

UDK/UDC: 556.51:004.4'24(469)

Prejeto/Received: 01.02.2022

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 23.03.2022

DOI: [10.15292/acta.hydro.2022.01](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2022.01)

Objavljeno na spletu/Published online: 15.09.2022

AVTOMATIZIRANO MODELIRANJE HIDROLOŠKIH POJAVOV IN KAKOVOSTI VODA NA RAVNI POREČIJ

AUTOMATED CATCHMENT SCALE MODELLING OF HYDROLOGICAL PHENOMENA AND WATER QUALITY

Mateja Škerjanec¹

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

Izvleček

V prispevku je predstavljeno avtomatizirano modeliranje hidroloških pojavov in procesov spiranja hranil na ravni porečij, ki omogoča avtomatsko izgradnjo modelov na podlagi domenskega znanja in merjenih podatkov. Osnova za tovrstno modeliranje je domenska knjižnica, v kateri je zbrano znanje s področja hidrološkega modeliranja in modeliranja kakovosti voda, pri čemer so posamezni procesi predstavljeni z alternativnimi enačbami. Formalizem, uporabljen za zapis knjižnice, je kompatibilen z orodjem ProBMoT. Na podlagi knjižnice in opisa izbranega porečja ProBMoT generira vse alternativne strukture modela opazovanega sistema, te pa 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. Metodologija je bila aplicirana 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, dobljeni rezultati pa so z vidika natančnosti primerljivi oz. boljši od rezultatov, dobljenih z orodjem SWAT.

Ključne besede: avtomatizirano modeliranje, ProBMoT, porečje, hidrologija, spiranje hranil, Quarteira.

Abstract

An automated approach to hydrologic and water quality modeling on a catchment scale is presented, one that automatically produces suitable models from domain modeling knowledge and measured data. An essential component of the methodology is the domain knowledge library, comprising knowledge on hydrological and nutrient loading processes and containing alternative formulations for some of them. The library is written in a formalism compatible with the equation discovery tool ProBMoT. Given a user specification of a modeling task, ProBMoT searches the space of alternative candidate models encoded in the library. The generated models are optimized against the provided measured data, and the best-fitted model is proposed as the most suitable for modeling 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 in

¹ Stik / Correspondence: mateja.skerjanec@fgg.uni-lj.si

© Škerjanec; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Škerjanec; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

the Quarteira River support the findings of the previous research work, while the ProBMoT results are comparable or better than the results obtained with the SWAT model.

Keywords: automated modelling, ProBMoT, catchment, hydrology, nutrient wash-off, Quarteira.

1. Uvod

V preteklosti je bilo razvitih več modelov oz. orodij za modeliranje hidroloških pojavov in kakovosti voda na ravni porečij, npr. GWLF (Haith et al., 1992), SWAT (Arnold in Fohrer, 2005), SPARROW (Schwarz et al., 2006) in MONERIS (Behrendt et al., 2007). 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 v količini podatkov, potrebnih za umerjanje modela in simulacijo. Večina orodij se uporablja v raziskovalnih skupinah, ki so orodja razvila, le redka se uporabljajo širše.

Z vidika uporabnika je izbira ustreznega orodja za modeliranje na ravni porečij pogosto težavna, saj običajno ni enega samega modela, s katerim bi lahko do popolnosti opisali opazovani sistem. Zato je treba 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).

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 (Laniak et al., 2013; Whelan et al., 2014; de Kok et al., 2015). 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. Object Modelling System (OMS, David et al., 2013), Spatially Explicit Integrated Modelling System (SEIMS, Liu et al., 2016) in

HydroInformatic Modelling System (HIMS, Wang et al., 2018).

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 et al., 2002).

Zapis znanja v obliki 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 et al., 2005) in ProBMoT (Čerepnalkoski et al., 2012), lahko uporabljamo le v kombinaciji z združljivimi domenskimi knjižnicami.

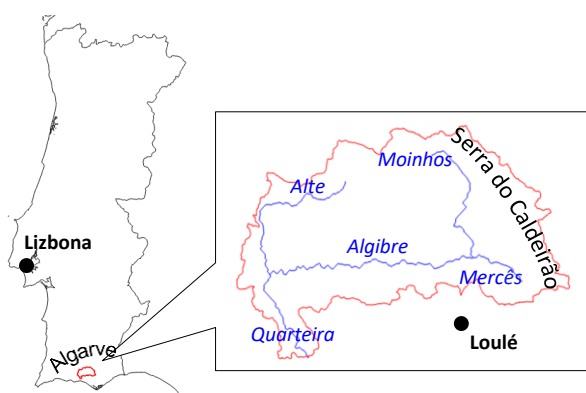
Avtomatsko iskanje primerne strukture modela je že bilo uspešno aplicirano na področju modeliranja prehranske verige v jezerih (Atanasova et al., 2006; Čerepnalkoski et al., 2012), dinamičnih bioloških procesov (Tanevski et al., 2016), dinamike vodnih rezervoarjev (Simidjievski et al., 2020), hidroloških procesov (Jiang et al., 2019) in modeliranja urbane odvodnje (Radinja et al., 2021a; 2021b).

V prispevku bo predstavljena praktična aplikacija orodja ProBMoT in domenske knjižnice za modeliranje hidroloških pojavov in procesov spiranja hranil na ravni porečij (Škerjanec, 2014; Škerjanec et al., 2014). Kot testni primer je bilo izbrano porečje reke Quarteira (Algarve, Portugalska), ker je bilo vključeno v projekt IMPACT (www.impact.igb-berlin.de), namenjen

razvoju modelov za določitev vpliva antropogenih dejavnikov na rečne ekosisteme.

