenLoad,
SubPhosphorousLoad,
SubSedimentLoad,
OutflowSummation,
NitrogenSummation,
PhosphorousSummation,
SedimentSummation;

```
        compartments:
            SpatialUnit;
    }

// Entities

// Water

template entity Water {
    vars:
        amountOfWater {aggregation:sum; unit:"mm/day"; range:<0,inf>;}
}

template entity Precipitation : Water {
    vars:
        ant {aggregation:sum; unit:"mm/day"; range:<0,inf>;}
}

template entity SurfaceRunoffWater : Water {}

template entity EvapotranspirationWater : Water {}

template entity ReferenceEvapotranspirationWater : Water {}

template entity EvapotranspirationLimit : Water {}

template entity UnsaturatedZoneWater : Water {}

template entity UnsaturatedZoneWaterDelta : Water {}

template entity PercolationWater : Water {}

template entity ShallowSaturatedZoneWater : Water {}

template entity ShallowSaturatedZoneWaterDelta : Water {}

template entity Groundwater : Water {}

template entity SeepageFlowWater : Water {}

template entity Flow : Water {
    vars:
        rate {aggregation:sum; unit: "m3/s"; range:<0,inf>;}
}

template entity SubFlow : Flow {}

template entity TotalFlow : Flow {}

// Weather

template entity Weather {
    vars:
        temperature {aggregation:sum; unit:"°C"; range:<0,40>},
        maxTemperature {aggregation:sum; unit:"°C"; range:<0,40>},
        minTemperature {aggregation:sum; unit:"°C"; range:<0,40>},
        radiation {aggregation:sum; unit:"MJ/m2*day"; range:<0,50>},
        daylightHours {aggregation:sum; unit:"h/day"; range:<0,24>},
        satVapPressure {aggregation:sum; unit:"mbar"; range:<0,80>;}
}
```

// Surface

```
template entity Surface {
  consts:
    area {range:<0,inf>; unit:"ha"},
    imp {range:<0,1>};
}
```

// Sediment

```
template entity Sediment {
  vars:
    mass {aggregation:sum; unit:"t/day"; range:<0,inf>},
    erosivity {aggregation:sum; unit: ""; range:<0,inf>},
    lnAlpha {aggregation:sum; unit: ""; range:<-inf,inf>},
    peakRunoffRate {aggregation:sum; unit: "m3/s"; range:<0,inf>},
    load {aggregation:sum; unit:"t/day"; range:<0,inf>};
}
```

```
template entity SubSediment {
  vars:
    load {aggregation:sum; unit:"t/day"; range:<0,inf>};
}
```

```
template entity TotalSediment {
  vars:
    load {aggregation:sum; unit:"t/day"; range:<0,inf>};
}
```

// Nutrients

```
template entity Nutrient {
  vars:
    load {aggregation:sum; unit: "kg/day"; range:<0,inf>};
}
```

```
template entity Nitrogen : Nutrient {}
```

```
template entity FinalTotalNitrogen : Nitrogen {}
```

```
template entity SubTotalNitrogen : Nitrogen {}
```

```
template entity TotalNitrogen : Nitrogen {}
```

```
template entity DissolvedNitrogen : Nitrogen {}
```

```
template entity SurfaceRunoffDissolvedNitrogen : DissolvedNitrogen {}
```

```
template entity GroundwaterDissolvedNitrogen : DissolvedNitrogen {}
```

```
template entity SepticDissolvedNitrogen : DissolvedNitrogen {}
```

```
template entity DissolvedNitrogenPointSource : DissolvedNitrogen {}
```

```
template entity SolidNitrogen : Nitrogen {}
```

```
template entity RuralSolidNitrogen : SolidNitrogen {}
```

```
template entity UrbanSolidNitrogen : SolidNitrogen {
  vars:
```

```
        accumulation {aggregation:sum; unit: "kg/ha*day";
range:<0,inf>};
}

template entity UrbanSolidNitrogenDelta {
    vars:
        accumulation {aggregation:sum; unit: "kg/ha*day";
range:<0,inf>};
}

template entity Phosphorous : Nutrient {}

template entity FinalTotalPhosphorous : Phosphorous {}

template entity SubTotalPhosphorous : Phosphorous {}

template entity TotalPhosphorous : Phosphorous {}

template entity DissolvedPhosphorous : Phosphorous {}

template entity SurfaceRunoffDissolvedPhosphorous : DissolvedPhosphorous {}

template entity GroundwaterDissolvedPhosphorous : DissolvedPhosphorous {}

template entity SepticDissolvedPhosphorous : DissolvedPhosphorous {}

template entity DissolvedPhosphorousPointSource : DissolvedPhosphorous {}

template entity SolidPhosphorous : Phosphorous {}

template entity RuralSolidPhosphorous : SolidPhosphorous {}

template entity UrbanSolidPhosphorous : SolidPhosphorous {
    vars:
        accumulation {aggregation:sum; unit: "kg/ha*day";
range:<0,inf>};
}

template entity UrbanSolidPhosphorousDelta {
    vars:
        accumulation {aggregation:sum; unit: "kg/ha*day";
range:<0,inf>};
}

// Processes

// Hydrologic processes

template process SurfaceRunoff (prec: Precipitation, sr :
SurfaceRunoffWater) {
    consts:
        cn {range:<30,100>},
        k {range:<1,4>};
    equations:
        sr.amountOfWater = max(0, (pow(max(0, prec.amountOfWater - 0.2 *
25.4 * (1000 / max (cn / (0.4036 + 0.0059 * cn) * prec.ant / (prec.ant +
k), cn / (2.334 - 0.01334 * cn)) - 10)),2))/(prec.amountOfWater + 0.8 *
25.4 * (1000/max (cn / (0.4036 + 0.0059 * cn) * prec.ant / (prec.ant + k),
cn / (2.334 - 0.01334 * cn)) - 10)));
}
```

```

template process Evapotranspiration (et : EvapotranspirationWater, etl :
EvapotranspirationLimit, et0 : ReferenceEvapotranspirationWater) {
  consts:
    coverCoeff {range:<0.3,1.2>};
  equations:
    et.amountOfWater = min(coverCoeff *
et0.amountOfWater,etl.amountOfWater);
}

template process ReferenceEvapotranspiration (et0 :
ReferenceEvapotranspirationWater, w : Weather) {
}

template process ReferenceEvapotranspirationHamon :
ReferenceEvapotranspiration {
  equations:
    et0.amountOfWater = (0.21 * pow(w.daylightHours,2) *
w.satVapPressure) / (w.temperature + 273);
}

template process ReferenceEvapotranspirationHargreaves :
ReferenceEvapotranspiration {
  equations:
    et0.amountOfWater = (0.0023 * w.radiation *
pow(w.maxTemperature - w.minTemperature,0.5) * (w.temperature + 17.8)) /
2.257;
}

template process EvapotranspirationLimitation (prec : Precipitation, sr :
SurfaceRunoffWater, usz : UnsaturatedZoneWater, etl :
EvapotranspirationLimit) {
  equations:
    etl.amountOfWater = max(0,usz.amountOfWater +
prec.amountOfWater - sr.amountOfWater);
}

template process UnsaturatedZoneWaterBalanceChange (prec : Precipitation,
sr : SurfaceRunoffWater, et : EvapotranspirationWater, perc :
PercolationWater, uszDelta : UnsaturatedZoneWaterDelta) {
  equations:
    td(uszDelta.amountOfWater) = prec.amountOfWater -
sr.amountOfWater - et.amountOfWater - perc.amountOfWater;
}

template process UnsaturatedZoneWaterBalance (uszDelta :
UnsaturatedZoneWaterDelta, usz : UnsaturatedZoneWater) {
  equations:
    usz.amountOfWater = max(0,uszDelta.amountOfWater);
}

template process Percolation (perc : PercolationWater, prec :
Precipitation, sr : SurfaceRunoffWater, et : EvapotranspirationWater, usz :
UnsaturatedZoneWater) {
  consts:
    soilWaterCapacity {range : <0,inf>; unit : "mm/day"};
  equations:
    perc.amountOfWater = max(0,usz.amountOfWater +
prec.amountOfWater - sr.amountOfWater - et.amountOfWater -
soilWaterCapacity);
}

```

```
template process ShallowSaturatedZoneWaterBalanceChange (sszDelta :  
ShallowSaturatedZoneWaterDelta, perc : PercolationWater, gw : Groundwater,  
sfw : SeepageFlowWater) {  
  equations:  
    td(sszDelta.amountOfWater) = perc.amountOfWater -  
gw.amountOfWater - sfw.amountOfWater;  
}
```

```
template process ShallowSaturatedZoneWaterBalance (sszDelta :  
ShallowSaturatedZoneWaterDelta, ssz : ShallowSaturatedZoneWater) {  
  equations:  
    ssz.amountOfWater = max(0,sszDelta.amountOfWater);  
}
```

```
template process GroundwaterDischarge (gw : Groundwater, ssz :  
ShallowSaturatedZoneWater) {  
  consts:  
    rc {range:<0,1>};  
  equations:  
    gw.amountOfWater = rc * ssz.amountOfWater;  
}
```

```
template process SeepageFlow (sfw : SeepageFlowWater, ssz :  
ShallowSaturatedZoneWater) {  
  consts:  
    sc {range:<0,1>};  
  equations:  
    sfw.amountOfWater = sc * ssz.amountOfWater;  
}
```

```
template process Outflow (f: Flow, sr: SurfaceRunoffWater, gw :  
Groundwater, surf: Surface) {  
  consts:  
    factor {range:<0,1>};  
  equations:  
    f.amountOfWater = (factor * sr.amountOfWater) +  
gw.amountOfWater,  
    f.rate = f.amountOfWater * 0.001 * 10000 * surf.area / (24 *  
3600);  
}
```

// Sediment yield

```
template process SedimentYield (s : Sediment, sr: SurfaceRunoffWater, prec:  
Precipitation, surf : Surface) {  
  consts:  
    kUsle {range : <0,0.6>},  
    cUsle {range : <0.001,0.65>},  
    pUsle {range : <0,1>},  
    lsUsle {range : <0,13>},  
    tConc {range : <0,inf>; unit : "h"},  
    erosCoeff {range : <0,0.5>},  
    dr {range : <0.03,0.35>};  
  equations:  
    s.peakRunoffRate = (max(tConc / 24, (1 - pow(2.71828, 2 * tConc  
* s.lnAlpha))) * sr.amountOfWater * surf.area) / (360 * tConc);  
}
```

```
template process SedimentYieldHaith : SedimentYield {  
  equations:
```

```

        s.erosivity = 64.6 * erosCoeff * pow(prec.amountOfWater * 0.1,
1.81),
        s.mass = 0.132 * s.erosivity * surf.area * kUsle * cUsle *
pUsle * lsUsle * dr * pow(sr.amountOfWater * 0.1,5/3);
    }

template process SedimentYieldWilliams : SedimentYield {
    equations:
        s.mass = 11.8 * pow(sr.amountOfWater * surf.area *
s.peakRunoffRate, 0.56) * kUsle * cUsle * pUsle * lsUsle ;
    }

// Nutrient loadings

template process NutrientLoad {}

template process DissolvedLoad : NutrientLoad {}

template process DissolvedNitrogenLoad : DissolvedLoad {}

template process SurfaceRunoffDissolvedNitrogenLoad (sr :
SurfaceRunoffWater, surf : Surface, srDN : SurfaceRunoffDissolvedNitrogen)
: DissolvedNitrogenLoad {
    consts:
        srDNconc {range : <0,inf>; unit : "mg/l"};
    equations:
        srDN.load = 0.01 * srDNconc * sr.amountOfWater * surf.area;
    }

template process GroundwaterDissolvedNitrogenLoad (gw : Groundwater, surf :
Surface, gwDN : GroundwaterDissolvedNitrogen) : DissolvedNitrogenLoad {
    consts:
        gwDNconc {range : <0,inf>; unit: "mg/l"};
    equations:
        gwDN.load = 0.01 * gwDNconc * gw.amountOfWater * surf.area;
    }

template process SepticDissolvedNitrogenLoad (gw : Groundwater, sDN :
SepticDissolvedNitrogen) : DissolvedNitrogenLoad {
    consts:
        numberOfInhabitants {range:<0,inf>; unit: "P"},
        sDNproduction {range:<0,inf>; unit: "g/P*day"},
        plantUptake {range:<0,inf>; unit: "g/P*day"},
        gwTot {range:<0,inf>; unit: "mm"};
    equations:
        sDN.load = 0.001 * numberOfInhabitants * (sDNproduction -
plantUptake) * gw.amountOfWater / gwTot;
    }

template process DissolvedPhosphorousLoad : DissolvedLoad {}

template process SurfaceRunoffDissolvedPhosphorousLoad (sr :
SurfaceRunoffWater, surf : Surface, srDP :
SurfaceRunoffDissolvedPhosphorous): DissolvedPhosphorousLoad {
    consts:
        srDPconc {range : <0,inf>; unit : "mg/l"};
    equations:
        srDP.load = 0.01 * srDPconc * sr.amountOfWater * surf.area;
    }

```

```
template process GroundwaterDissolvedPhosphorousLoad (gw : Groundwater,
surf : Surface, gwDP : GroundwaterDissolvedPhosphorous) :
DissolvedPhosphorousLoad {
  consts:
    gwDPconc {range : <0,inf>; unit: "mg/l"};
  equations:
    gwDP.load = 0.01 * gwDPconc * gw.amountOfWater * surf.area;
}
```

```
template process SepticDissolvedPhosphorousLoad (gw : Groundwater, sDP :
SepticDissolvedPhosphorous) : DissolvedPhosphorousLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants {range:<0,inf>; unit: "P"},
    sDPproduction {range:<0,inf>; unit: "g/P*day"},
    plantUptake {range:<0,inf>; unit: "g/P*day"},
    gwTot {range:<0,inf>; unit: "mm"};
  equations:
    sDP.load = 0.001 * numberOfInhabitants * (sDPproduction -
plantUptake) * gw.amountOfWater / gwTot;
}
```

```
template process SolidLoad : NutrientLoad {}
```

```
template process SolidNitrogenLoad : SolidLoad {}
```

```
template process RuralSolidNitrogenLoad (s : Sediment, rSN :
RuralSolidNitrogen) : SolidNitrogenLoad {
  consts:
    rSNconc {range : <0,inf>; unit : "g/t"},
    nEnrichmentRatio {range:<1,5>};
  equations:
    rSN.load = 0.001 * rSNconc * nEnrichmentRatio * s.mass;
}
```

```
template process NitrogenAccumulationChange (uSNdelta :
UrbanSolidNitrogenDelta) {
  consts:
    nAccRate {range:<0,1>; unit : "kg/ha*day"},
    nDeplRate {range:<0,1>; unit : "/day"};
  equations:
    td(uSNdelta.accumulation) = nAccRate - nDeplRate *
uSNdelta.accumulation;
}
```

```
template process NitrogenAccumulation (uSN : UrbanSolidNitrogen, uSNdelta :
UrbanSolidNitrogenDelta) {
  equations:
    uSN.accumulation = max(0,uSNdelta.accumulation);
}
```

```
template process UrbanSolidNitrogenLoad (prec : Precipitation, sr :
SurfaceRunoffWater, uSN : UrbanSolidNitrogen, surf : Surface) :
SolidNitrogenLoad {
  consts:
    betaN0 {range:<1,5>},
    betaN1 {range:<0.7,1>},
    betaN2 {range:<0.4,1.1>},
    betaN3 {range:<0.4,0.7>},
    betaN4 {range:<1.2,1.9>};
}
```



```

template process UrbanSolidNitrogenLoadHaith : UrbanSolidNitrogenLoad {
  equations:
    uSN.load = (1 - exp(-1.81 * sr.amountOfWater / 10)) *
uSN.accumulation * surf.area * surf.imp;
}

template process UrbanSolidNitrogenLoadUSGS : UrbanSolidNitrogenLoad {
  equations:
    uSN.load = (betaN0 * pow(prec.amountOfWater / 25.4, betaN1) *
pow(surf.area * surf.imp / 259, betaN2) * pow(surf.imp * 100 + 1, betaN3) *
betaN4) / 2.205;
}

template process SolidPhosphorousLoad : SolidLoad {}

template process RuralSolidPhosphorousLoad (s : Sediment, rSP :
RuralSolidPhosphorous) : SolidPhosphorousLoad {
  consts:
    rSPconc {range : <0,inf>; unit : "g/t"},
    pEnrichmentRatio {range:<1,5>;};
  equations:
    rSP.load = 0.001 * rSPconc * pEnrichmentRatio * s.mass;
}

template process PhosphorousAccumulationChange (uSPdelta :
UrbanSolidPhosphorousDelta) {
  consts:
    pAccRate {range:<0,0.01>; unit : "kg/ha*day"},
    pDeplRate {range:<0,1>; unit : "/day"};
  equations:
    td(uSPdelta.accumulation) = pAccRate - pDeplRate *
uSPdelta.accumulation;
}

template process PhosphorousAccumulation (uSP : UrbanSolidPhosphorous,
uSPdelta : UrbanSolidPhosphorousDelta) {
  equations:
    uSP.accumulation = max(0,uSPdelta.accumulation);
}

template process UrbanSolidPhosphorousLoad (prec : Precipitation, sr :
SurfaceRunoffWater, uSP : UrbanSolidPhosphorous, surf : Surface) :
SolidPhosphorousLoad {
  consts:
    betaP0 {range:<0.6,1.8>;},
    betaP1 {range:<0.8,1.1>;},
    betaP2 {range:<0.6,0.9>;},
    betaP3 {range:<0.2,0.5>;},
    betaP4 {range:<1.7,2.3>;};
}

template process UrbanSolidPhosphorousLoadHaith : UrbanSolidPhosphorousLoad
{
  equations:
    uSP.load = (1 - exp(-1.81 * sr.amountOfWater / 10)) *
uSP.accumulation * surf.area * surf.imp;
}

template process UrbanSolidPhosphorousLoadUSGS : UrbanSolidPhosphorousLoad
{
  equations:

```

```
        uSP.load = (betaP0 * pow(prec.amountOfWater / 25.4, betaP1) *
pow(surf.area * surf.imp / 259, betaP2) * pow(surf.imp * 100 + 1, betaP3) *
betaP4) / 2.205;
    }

template process LoadSummation {}

template process NitrogenLoadSummation : LoadSummation {}

template process DissolvedNitrogenLoadSummation (dn : DissolvedNitrogen,
srDN : SurfaceRunoffDissolvedNitrogen, gwDN : GroundwaterDissolvedNitrogen,
sDN : SepticDissolvedNitrogen, psDN : DissolvedNitrogenPointSource, f :
Flow) : NitrogenLoadSummation {
    consts:
        factor {range:<0,1>},
        fTot {range:<0,inf>; unit: "mm"};
    equations:
        dn.load = (factor * srDN.load) + gwDN.load + sDN.load + (factor
* psDN.load * f.amountOfWater / flowTot);
}

template process SolidNitrogenLoadSummation (sn : SolidNitrogen, rSN :
RuralSolidNitrogen, uSN : UrbanSolidNitrogen): NitrogenLoadSummation {
    consts:
        factor {range:<0,1>};
    equations:
        sn.load = (factor * rSN.load) + (factor * uSN.load);
}

template process TotalNitrogenLoad (totN : TotalNitrogen, dn :
DissolvedNitrogen, sn : SolidNitrogen) : NitrogenLoadSummation {
    equations:
        totN.load = dn.load + sn.load;
}

template process PhosphorousLoadSummation : LoadSummation {}

template process DissolvedPhosphorousLoadSummation (dp :
DissolvedPhosphorous, srDP : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorous, gwDP :
GroundwaterDissolvedPhosphorous, sDP : SepticDissolvedPhosphorous, psDP :
DissolvedPhosphorousPointSource, f : Flow) : PhosphorousLoadSummation {
    consts:
        factor {range:<0,1>},
        fTot {range:<0,inf>; unit: "mm"};
    equations:
        dp.load = (factor * srDP.load) + gwDP.load + sDP.load + (factor
* psDP.load * f.amountOfWater / flowTot);
}

template process SolidPhosphorousLoadSummation (sp : SolidPhosphorous, rSP :
RuralSolidPhosphorous, uSP : UrbanSolidPhosphorous) :
PhosphorousLoadSummation {
    consts:
        factor {range:<0,1>};
    equations:
        sp.load = (factor * rSP.load) + (factor * uSP.load);
}

template process TotalPhosphorousLoad (totP : TotalPhosphorous, dp :
DissolvedPhosphorous, sp : SolidPhosphorous) : PhosphorousLoadSummation{
    equations:
```

```
        totP.load = dp.load + sp.load;
    }

    template process SedimentLoad (sed : Sediment) {
        consts:
            factor {range:<0,1>};
        equations:
            sed.load = factor * sed.mass;
    }

// Intercompartmental processes

    template process SubOutflow (subF : SubFlow, compFs : Flow<1,inf>) {
        equations:
            subF.amountOfWater = <compF:compFs>.amountOfWater,
            subF.rate = <compF:compFs>.rate;
    }

    template process SubNitrogenLoad (subTN : SubTotalNitrogen, compTNs :
    TotalNitrogen<1,inf>) {
        equations:
            subTN.load = <compTN:compTNs>.load;
    }

    template process SubPhosphorousLoad (subTP : SubTotalPhosphorous, compTPs :
    TotalPhosphorous<1,inf>) {
        equations:
            subTP.load = <compTP:compTPs>.load;
    }

    template process SubSedimentLoad (subSed : SubSediment, compSEds :
    Sediment<1,inf>) {
        equations:
            subSed.load = <compSED:compSEds>.load;
    }

    template process OutflowSummation (totalF : TotalFlow, compTFs :
    SubFlow<1,inf>) {
        equations:
            totalF.amountOfWater = <compTF:compTFs>.amountOfWater,
            totalF.rate = <compTF:compTFs>.rate;
    }

    template process NitrogenSummation (finTN : FinalTotalNitrogen, compSubTNs
    : SubTotalNitrogen<1,inf>) {
        equations:
            finTN.load = <compSubTN:compSubTNs>.load;
    }

    template process PhosphorousSummation (finTP : FinalTotalPhosphorous,
    compSubTPs : SubTotalPhosphorous<1,inf>) {
        equations:
            finTP.load = <compSubTP:compSubTPs>.load;
    }

    template process SedimentSummation (totalSed : TotalSediment, compSSs :
    SubSediment<1,inf>) {
        equations:
            totalSed.load = <compSS:compSSs>.load;
    }

```

PRILOGA C: PARAMETRI, VKLJUČENI V KNJIŽNICO ZA MODELIRANJE POREČIJ

APPENDIX C: PARAMETERS, INCLUDED IN THE WATERSHED MODELLING LIBRARY

Entiteta / proces	Konstanta	Opis	Razpon vrednosti
Surface	area	površina (pod)porečja oz. hidrološke odzivne enote (ha)	0–∞
SurfaceRunoff	imp	delež neprepustnih površin	0–1
	cn	koeficient CN	30–100
	k	konstanta, ki nastopa v izračunu dinamične vrednosti CN	1–4
Evapotranspiration	coverCoeff	koeficient pokrovnosti	0,3–1,2
Percolation	soilWaterCapacity	količina rastlinam dostopne vode v tleh (mm/dan)	0–∞
GroundwaterDischarge	rc	recesijska konstanta	0–1
SeepageFlow	sc	konstanta ponikanja	0–1
Outflow	factor	faktor, ki zajema prispevek površinskega odtoka k pretoku odvodnika	0–1
SedimentYield	kUsle	dejavnik erodibilnosti tal ((t·ha·h)/(ha·MJ·mm))	0–0,6
	cUsle	dejavnik pokrovnosti in obdelave tal	0,001–0,65
	pUsle	dejavnik zaščitnih ukrepov	0–1
	lsUsle	topografski dejavnik	0–13
	tConc	čas koncentracije (h)	0–∞
	erosCoeff	erozijski koeficient	0–0,5
	dr	koeficient odplavljanja	0,03–0,35
SurfaceRunoffDissolvedNitrogenLoad	srDNconc	koncentracija topnega dušika v površinskem odtoku (mg/l)	0–∞
GroundwaterDissolvedNitrogenLoad	gwdNconc	koncentracija topnega dušika v baznem odtoku (mg/l)	0–∞
SepticDissolvedNitrogenLoad	numberOfInhabitants	število prebivalcev, priključenih na greznice (preb)	0–∞
	sDNproduction	dnevna obremenitev s topnim dušikom (g/(preb·dan))	0–∞
	plantUptake	poraba dušika s strani rastlin (g/(preb·dan))	0–∞
	gwTot	količina baznega odtoka, ki se generira v enem letu (mm)	0–∞
	srDPconc	koncentracija topnega fosforja v površinskem odtoku (mg/l)	0–∞
GroundwaterDissolvedPhosphorusLoad	gwdPconc	koncentracija topnega fosforja v baznem odtoku (mg/l)	0–∞
SepticDissolvedPhosphorusLoad	numberOfInhabitants	število prebivalcev, priključenih na greznice (preb)	0–∞
	sDPproduction	dnevna obremenitev s topnim fosforjem (g/(preb·dan))	0–∞
	plantUptake	poraba fosforja s strani rastlin (g/(preb·dan))	0–∞

se nadaljuje...

...nadaljevanje preglednice

Entiteta / proces	Konstanta	Opis	Razpon vrednosti
RuralSolidNitrogenLoad	gwTot	količina baznega odtoka, ki se generira v enem letu (mm)	0–∞
	rSNconc	koncentracija dušika (v trdni obliki) v tleh (g/t)	0–∞
	nEnrichmentRatio	obogatitveno razmerje za dušik	1–5
NitrogenAccumulationChange	nAccRate	hitrost akumulacije dušika (kg/(ha·dan))	0–1
UrbanSolidNitrogenLoad	nDeplRate	hitrost spiranja dušika (/dan)	0–1
	betaN0	regresijski koeficient	1–5
	betaN1	regresijski koeficient	0,7–1
	betaN2	regresijski koeficient	0,4–1,1
	betaN3	regresijski koeficient	0,4–0,7
RuralSolidPhosphorusLoad	betaN3	regresijski koeficient	0,4–0,7
	betaN4	regresijski koeficient	1,2–1,9
	rSPconc	koncentracija dušika (v trdni obliki) v tleh (g/t)	0–∞
	pEnrichmentRatio	obogatitveno razmerje za fosfor	1–5
PhosphorusAccumulationChange	pAccRate	hitrost akumulacije fosforja (kg/ha·dan)	0–0,01
	pDeplRate	hitrost spiranja fosforja (/dan)	0–1
UrbanSolidPhosphorusLoad	betaP0	regresijski koeficient	0,6–1,8
	betaP1	regresijski koeficient	0,8–1,1
	betaP2	regresijski koeficient	0,6–0,9
	betaP3	regresijski koeficient	0,2–0,5
	betaP4	regresijski koeficient	1,7–2,3
DissolvedNitrogenLoadSummation	factor	faktor, ki zajema prispevek topnega dušika k obremenitvi vodotoka	0–1
	fTot	količina vode v vodotoku, ki se generira v enem letu (mm)	0–∞
SolidNitrogenLoadSummation	factor	faktor, ki zajema prispevek vezanega dušika k obremenitvi vodotoka	0–1
DissolvedPhosphorusLoadSummation	factor	faktor, ki zajema prispevek topnega fosforja k obremenitvi vodotoka	0–1
	fTot	količina vode v vodotoku, ki se generira v enem letu (mm)	0–∞
SolidPhosphorusLoadSummation	factor	faktor, ki zajema prispevek vezanega fosforja k obremenitvi vodotoka	0–1
SedimentLoad	factor	faktor, ki zajema prispevek sedimenta k obremenitvi vodotoka	0–1

**PRILOGA D: KONCEPTUALNI MODEL, NAMENJEN MODELIRANJU HIDROLOŠKIH
POJAVOV V POREČJU REKE QUARTEIRE**

***APPENDIX D: CONCEPTUAL MODEL FOR MODELLING HYDROLOGICAL PROCESSES
IN THE QUARTEIRA RIVER CATCHMENT***

```
incomplete model Quarteira_incomplete : WatershedModelling;

compartment watershed : SpatialUnit {

entity totalF : TotalFlow {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0},
        rate {role: endogenous; initial: 0};
}

compartment sub1 : SpatialUnit {

entity subF : SubFlow {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0},
        rate {role: endogenous; initial: 0};
}

compartment urban : SpatialUnit {

entity prec : Precipitation {
    vars:
        amountOfWater {role: exogenous},
        ant {role: exogenous};
}

entity runoff : SurfaceRunoffWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity et : EvapotranspirationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity et0 : ReferenceEvapotranspirationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity etl : EvapotranspirationLimit {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity usz : UnsaturatedZoneWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity uszDelta : UnsaturatedZoneWaterDelta {
```

```
        vars:
            amountOfWater {role: endogenous; initial: 180};
    }

entity perc : PercolationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ssz : ShallowSaturatedZoneWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sszDelta : ShallowSaturatedZoneWaterDelta {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity seepage : SeepageFlowWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gw : Groundwater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity surf : Surface {
    consts:
        area = 10,
        imp = 0.8;
}

entity flow : Outflow {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0},
        rate {role: endogenous; initial: 0};
}

entity weather : Weather {
    vars:
        temperature {role: exogenous},
        maxTemperature {role: exogenous},
        minTemperature {role: exogenous},
        radiation {role: exogenous},
        daylightHours {role: exogenous},
        satVapPressure {role: exogenous};
}

process surfRunoff (prec,runoff) : SurfaceRunoff {
    consts:
        cn {value : null; fit_range : <87,96>},
        k {value : null; fit_range : <1,3>};
}

process refEvapo (et0,weather) : ReferenceEvapotranspiration {}

process evapotransp (et,etl,et0) : Evapotranspiration {
    consts:
```

```
        coverCoeff {value : null; fit_range : <0,0.6>};
    }

    process evapoLim (prec,runoff,usz,etl) : EvapotranspirationLimitation {}

    process uszChange (prec,runoff,et,perc,uszDelta) :
        UnsaturatedZoneWaterBalanceChange {}

    process uszBalance (uszDelta,usz) : UnsaturatedZoneWaterBalance {}

    process percolation (perc,prec,runoff,et,usz) : Percolation {
        consts:
            soilWaterCapacity {value : null; fit_range : <140,190>};
    }

    process sszChange (sszDelta,perc,gw,seepage) :
        ShallowSaturatedZoneWaterBalanceChange {}

    process sszBalance (sszDelta,ssz) : ShallowSaturatedZoneWaterBalance {}

    process gwDischarge (gw,ssz) : GroundwaterDischarge {
        consts:
            rc {value : null; fit_range : <0.1,0.3>};
    }

    process deepSeepage (seepage,ssz) : SeepageFlow {
        consts:
            sc {value : null; fit_range : <0,0.08>};
    }

    process outflow (flow,runoff,gw,surf) : Outflow {
        consts:
            factor = 1;
    }
}

compartment rural : SpatialUnit {

    entity prec : Precipitation {
        vars:
            amountOfWater {role: exogenous},
            ant {role: exogenous};
    }

    entity runoff : SurfaceRunoffWater {
        vars:
            amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
    }

    entity et : EvapotranspirationWater {
        vars:
            amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
    }

    entity et0 : ReferenceEvapotranspirationWater {
        vars:
            amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
    }

    entity etl : EvapotranspirationLimit {
        vars:
```



```
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
    }

entity usz : UnsaturatedZoneWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity uszDelta : UnsaturatedZoneWaterDelta {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity perc : PercolationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ssz : ShallowSaturatedZoneWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sszDelta : ShallowSaturatedZoneWaterDelta {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity seepage : SeepageFlowWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gw : Groundwater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity surf : Surface {
    consts:
        area = 16218,
        imp = 0;
}

entity flow : Outflow {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0},
        rate {role: endogenous; initial: 0};
}

entity weather : Weather {
    vars:
        temperature {role: exogenous},
        maxTemperature {role: exogenous},
        minTemperature {role: exogenous},
        radiation {role: exogenous},
        daylightHours {role: exogenous},
        satVapPressure {role: exogenous};
}

process surfRunoff (prec,runoff) : SurfaceRunoff {
```

```
        consts:
            cn {value : null; fit_range : <71,87>},
            k {value : null; fit_range : <1,3>};
    }

    process refEvapo (et0,weather) : ReferenceEvapotranspiration {
    }

    process evapotransp (et,etl,et0) : Evapotranspiration {
        consts:
            coverCoeff {value : null; fit_range : <0.7,1.1>};
    }

    process evapoLim (prec,runoff,usz,etl) : EvapotranspirationLimitation {}

    process uszChange (prec,runoff,et,perc,uszDelta) :
        UnsaturatedZoneWaterBalanceChange {}

    process uszBalance (uszDelta,usz) : UnsaturatedZoneWaterBalance {}

    process percolation (perc,prec,runoff,et,usz) : Percolation {
        consts:
            soilWaterCapacity {value : null; fit_range : <140,190>};
    }

    process sszChange (sszDelta,perc,gw,seepage) :
        ShallowSaturatedZoneWaterBalanceChange {}

    process sszBalance (sszDelta,ssz) : ShallowSaturatedZoneWaterBalance {}

    process gwDischarge (gw,ssz) : GroundwaterDischarge {
        consts:
            rc {value : null; fit_range : <0.1,0.3>};
    }

    process deepSeepage (seepage,ssz) : SeepageFlow {
        consts:
            sc {value : null; fit_range : <0,0.08>};
    }

    process outflow (flow,runoff,gw,surf) : Outflow {
        consts:
            factor = 1;
    }
}

compartment natural : SpatialUnit {

    entity prec : Precipitation {
        vars:
            amountOfWater {role: exogenous},
            ant {role: exogenous};
    }

    entity runoff : SurfaceRunoffWater {
        vars:
            amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
    }

    entity et : EvapotranspirationWater {
        vars:
```

```
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
    }

entity et0 : ReferenceEvapotranspirationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity etl : EvapotranspirationLimit {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity usz : UnsaturatedZoneWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity uszDelta : UnsaturatedZoneWaterDelta {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity perc : PercolationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ssz : ShallowSaturatedZoneWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sszDelta : ShallowSaturatedZoneWaterDelta {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity seepage : SeepageFlowWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gw : Groundwater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity surf : Surface {
    consts:
        area = 13887,
        imp = 0;
}

entity flow : Outflow {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0},
        rate {role: endogenous; initial: 0};
}

entity weather : Weather {
```

```
vars:
  temperature {role: exogenous},
  maxTemperature {role: exogenous},
  minTemperature {role: exogenous},
  radiation {role: exogenous},
  daylightHours {role: exogenous},
  satVapPressure {role: exogenous};
}

process surfRunoff (prec, runoff) : SurfaceRunoff {
  consts:
    cn {value : null; fit_range : <64,78>},
    k {value : null; fit_range : <1,3>};
}

process refEvapo (et0,weather) : ReferenceEvapotranspiration {}

process evapotransp (et,etl,et0) : Evapotranspiration {
  consts:
    coverCoeff {value : null; fit_range : <0.7,1.1>};
}

process evapoLim (prec,runoff,usz,etl) : EvapotranspirationLimitation {}

process uszChange (prec,runoff,et,perc,uszDelta) :
  UnsaturatedZoneWaterBalanceChange {}

process uszBalance (uszDelta,usz) : UnsaturatedZoneWaterBalance {}

process percolation (perc,prec,runoff,et,usz) : Percolation {
  consts:
    soilWaterCapacity {value : null; fit_range : <140,190>};
}

process sszChange (sszDelta,perc,gw,seepage) :
  ShallowSaturatedZoneWaterBalanceChange {}

process sszBalance (sszDelta,ssz) : ShallowSaturatedZoneWaterBalance {}

process gwDischarge (gw,ssz) : GroundwaterDischarge {
  consts:
    rc {value : null; fit_range : <0.1,0.3>};
}

process deepSeepage (seepage,ssz) : SeepageFlow {
  consts:
    sc {value : null; fit_range : <0,0.08>};
}

process outflow (flow,runoff,gw,surf) : Outflow {
  consts:
    factor = 1;
}
}

process subOutflow (subF, [urban.flow,rural.flow,natural.flow]) :
  SubOutflow {}
}

compartment sub2 : SpatialUnit {
```

```
entity subF : SubFlow {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0},
        rate {role: endogenous; initial: 0};
}

compartment rural : SpatialUnit {

entity prec : Precipitation {
    vars:
        amountOfWater {role: exogenous},
        ant {role: exogenous};
}

entity runoff : SurfaceRunoffWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity et : EvapotranspirationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity et0 : ReferenceEvapotranspirationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity etl : EvapotranspirationLimit {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity usz : UnsaturatedZoneWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity uszDelta : UnsaturatedZoneWaterDelta {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity perc : PercolationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ssz : ShallowSaturatedZoneWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sszDelta : ShallowSaturatedZoneWaterDelta {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity seepage : SeepageFlowWater {
    vars:
```

```
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
    }

entity gw : Groundwater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity surf : Surface {
    consts:
        area = 577,
        imp = 0;
}

entity flow : Outflow {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0},
        rate {role: endogenous; initial: 0};
}

entity weather : Weather {
    vars:
        temperature {role: exogenous},
        maxTemperature {role: exogenous},
        minTemperature {role: exogenous},
        radiation {role: exogenous},
        daylightHours {role: exogenous},
        satVapPressure {role: exogenous};
}

process surfRunoff (prec, runoff) : SurfaceRunoff {
    consts:
        cn {value : null; fit_range : <72,88>},
        k {value : null; fit_range : <1,3>};
}

process refEvapo (et0,weather) : ReferenceEvapotranspiration {}

process evapotransp (et,etl,et0) : Evapotranspiration {
    consts:
        coverCoeff {value : null; fit_range : <0.7,1.1>};
}

process evapoLim (prec,runoff,usz,etl) : EvapotranspirationLimitation {}

process uszChange (prec,runoff,et,perc,uszDelta) :
    UnsaturatedZoneWaterBalanceChange {}

process uszBalance (uszDelta,usz) : UnsaturatedZoneWaterBalance {}

process percolation (perc,prec,runoff,et,usz) : Percolation {
    consts:
        soilWaterCapacity {value : null; fit_range : <140,190>};
}

process sszChange (sszDelta,perc,gw,seepage) :
    ShallowSaturatedZoneWaterBalanceChange {}

process sszBalance (sszDelta,ssz) : ShallowSaturatedZoneWaterBalance {}
```

```
process gwDischarge (gw,ssz) : GroundwaterDischarge {
    consts:
        rc {value : null; fit_range : <0.1,0.3>};
}

process deepSeepage (seepage,ssz) : SeepageFlow {
    consts:
        sc {value : null; fit_range : <0,0.08>};
}

process outflow (flow,runoff,gw,surf) : Outflow {
    consts:
        factor = 0;
}

compartment natural : SpatialUnit {

entity prec : Precipitation {
    vars:
        amountOfWater {role: exogenous},
        ant {role: exogenous};
}

entity runoff : SurfaceRunoffWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity et : EvapotranspirationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity et0 : ReferenceEvapotranspirationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity etl : EvapotranspirationLimit {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity usz : UnsaturatedZoneWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity uszDelta : UnsaturatedZoneWaterDelta {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity perc : PercolationWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ssz : ShallowSaturatedZoneWater {
    vars:
```

```
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
    }

entity sszDelta : ShallowSaturatedZoneWaterDelta {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity seepage : SeepageFlowWater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gw : Groundwater {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0};
}

entity surf : Surface {
    consts:
        area = 675,
        imp = 0;
}

entity flow : Outflow {
    vars:
        amountOfWater {role: endogenous; initial: 0},
        rate {role: endogenous; initial: 0};
}

entity weather : Weather {
    vars:
        temperature {role: exogenous},
        maxTemperature {role: exogenous},
        minTemperature {role: exogenous},
        radiation {role: exogenous},
        daylightHours {role: exogenous},
        satVapPressure {role: exogenous};
}

process surfRunoff (prec, runoff) : SurfaceRunoff {
    consts:
        cn {value : null; fit_range : <69,77>},
        k {value : null; fit_range : <1,3>};
}

process refEvapo (et0,weather) : ReferenceEvapotranspiration {}

process evapotransp (et,etl,et0) : Evapotranspiration {
    consts:
        coverCoeff {value : null; fit_range : <0.7,1.1>};
}

process evapoLim (prec,runoff,usz,etl) : EvapotranspirationLimitation {}

process uszChange (prec,runoff,et,perc,uszDelta) :
    UnsaturatedZoneWaterBalanceChange {}

process uszBalance (uszDelta,usz) : UnsaturatedZoneWaterBalance {}

process percolation (perc,prec,runoff,et,usz) : Percolation {
```



```
        consts:
            soilWaterCapacity {value : null; fit_range : <140,190>};
    }

process sszChange (sszDelta,perc,gw,seepage) :
    ShallowSaturatedZoneWaterBalanceChange {}

process sszBalance (sszDelta,ssz) : ShallowSaturatedZoneWaterBalance {}

process gwDischarge (gw,ssz) : GroundwaterDischarge {
    consts:
        rc {value : null; fit_range : <0.1,0.3>};
}

process deepSeepage (seepage,ssz) : SeepageFlow {
    consts:
        sc {value : null; fit_range : <0,0.08>};
}

process outflow (flow,runoff,gw,surf) : Outflow {
    consts:
        factor = 0;
}
}

process subOutflow (subF, [rural.flow,natural.flow]) : SubOutflow {}
}

process totalFlow (totalF, [sub1.subF,sub2.subF]) : OutflowSummation {}
}
```

PRILOGA E: PRIMERJAVA HIDROLOŠKIH MODELOV POREČJA REKE QUARTEIRE, GENERIRANIH Z ORODJEM ProBMoT

APPENDIX E: COMPARISON OF THE QUARTEIRA RIVER CATCHMENT HYDROLOGICAL MODELS, GENERATED WITH ProBMoT

Model	sub1.urban							sub1.rural							sub1.natural						
	CN	k	CV	U*	r	s	ET	CN	k	CV	U*	r	s	ET	CN	k	CV	U*	r	s	ET
1	91.41	2.77	0.00	183	0.21	0.045	Hamon	71.84	3.00	1.10	155	0.10	0.076	Hamon	64.05	3.00	1.10	179	0.10	0.076	Hamon
2	93.01	1.00	0.26	184	0.14	0.001	Hargreaves	71.06	2.81	1.08	190	0.10	0.076	Hamon	64.08	2.99	1.03	171	0.10	0.073	Hamon
3	91.82	1.00	0.00	187	0.24	0.048	Hamon	71.20	3.00	1.10	186	0.10	0.080	Hargreaves	64.01	3.00	1.04	155	0.10	0.064	Hamon
4	92.80	2.08	0.01	163	0.14	0.073	Hargreaves	72.73	3.00	1.10	184	0.10	0.045	Hargreaves	64.02	2.99	1.06	166	0.10	0.073	Hamon
5	93.93	1.86	0.03	164	0.16	0.006	Hamon	71.01	2.88	1.07	166	0.10	0.078	Hamon	64.25	2.97	1.10	184	0.10	0.079	Hargreaves
6	93.45	1.16	0.34	143	0.10	0.024	Hargreaves	71.59	2.93	1.00	184	0.11	0.079	Hamon	68.19	3.00	1.08	167	0.11	0.071	Hargreaves
7	91.38	2.71	0.04	154	0.21	0.054	Hamon	71.00	3.00	1.10	179	0.11	0.074	Hargreaves	64.00	2.95	1.06	156	0.11	0.080	Hargreaves
8	96.00	2.71	0.01	182	0.27	0.023	Hargreaves	71.01	3.00	1.10	145	0.10	0.064	Hargreaves	64.00	3.00	1.10	187	0.10	0.056	Hargreaves
9	90.38	1.99	0.51	148	0.10	0.000	Hamon	71.00	2.97	0.97	190	0.10	0.080	Hamon	64.01	3.00	1.02	184	0.11	0.080	Hamon
10	93.61	2.44	0.42	149	0.10	0.005	Hargreaves	71.00	3.00	0.98	190	0.10	0.077	Hamon	64.05	2.99	1.10	164	0.10	0.080	Hamon
11	91.00	2.29	0.00	186	0.16	0.074	Hamon	71.00	2.93	1.08	159	0.10	0.064	Hargreaves	64.06	2.69	1.10	153	0.10	0.076	Hamon
12	94.86	1.25	0.00	184	0.17	0.052	Hargreaves	71.00	2.79	1.10	190	0.10	0.080	Hargreaves	64.02	3.00	1.09	149	0.13	0.080	Hamon
13	92.70	2.63	0.00	188	0.22	0.040	Hamon	72.11	3.00	1.09	158	0.10	0.080	Hamon	64.06	3.00	1.08	158	0.14	0.079	Hargreaves
14	95.98	1.18	0.00	162	0.24	0.015	Hargreaves	71.00	2.65	1.10	168	0.10	0.080	Hamon	64.60	2.94	1.09	171	0.10	0.076	Hargreaves
15	90.54	2.82	0.08	141	0.15	0.041	Hamon	71.00	2.86	1.10	175	0.30	0.074	Hargreaves	64.00	3.00	1.10	190	0.10	0.076	Hargreaves
16	94.35	3.00	0.03	160	0.17	0.007	Hargreaves	71.18	3.00	1.06	180	0.11	0.080	Hargreaves	64.01	2.83	1.10	151	0.11	0.080	Hargreaves
17	92.39	2.76	0.50	154	0.25	0.029	Hamon	71.11	2.95	1.06	179	0.10	0.074	Hamon	64.08	3.00	1.05	190	0.10	0.080	Hamon
18	91.42	1.01	0.27	183	0.18	0.043	Hargreaves	71.01	2.93	1.03	176	0.10	0.068	Hamon	64.00	3.00	1.10	190	0.11	0.080	Hamon
19	88.87	2.07	0.04	188	0.27	0.033	Hamon	71.02	3.00	1.07	181	0.10	0.069	Hargreaves	64.00	3.00	1.09	175	0.15	0.079	Hamon
20	90.60	2.01	0.11	171	0.26	0.000	Hargreaves	71.01	3.00	1.10	189	0.16	0.080	Hargreaves	64.00	3.00	1.05	187	0.10	0.080	Hamon
21	95.52	1.36	0.06	180	0.24	0.050	Hamon	71.05	3.00	0.73	176	0.10	0.079	Hamon	64.01	3.00	1.09	190	0.11	0.078	Hargreaves
22	89.75	1.03	0.09	175	0.15	0.044	Hargreaves	72.76	2.97	1.04	189	0.10	0.080	Hamon	66.12	3.00	1.10	165	0.16	0.080	Hargreaves
23	94.36	2.54	0.05	183	0.24	0.073	Hamon	71.02	2.95	1.10	190	0.20	0.077	Hargreaves	64.00	3.00	1.10	156	0.10	0.066	Hargreaves
24	93.41	2.34	0.02	166	0.13	0.018	Hargreaves	71.02	3.00	1.10	190	0.10	0.059	Hargreaves	64.25	3.00	1.10	188	0.21	0.080	Hargreaves
25	94.53	1.82	0.47	145	0.15	0.025	Hamon	71.01	2.54	1.06	172	0.10	0.078	Hamon	64.26	2.99	1.06	189	0.10	0.076	Hamon
26	87.57	2.46	0.28	189	0.12	0.060	Hargreaves	71.11	2.98	1.07	190	0.10	0.080	Hamon	64.47	2.98	0.99	180	0.12	0.080	Hamon
27	90.74	1.59	0.00	186	0.24	0.050	Hamon	73.20	3.00	1.10	145	0.10	0.079	Hargreaves	64.03	2.81	1.08	140	0.11	0.079	Hamon
28	88.95	2.18	0.07	168	0.28	0.055	Hargreaves	71.60	2.93	1.00	190	0.10	0.079	Hargreaves	64.00	3.00	0.93	175	0.10	0.077	Hamon
29	94.59	1.70	0.06	141	0.16	0.069	Hamon	71.06	2.99	0.86	186	0.10	0.078	Hamon	64.00	3.00	1.05	190	0.10	0.080	Hargreaves
30	91.47	2.33	0.00	173	0.20	0.001	Hargreaves	71.04	3.00	0.82	181	0.10	0.080	Hamon	64.00	3.00	1.09	189	0.11	0.056	Hargreaves
31	93.13	1.37	0.37	174	0.19	0.023	Hamon	71.00	2.99	1.04	190	0.10	0.080	Hargreaves	64.00	3.00	1.09	189	0.13	0.064	Hargreaves
32	94.77	1.96	0.00	151	0.22	0.044	Hargreaves	71.00	2.98	0.97	187	0.10	0.080	Hargreaves	64.00	2.98	1.06	190	0.17	0.061	Hargreaves

... nadaljevanje preglednice

Model	sub2.rural							sub2.natural							Statistični kriteriji				
	CN	k	CV	U*	r	s	ET	CN	k	CV	U*	r	s	ET	RMSE	r	NS	PBIAS	RSR
1	83.52	2.02	0.95	178	0.10	0.059	Hamon	71.88	2.55	1.07	170	0.27	0.052	Hamon	3.503	0.774	0.369	-20.38	0.795
2	75.73	2.29	0.95	175	0.10	0.079	Hamon	70.30	2.46	1.02	189	0.18	0.027	Hamon	3.964	0.590	0.191	71.42	0.899
3	78.49	2.20	0.85	167	0.27	0.028	Hamon	74.22	2.10	0.84	187	0.30	0.057	Hamon	3.340	0.758	0.426	1.20	0.758
4	81.53	1.47	1.04	147	0.30	0.064	Hamon	75.13	1.37	0.95	164	0.26	0.047	Hamon	3.446	0.757	0.389	-2.43	0.782
5	74.45	1.59	0.89	185	0.16	0.044	Hamon	71.00	1.72	0.85	158	0.17	0.071	Hamon	3.292	0.756	0.442	5.84	0.747
6	80.18	1.27	0.85	164	0.11	0.041	Hamon	71.65	2.17	0.98	143	0.17	0.057	Hamon	3.812	0.692	0.252	43.25	0.865
7	72.10	2.41	0.70	156	0.25	0.016	Hamon	71.80	2.53	0.73	161	0.27	0.000	Hamon	3.522	0.689	0.362	51.42	0.799
8	75.38	2.32	0.73	159	0.30	0.000	Hamon	71.10	2.56	0.84	142	0.25	0.022	Hamon	3.523	0.688	0.361	50.37	0.799
9	72.69	2.64	1.10	167	0.30	0.077	Hargreaves	74.18	1.30	0.91	162	0.21	0.080	Hamon	3.561	0.701	0.347	14.22	0.808
10	80.26	2.33	0.78	185	0.29	0.063	Hargreaves	71.67	1.20	0.71	148	0.24	0.072	Hamon	3.554	0.768	0.350	-13.96	0.806
11	74.69	2.31	1.10	141	0.24	0.057	Hargreaves	75.55	2.54	1.03	150	0.30	0.076	Hamon	3.308	0.752	0.437	8.64	0.750
12	78.13	2.00	0.80	144	0.23	0.037	Hargreaves	72.48	2.41	1.00	152	0.12	0.046	Hamon	3.393	0.758	0.408	3.90	0.770
13	76.75	1.19	1.02	140	0.28	0.052	Hargreaves	70.55	1.41	0.89	141	0.23	0.041	Hamon	3.353	0.752	0.422	8.81	0.761
14	81.50	2.84	1.09	154	0.22	0.031	Hargreaves	72.06	1.58	0.78	140	0.29	0.075	Hamon	3.339	0.754	0.426	7.22	0.758
15	87.92	1.02	0.89	179	0.21	0.037	Hargreaves	69.00	1.37	0.72	140	0.30	0.000	Hamon	3.566	0.698	0.346	51.34	0.809
16	83.72	1.79	0.91	182	0.30	0.014	Hargreaves	74.20	2.95	0.82	142	0.23	0.012	Hamon	3.581	0.682	0.340	53.00	0.812
17	84.20	2.73	0.89	170	0.27	0.044	Hamon	71.28	1.96	0.72	176	0.20	0.006	Hargreaves	3.552	0.701	0.351	16.32	0.806
18	83.03	2.10	1.03	180	0.15	0.004	Hamon	69.83	2.71	1.04	146	0.26	0.033	Hargreaves	3.646	0.772	0.316	-23.55	0.827
19	73.73	2.01	0.71	140	0.22	0.047	Hamon	69.63	2.62	0.97	172	0.13	0.000	Hargreaves	3.327	0.760	0.430	6.73	0.755
20	86.09	1.59	1.03	181	0.27	0.074	Hamon	75.77	1.31	0.94	181	0.21	0.059	Hargreaves	3.321	0.753	0.433	10.97	0.753
21	84.73	1.13	0.85	161	0.12	0.069	Hamon	76.51	2.18	1.00	169	0.21	0.022	Hargreaves	3.287	0.758	0.444	1.79	0.746
22	80.43	1.24	0.76	169	0.29	0.060	Hamon	76.34	2.70	1.06	186	0.28	0.046	Hargreaves	3.557	0.758	0.349	-1.25	0.807
23	72.03	2.76	0.70	141	0.30	0.021	Hamon	71.57	1.45	0.70	153	0.28	0.077	Hargreaves	3.564	0.691	0.346	51.81	0.808
24	74.69	2.94	0.70	150	0.30	0.000	Hamon	69.37	1.90	1.07	161	0.25	0.024	Hargreaves	3.572	0.690	0.344	53.11	0.810
25	75.21	2.81	0.85	143	0.23	0.077	Hargreaves	76.38	1.90	1.01	168	0.29	0.049	Hargreaves	3.635	0.769	0.320	-25.59	0.825
26	80.28	1.30	0.75	140	0.24	0.020	Hargreaves	72.29	2.34	0.79	164	0.16	0.071	Hargreaves	3.602	0.774	0.332	-15.73	0.817
27	81.35	1.99	1.06	174	0.30	0.080	Hargreaves	72.28	2.25	0.80	169	0.18	0.059	Hargreaves	3.367	0.746	0.417	16.62	0.764
28	86.71	1.34	0.81	176	0.19	0.005	Hargreaves	69.60	1.55	1.10	190	0.14	0.062	Hargreaves	3.335	0.749	0.428	10.92	0.756
29	87.94	1.28	1.04	140	0.20	0.080	Hargreaves	73.29	1.78	1.07	165	0.11	0.046	Hargreaves	3.275	0.756	0.487	6.63	0.716
30	83.83	2.97	0.97	190	0.15	0.010	Hargreaves	75.49	2.63	0.82	190	0.12	0.062	Hargreaves	3.282	0.758	0.446	3.36	0.744
31	72.49	2.30	0.70	140	0.24	0.003	Hargreaves	75.37	2.48	0.70	143	0.30	0.051	Hargreaves	3.610	0.675	0.329	57.65	0.819
32	74.48	1.62	1.05	146	0.29	0.032	Hargreaves	69.55	3.00	0.71	163	0.26	0.048	Hargreaves	3.620	0.681	0.326	55.79	0.821

**PRILOGA F: KONCEPTUALNI MODEL, NAMENJEN MODELIRANJU KAKOVOSTI
VODA V POREČJU REKE QUARTEIRE**

***APPENDIX F: CONCEPTUAL MODEL FOR MODELLING WATER QUALITY IN THE
QUARTEIRA RIVER CATCHMENT***

```
incomplete model Incomplete_model : WatershedModelling;
```

```
compartment watershed : SpatialUnit {
```

```
entity finTN : FinalTotalNitrogen {  
  vars:  
    load {role: endogenous; initial: 0};  
}
```

```
entity finTP : FinalTotalPhosphorus {  
  vars:  
    load {role: endogenous; initial: 0};  
}
```

```
entity totSed : TotalSediment {  
  vars:  
    load {role: endogenous; initial: 0};  
}
```

```
compartment sub1 : SpatialUnit {
```

```
entity subTN : SubTotalNitrogen {  
  vars:  
    load {role: endogenous; initial: 0};  
}
```

```
entity subTP : SubTotalPhosphorus {  
  vars:  
    load {role: endogenous; initial: 0};  
}
```

```
entity subSed : SubSediment {  
  vars:  
    load {role: endogenous; initial: 0};  
}
```

```
compartment urban : SpatialUnit {
```

```
entity prec : Precipitation {  
  vars:  
    amountOfWater {role: exogenous},  
    ant {role: exogenous};  
}
```

```
entity runoff : SurfaceRunoffWater {  
  vars:  
    amountOfWater {role: exogenous};  
}
```

```
entity gw : Groundwater {  
  vars:
```

```
        amountOfWater {role: exogenous};
    }

entity flow : Flow {
    vars:
        amountOfWater {role: exogenous},
        rate { role: exogenous};
}

entity surf : Surface {
    consts:
        area = 10,
        imp = 0.8;
}

entity sed : Sediment {
    vars:
        mass {role: endogenous; initial: 0},
        erosivity {role: endogenous; initial: 0},
        lnAlpha {role: exogenous},
        peakRunoffRate {role: endogenous; initial: 0},
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity dn : DissolvedNitrogen {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDN : DissolvedNitrogenPointSource {
    vars:
        load {role: exogenous};
}

entity srDN : SurfaceRunoffDissolvedNitrogen {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gwDN : GroundwaterDissolvedNitrogen {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDN : SepticDissolvedNitrogen {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sn : SolidNitrogen {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSN : RuralSolidNitrogen {
    vars:
        load {role: exogenous};
}

entity urSN : UrbanSolidNitrogen {
    vars:
```

```
        load {role: endogenous; initial: 0},
        accumulation {role: endogenous; initial: 0};
    }

entity urSNdelta : UrbanSolidNitrogenDelta {
    vars:
        accumulation {role: endogenous; initial: 0};
}

entity tn : TotalNitrogen {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity dp : DissolvedPhosphorus {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDP : DissolvedPhosphorusPointSource {
    vars:
        load {role: exogenous};
}

entity srDP : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorus {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gwDP : GroundwaterDissolvedPhosphorus {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDP : SepticDissolvedPhosphorus {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sp : SolidPhosphorus {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSP : RuralSolidPhosphorus {
    vars:
        load {role: exogenous};
}

entity urSP : UrbanSolidPhosphorus {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0},
        accumulation {role: endogenous; initial: 0};
}

entity urSPdelta : UrbanSolidPhosphorusDelta {
    vars:
        accumulation {role: endogenous; initial: 0};
}

entity tp : TotalPhosphorus {
```

```
vars:
  load {role: endogenous; initial: 0};
}

process sedYield (sed,runoff,prec,surf) : SedimentYield {
  consts:
    kUsle {value : null; fit_range : <0.038,0.048>},
    cUsle = 0,
    pUsle = 1,
    lsUsle = 2.78,
    tConc = 0.33,
    erosCoeff {value : null; fit_range : <0.1,0.4>},
    dr = 0.08;
}

process srDNload (runoff,surf,srDN) : SurfaceRunoffDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    srDNconc {value : null; fit_range : <0.1,0.3>};
}

process gwDNload (gw,surf,gwDN) : GroundwaterDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    gwDNconc {value : null; fit_range : <0.1,0.4>};
}

process septDNload (gw,septDN) : SepticDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 61,
    sDNproduction = 12,
    plantUptake = 0,
    gwTot = 335;
}

process srDPload (runoff,surf,srDP) : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    srDPconc {value : null; fit_range : <0.01,0.07>};
}

process gwDPload (gw,surf,gwDP) : GroundwaterDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    gwDPconc {value : null; fit_range : <0.01,0.04>};
}

process septDPload (gw,septDP) : SepticDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 61,
    sDPproduction = 1.5,
    plantUptake = 0,
    gwTot = 335;
}

process nAccChange (urSNdelta) : NitrogenAccumulationChange {
  consts:
    nAccRate {value : null; fit_range : <0.045,0.056>},
    nDeplRate = 0.12;
}

process nAcc (urSN,urSNdelta) : NitrogenAccumulation {}

process urbanSNload (prec,runoff,urSN,surf) : UrbanSolidNitrogenLoad {
```

```
    consts:
      betaN0 = 4.04,
      betaN1 = 0.936,
      betaN2 = 0.937,
      betaN3 = 0.692,
      betaN4 = 1.373;
  }

process pAccChange (urSPdelta) : PhosphorusAccumulationChange {
  consts:
    pAccRate {value : null; fit_range : <0.0045,0.0067>},
    pDeplRate = 0.12;
}

process pAcc (urSP, urSPdelta) : PhosphorusAccumulation {}

process urbanSPload (prec,runoff,urSP,surf) : UrbanSolidPhosphorusLoad {
  consts:
    betaP0 = 0.697,
    betaP1 = 1.008,
    betaP2 = 0.628,
    betaP3 = 0.469,
    betaP4 = 1.790;
}

process dnLoadSummation (dn,srDN,gwDN,septDN,psDN,flow) :
DissolvedNitrogenLoadSummation {
  consts:
    factor = 1,
    fTot = 516;
}

process snLoadSummation (sn,ruralSN,urSN) : SolidNitrogenLoadSummation {
  consts:
    factor = 1;
}

process tnLoad (tn,dn,sn) : TotalNitrogenLoad {}

process dpLoadSummation (dp,srDP,gwDP,septDP,psDP,flow) :
DissolvedPhosphorusLoadSummation {
  consts:
    factor = 1,
    fTot = 516;
}

process spLoadSummation (sp,ruralSP,urSP) : SolidPhosphorusLoadSummation {
  consts:
    factor = 1;
}

process tpLoad (tp,dp,sp) : TotalPhosphorusLoad {}

process sedLoad (sed) : SedimentLoad {
  consts:
    factor = 1;
}
}

compartment rural : SpatialUnit {
```



```
entity prec : Precipitation {
  vars:
    amountOfWater {role: exogenous},
    ant {role: exogenous};
}

entity runoff : SurfaceRunoffWater {
  vars:
    amountOfWater {role: exogenous};
}

entity gw : Groundwater {
  vars:
    amountOfWater {role: exogenous};
}

entity flow : Flow {
  vars:
    amountOfWater {role: exogenous},
    rate { role: exogenous};
}

entity surf : Surface {
  consts:
    area = 16218,
    imp = 0;
}

entity sed : Sediment {
  vars:
    mass {role: endogenous; initial: 0},
    erosivity {role: endogenous; initial: 0},
    lnAlpha {role: exogenous},
    peakRunoffRate {role: endogenous; initial: 0},
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity dn : DissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDN : DissolvedNitrogenPointSource {
  vars:
    load {role: exogenous};
}

entity srDN : SurfaceRunoffDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gwDN : GroundwaterDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDN : SepticDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}
```

```
entity sn : SolidNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSN : RuralSolidNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity urSN : UrbanSolidNitrogen {
  vars:
    load {role: exogenous},
    accumulation {role: exogenous};
}

entity tn : TotalNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity dp : DissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDP : DissolvedPhosphorusPointSource {
  vars:
    load {role: exogenous};
}

entity srDP : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gwDP : GroundwaterDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDP : SepticDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sp : SolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSP : RuralSolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity urSP : UrbanSolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: exogenous},
    accumulation {role: exogenous};
}
```

```
entity tp : TotalPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

process sedYield (sed,runoff,prec,surf) : SedimentYield {
  consts:
    kUsle {value : null; fit_range : <0.038,0.048>},
    cUsle {value : null; fit_range : <0.04,0.3>},
    pUsle {value : null; fit_range : <0.25,0.5>},
    lsUsle = 2.93,
    tConc = 8.05,
    erosCoeff {value : null; fit_range : <0.1,0.4>},
    dr = 0.08;
}

process srDNload (runoff,surf,srDN) : SurfaceRunoffDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    srDNconc {value : null; fit_range : <0.1,0.4>};
}

process gwDNload (gw,surf,gwDN) : GroundwaterDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    gwDNconc {value : null; fit_range : <0.5,0.7>};
}

process septDNload (gw,septDN) : SepticDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 6289,
    sDNproduction = 12,
    plantUptake = 1.6,
    gwTot = 153;
}

process srDPload (runoff,surf,srDP) : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorusLoad
{
  consts:
    srDPconc {value : null; fit_range : <0.05,0.08>};
}

process gwDPload (gw,surf,gwDP) : GroundwaterDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    gwDPconc {value : null; fit_range : <0.02,0.06>};
}

process septDPload (gw,septDP) : SepticDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 6289,
    sDPproduction = 1.5,
    plantUptake = 0.4,
    gwTot = 153;
}

process ruralSNload (sed,ruralSN) : RuralSolidNitrogenLoad {
  consts:
    rSNconc {value : null; fit_range : <500,700>},
    nEnrichmentRatio {value: null; fit_range : <1,3>};
}

process ruralSPload (sed,ruralSP) : RuralSolidPhosphorusLoad {
  consts:
```

```
        rSPconc {value : null; fit_range : <150,450>},
        pEnrichmentRatio {value : null; fit_range : <1,3>};
    }

    process dnLoadSummation (dn,srDN,gwDN,septDN,psDN,flow) :
    DissolvedNitrogenLoadSummation {
        consts:
            factor = 1,
            fTot = 185;
    }

    process snLoadSummation (sn,ruralSN,urSN) : SolidNitrogenLoadSummation {
        consts:
            factor = 1;
    }

    process tnLoad (tn,dn,sn) : TotalNitrogenLoad {}

    process dpLoadSummation (dp,srDP,gwDP,septDP,psDP,flow) :
    DissolvedPhosphorusLoadSummation {
        consts:
            factor = 1,
            fTot = 185;
    }

    process spLoadSummation (sp,ruralSP,urSP) : SolidPhosphorusLoadSummation {
        consts:
            factor = 1;
    }

    process tpLoad (tp,dp,sp) : TotalPhosphorusLoad {}

    process sedLoad (sed) : SedimentLoad {
        consts:
            factor = 1;
    }
}

compartment natural : SpatialUnit {

    entity prec : Precipitation {
        vars:
            amountOfWater {role: exogenous},
            ant {role: exogenous};
    }

    entity runoff : SurfaceRunoffWater {
        vars:
            amountOfWater {role: exogenous};
    }

    entity gw : Groundwater {
        vars:
            amountOfWater {role: exogenous};
    }

    entity flow : Flow {
        vars:
            amountOfWater {role: exogenous},
            rate { role: exogenous};
    }
}
```

```
entity surf : Surface {
  consts:
    area = 13887,
    imp = 0;
}

entity sed : Sediment {
  vars:
    mass {role: endogenous; initial: 0},
    erosivity {role: endogenous; initial: 0},
    lnAlpha {role: exogenous},
    peakRunoffRate {role: endogenous; initial: 0},
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity dn : DissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDN : DissolvedNitrogenPointSource {
  vars:
    load {role: exogenous};
}

entity srDN : SurfaceRunoffDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gwDN : GroundwaterDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDN : SepticDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sn : SolidNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSN : RuralSolidNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity urSN : UrbanSolidNitrogen {
  vars:
    load {role: exogenous},
    accumulation {role: exogenous};
}

entity tn : TotalNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}
```

```
entity dp : DissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDP : DissolvedPhosphorusPointSource {
  vars:
    load {role: exogenous};
}

entity srDP : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gwDP : GroundwaterDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDP : SepticDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sp : SolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSP : RuralSolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity urSP : UrbanSolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: exogenous},
    accumulation {role: exogenous};
}

entity tp : TotalPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

process sedYield (sed,runoff,prec,surf) : SedimentYield {
  consts:
    kUsle {value : null; fit_range : <0.038,0.048>},
    cUsle {value : null; fit_range : <0.002,0.06>},
    pUsle {value : null; fit_range : <0.9,1>},
    lsUsle = 8.46,
    tConc = 2.42,
    erosCoeff {value : null; fit_range : <0.1,0.4>},
    dr = 0.08;
}

process srDNload (runoff,surf,srDN) : SurfaceRunoffDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    srDNconc {value : null; fit_range : <0.05,0.2>};
}
```

```
process gwDNload (gw,surf,gwDN) : GroundwaterDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    gwDNconc {value : null; fit_range : <0.1,0.4>};
}

process septDNload (gw,septDN) : SepticDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 982,
    sDNproduction = 12,
    plantUptake = 1.6,
    gwTot = 22;
}

process srDPload (runoff,surf,srDP) : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorusLoad
{
  consts:
    srDPconc {value : null; fit_range : <0.01,0.04>};
}

process gwDPload (gw,surf,gwDP) : GroundwaterDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    gwDPconc {value : null; fit_range : <0.01,0.03>};
}

process septDPload (gw,septDP) : SepticDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 982,
    sDPproduction = 1.5,
    plantUptake = 0.4,
    gwTot = 22;
}

process ruralsNload (sed,ruralsN) : RuralSolidNitrogenLoad {
  consts:
    rSNconc {value : null; fit_range : <400,600>},
    nEnrichmentRatio {value: null; fit_range : <1,3>};
}

process ruralsPload (sed,ruralsP) : RuralSolidPhosphorusLoad {
  consts:
    rSPconc {value : null; fit_range : <100,150>},
    pEnrichmentRatio {value : null; fit_range : <1,3>};
}

process dnLoadSummation (dn,srDN,gwDN,septDN,psDN,flow) :
DissolvedNitrogenLoadSummation {
  consts:
    factor = 1,
    fTot = 44;
}

process snLoadSummation (sn,ruralsN,urSN) : SolidNitrogenLoadSummation {
  consts:
    factor = 1;
}

process tnLoad (tn,dn,sn) : TotalNitrogenLoad {}

process dpLoadSummation (dp,srDP,gwDP,septDP,psDP,flow) :
DissolvedPhosphorusLoadSummation {
  consts:
```

```
        factor = 1,
        fTot = 44;
    }

process spLoadSummation (sp,ruralSP,urSP) : SolidPhosphorusLoadSummation {
    consts:
        factor = 1;
}

process tpLoad (tp,dp,sp) : TotalPhosphorusLoad {}

process sedLoad (sed) : SedimentLoad {
    consts:
        factor = 1;
}
}

process subNload (subTN,[urban.tn,rural.tn,natural.tn]) : SubNitrogenLoad
{}

process subPload (subTP,[urban.tp,rural.tp,natural.tp]) : SubPhosphorusLoad
{}

process subSload (subSed,[urban.sed,rural.sed,natural.sed]) :
SubSedimentLoad {}
}

compartment sub2 : SpatialUnit {

entity subTN : SubTotalNitrogen {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity subTP : SubTotalPhosphorus {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity subSed : SubSediment {
    vars:
        load {role: endogenous; initial: 0};
}

compartment rural : SpatialUnit {

entity prec : Precipitation {
    vars:
        amountOfWater {role: exogenous},
        ant {role: exogenous};
}

entity runoff : SurfaceRunoffWater {
    vars:
        amountOfWater {role: exogenous};
}

entity gw : Groundwater {
    vars:
        amountOfWater {role: exogenous};
}
```



```
entity flow : Flow {
  vars:
    amountOfWater {role: exogenous},
    rate { role: exogenous};
}

entity surf : Surface {
  consts:
    area = 577,
    imp = 0;
}

entity sed : Sediment {
  vars:
    mass {role: endogenous; initial: 0},
    erosivity {role: endogenous; initial: 0},
    lnAlpha {role: exogenous},
    peakRunoffRate {role: endogenous; initial: 0},
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity dn : DissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDN : DissolvedNitrogenPointSource {
  vars:
    load {role: exogenous};
}

entity srDN : SurfaceRunoffDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gwDN : GroundwaterDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDN : SepticDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sn : SolidNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSN : RuralSolidNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity urSN : UrbanSolidNitrogen {
  vars:
    load {role: exogenous},
    accumulation {role: exogenous};
}
```

```
entity tn : TotalNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity dp : DissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDP : DissolvedPhosphorusPointSource {
  vars:
    load {role: exogenous};
}

entity srDP : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gwDP : GroundwaterDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDP : SepticDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sp : SolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSP : RuralSolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity urSP : UrbanSolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: exogenous},
    accumulation {role: exogenous};
}

entity tp : TotalPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

process sedYield (sed,runoff,prec,surf) : SedimentYield {
  consts:
    kUsle {value : null; fit_range : <0.038,0.048>},
    cUsle {value : null; fit_range : <0.04,0.3>},
    pUsle {value : null; fit_range : <0.25,0.5>},
    lsUsle = 2.59,
    tConc = 0.46,
    erosCoeff {value : null; fit_range : <0.1,0.4>},
    dr = 0.22;
}
```

```
process srDNload (runoff,surf,srDN) : SurfaceRunoffDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    srDNconc {value : null; fit_range : <0.1,0.4>};
}

process gwDNload (gw,surf,gwDN) : GroundwaterDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    gwDNconc {value : null; fit_range : <0.5,0.7>};
}

process septDNload (gw,septDN) : SepticDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 122,
    sDNproduction = 12,
    plantUptake = 1.6,
    gwTot = 11;
}

process srDPload (runoff,surf,srDP) : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorusLoad
{
  consts:
    srDPconc {value : null; fit_range : <0.05,0.08>};
}

process gwDPload (gw,surf,gwDP) : GroundwaterDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    gwDPconc {value : null; fit_range : <0.02,0.06>};
}

process septDPload (gw,septDP) : SepticDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 122,
    sDPproduction = 1.5,
    plantUptake = 0.4,
    gwTot = 11;
}

process ruralSNload (sed,ruralSN) : RuralSolidNitrogenLoad {
  consts:
    rSNconc {value : null; fit_range : <500,700>},
    nEnrichmentRatio {value: null; fit_range : <1,3>};
}

process ruralSPload (sed,ruralSP) : RuralSolidPhosphorusLoad {
  consts:
    rSPconc {value : null; fit_range : <150,450>},
    pEnrichmentRatio {value : null; fit_range : <1,3>};
}

process dnLoadSummation (dn,srDN,gwDN,septDN,psDN,flow) :
DissolvedNitrogenLoadSummation {
  consts:
    factor = 0,
    fTot = 141;
}

process snLoadSummation (sn,ruralSN,urSN) : SolidNitrogenLoadSummation {
  consts:
    factor = 0;
}
```

```
process tnLoad (tn,dn,sn) : TotalNitrogenLoad {}

process dpLoadSummation (dp,srDP,gwDP,septDP,psDP,flow) :
DissolvedPhosphorusLoadSummation {
  consts:
    factor = 0,
    fTot = 141;
}

process spLoadSummation (sp,ruralSP,urSP) : SolidPhosphorusLoadSummation {
  consts:
    factor = 0;
}

process tpLoad (tp,dp,sp) : TotalPhosphorusLoad {}

process sedLoad (sed) : SedimentLoad {
  consts:
    factor = 0;
}
}

compartment natural : SpatialUnit {

entity prec : Precipitation {
  vars:
    amountOfWater {role: exogenous},
    ant {role: exogenous};
}

entity runoff : SurfaceRunoffWater {
  vars:
    amountOfWater {role: exogenous};
}

entity gw : Groundwater {
  vars:
    amountOfWater {role: exogenous};
}

entity flow : Flow {
  vars:
    amountOfWater {role: exogenous},
    rate { role: exogenous};
}

entity surf : Surface {
  consts:
    area = 675,
    imp = 0;
}

entity sed : Sediment {
  vars:
    mass {role: endogenous; initial: 0},
    erosivity {role: endogenous; initial: 0},
    lnAlpha {role: exogenous},
    peakRunoffRate {role: endogenous; initial: 0},
    load {role: endogenous; initial: 0};
}
```

```
entity dn : DissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDN : DissolvedNitrogenPointSource {
  vars:
    load {role: exogenous};
}

entity srDN : SurfaceRunoffDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity gwDN : GroundwaterDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDN : SepticDissolvedNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sn : SolidNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSN : RuralSolidNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity urSN : UrbanSolidNitrogen {
  vars:
    load {role: exogenous},
    accumulation {role: exogenous};
}

entity tn : TotalNitrogen {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity dp : DissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity psDP : DissolvedPhosphorusPointSource {
  vars:
    load {role: exogenous};
}

entity srDP : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}
```

```
entity gwDP : GroundwaterDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity septDP : SepticDissolvedPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity sp : SolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity ruralSP : RuralSolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

entity urSP : UrbanSolidPhosphorus {
  vars:
    load {role: exogenous},
    accumulation {role: exogenous};
}

entity tp : TotalPhosphorus {
  vars:
    load {role: endogenous; initial: 0};
}

process sedYield (sed,runoff,prec,surf) : SedimentYield {
  consts:
    kUsle {value : null; fit_range : <0.038,0.048>},
    cUsle {value : null; fit_range : <0.002,0.06>},
    pUsle {value : null; fit_range : <0.9,1>},
    lsUsle = 8.23,
    tConc = 0.36,
    erosCoeff {value : null; fit_range : <0.1,0.4>},
    dr = 0.22;
}

process srDNload (runoff,surf,srDN) : SurfaceRunoffDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    srDNconc {value : null; fit_range : <0.05,0.2>};
}

process gwDNload (gw,surf,gwDN) : GroundwaterDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    gwDNconc {value : null; fit_range : <0.1,0.4>};
}

process septDNload (gw,septDN) : SepticDissolvedNitrogenLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 87,
    sDNproduction = 12,
    plantUptake = 1.6,
    gwTot = 22;
}
```

```
process srDPload (runoff,surf,srDP) : SurfaceRunoffDissolvedPhosphorusLoad
{
  consts:
    srDPconc {value : null; fit_range : <0.01,0.04>};
}

process gwDPload (gw,surf,gwDP) : GroundwaterDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    gwDPconc {value : null; fit_range : <0.01,0.03>};
}

process septDPload (gw,septDP) : SepticDissolvedPhosphorusLoad {
  consts:
    numberOfInhabitants = 87,
    sDPproduction = 1.5,
    plantUptake = 0.4,
    gwTot = 22;
}

process ruralSNload (sed,ruralSN) : RuralSolidNitrogenLoad {
  consts:
    rSNconc {value : null; fit_range : <400,600>},
    nEnrichmentRatio {value: null; fit_range : <1,3>};
}

process ruralSPload (sed,ruralSP) : RuralSolidPhosphorusLoad {
  consts:
    rSPconc {value : null; fit_range : <100,150>},
    pEnrichmentRatio {value : null; fit_range : <1,3>};
}

process dnLoadSummation (dn,srDN,gwDN,septDN,psDN,flow) :
DissolvedNitrogenLoadSummation {
  consts:
    factor = 0,
    fTot = 69;
}

process snLoadSummation (sn,ruralSN,urSN) : SolidNitrogenLoadSummation {
  consts:
    factor = 0;
}

process tnLoad (tn,dn,sn) : TotalNitrogenLoad {}

process dpLoadSummation (dp,srDP,gwDP,septDP,psDP,flow) :
DissolvedPhosphorusLoadSummation {
  consts:
    factor = 0,
    fTot = 69;
}

process spLoadSummation (sp,ruralSP,urSP) : SolidPhosphorusLoadSummation {
  consts:
    factor = 0;
}

process tpLoad (tp,dp,sp) : TotalPhosphorusLoad {}

process sedLoad (sed) : SedimentLoad {
  consts:
```

```
        factor = 0;
    }
}

process subNload (subTN, [rural.tn,natural.tn]) : SubNitrogenLoad {}

process subPload (subTP, [rural.tp,natural.tp]) : SubPhosphorusLoad {}

process subSload (subSed, [rural.sed,natural.sed]) : SubSedimentLoad {}
}

process nSummation (finTN, [sub1.subTN,sub2.subTN]) : NitrogenSummation {}

process pSummation (finTP, [sub1.subTP,sub2.subTP]) : PhosphorusSummation
{}

process sedSummation (totSed, [sub1.subSed,sub2.subSed]) :
SedimentSummation {}
}
```


Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA G: PRIMERJAVA UMERJENIH VREDNOSTI PARAMETROV ŠTIRIH TESTNIH MODELOV, NAMENJENIH MODELIRANJU KAKOVOSTI VODA V POREČJU REKE QUARTEIRE

APPENDIX G: COMPARISON OF THE CALIBRATED PARAMETER VALUES OF THE FOUR EXPERIMENTAL MODELS FOR MODELLING WATER QUALITY IN THE QUARTEIRA RIVER CATCHMENT

	Podrazdelki	Parametri														RMSE	
		K _{USLE}	C _{USLE}	P _{USLE}	a	C _{sr_N}	C _{gw_N}	C _{sr_P}	C _{gw_P}	C _{soil_N}	ER _N	n _{acc_N}	C _{soil_P}	ER _P	n _{acc_P}		
Modeli	1	sub1.urban	0,044	0,00	1,00	0,10	0,20	0,34	0,016	0,036	-	-	0,054	-	-	0,007	26,99
		sub1.rural	0,040	0,04	0,32	0,10	0,39	0,64	0,05	0,058	566	1,53	-	150	1,14	-	
		sub1.natural	0,040	0,003	0,90	0,10	0,06	0,10	0,014	0,018	430	1,06	-	121	1,38	-	
		sub2.rural	0,044	0,17	0,46	0,34	0,12	0,65	0,06	0,028	694	2,53	-	167	2,41	-	
		sub2.natural	0,038	0,05	0,96	0,36	0,10	0,36	0,035	0,011	526	1,78	-	144	2,36	-	
	2	sub1.urban	0,041	0,00	1,00	0,23	0,25	0,22	0,050	0,011	-	-	0,048	-	-	0,006	28,67
		sub1.rural	0,039	0,05	0,30	0,11	0,43	0,63	0,068	0,041	500	1,08	-	150	1,29	-	
		sub1.natural	0,038	0,002	0,92	0,10	0,05	0,17	0,018	0,013	408	2,48	-	111	1,27	-	
		sub2.rural	0,042	0,26	0,34	0,22	0,21	0,68	0,058	0,030	523	2,09	-	196	1,76	-	
		sub2.natural	0,041	0,027	0,94	0,33	0,08	0,27	0,015	0,020	590	2,55	-	118	1,98	-	
	3	sub1.urban	0,045	0,00	1,00	-	0,17	0,40	0,063	0,025	-	-	0,049	-	-	0,006	26,26
		sub1.rural	0,040	0,04	0,31	-	0,36	0,63	0,061	0,038	682	1,35	-	150	1,01	-	
		sub1.natural	0,038	0,002	0,90	-	0,08	0,14	0,010	0,020	508	1,84	-	101	1,03	-	
		sub2.rural	0,047	0,14	0,26	-	0,24	0,65	0,050	0,030	632	2,35	-	154	2,12	-	
		sub2.natural	0,040	0,05	0,95	-	0,10	0,40	0,023	0,024	580	1,92	-	113	2,52	-	
	4	sub1.urban	0,038	0,00	1,00	-	0,30	0,40	0,047	0,020	-	-	0,053	-	-	0,006	25,73
sub1.rural		0,038	0,04	0,35	-	0,29	0,64	0,050	0,039	575	3,00	-	254	1,00	-		
sub1.natural		0,038	0,002	0,91	-	0,05	0,12	0,014	0,017	408	2,14	-	100	1,04	-		
sub2.rural		0,047	0,08	0,49	-	0,19	0,70	0,062	0,02	570	1,45	-	195	2,08	-		
sub2.natural		0,040	0,06	0,98	-	0,09	0,24	0,014	0,018	507	2,55	-	149	2,46	-		