2. Testno porečje

Porečje reke Quarteire (slika 1) meri približno 315 km². Relief je razgiban, z nadmorskimi višinami med 14 in 516 m n. m. Na osnovi topografije lahko porečje razmejimo na pet podporečij (slika 2). Območje med podporečji 1, 3 in 4 pripada kraški depresiji Nave do Barão z značilnostmi presihajočega jezera, ki ne prispeva k površinskemu odtoku, prispeva pa k baznemu odtoku.



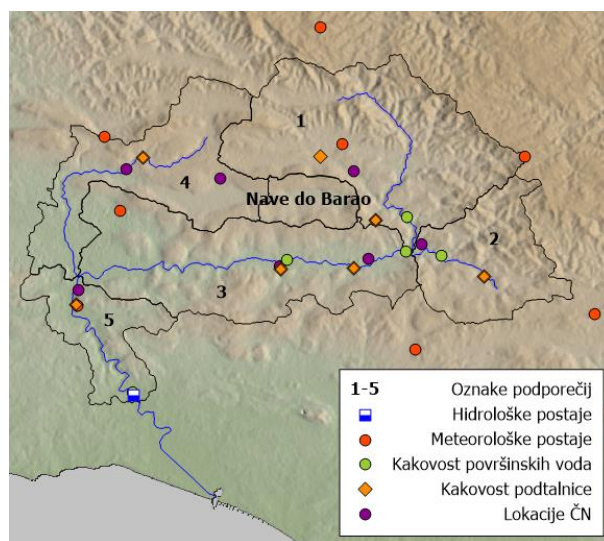
Slika 1: Lokacija testnega porečja.

Figure 1: Location of the case study area.

Raba zemljišč sledi razgibanosti terena. Vzhodni gričevnati del porečja prekriva naravno rastje, predvsem listnati gozd in sklerofilno rastlinje. Zahodni del porečja je z vidika pokrovnosti veliko bolj raznolik. Tu prevladujejo kmetijske površine, predvsem sadovnjaki. Urbanih površin je malo. Na obravnavanem območju prevladujejo teksturno težka tla z razmeroma visoko vsebnostjo gline, ki jih uvrščamo v hidrološko skupino D (tj. v skupino zemljin z visokim odtočnim potencialom in zelo nizko stopnjo infiltracije).

Pokrajina Algarve ima sredozemsko podnebje. Povprečne mesečne temperature se gibljejo med 10 in 25 °C, povprečna letna količina padavin pa redko preseže 500 mm. Povprečni mesečni pretoki, izmerjeni na hidrološki postaji na iztoku iz porečja (tj. Ponte Rodoviária), se gibljejo med 0,04 m³/s (v poletnih mesecih) in 2,75 m³/s (v zimskih mesecih).

V porečju je več merilnih mest (tj. meteoroloških in hidroloških postaj ter lokacij za merjenje kakovosti površinskih in podzemnih voda; slika 2). Postaje upravljata portugalska Agencija za okolje (Agência Portuguesa do Ambiente) in Regionalni direktorat za kmetijstvo in ribištvo Algarve (Direção Regional de Agricultura e Pescas do Algarve oz. DRAP Algarve). Hidrometeorološki podatki in podatki o kakovosti voda so prosto dostopni preko spletnega pregledovalnika SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, <http://snirh.pt>).



Slika 2: Topografija porečja reke Quarteire, razmejitev na podporečja in lokacije merilnih mest ter čistilnih naprav.

Figure 2: Topography of the Quarteira River catchment, watershed delineation, and locations of monitoring stations and wastewater treatment plants.

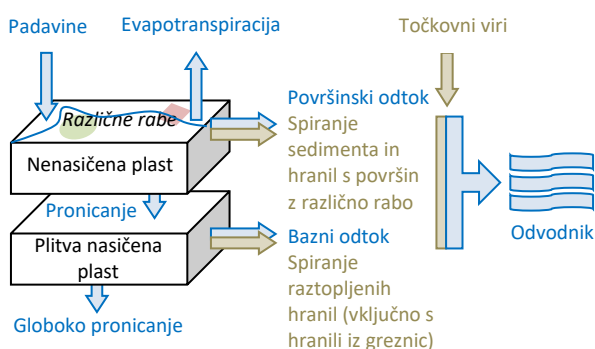
Za potrebe določitve priključenosti prebivalcev na čistilne naprave (ČN) oz. greznice so bile s strani Komisije za regionalni razvoj in koordinacijo Algarve (Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve oz. CCDR Algarve) pridobljene karte statističnih enot, lokacij ČN (slika 2) in pokritosti s kanalizacijskim omrežjem. Predpostavljeno je bilo, da imajo prebivalci, ki niso priključeni na ČN, lastne greznice.

Velik del porečja reke Quarteire leži na območju kraškega vodonosnika, iz katerega vodo črpajo predvsem za potrebe lokalnega namakanja

kmetijskih površin (Stigter et al., 2009). Ker ne gre za nepovratne odvzeme, ti v postopku modeliranja niso bili upoštevani.

3. Matematična formulacija okoljskih procesov

Uporabljena domenska knjižnica (Škerjanec, 2014; Škerjanec et al., 2014) vključuje enačbe za modeliranje hidroloških pojavov in procesov spiranja sedimenta/hranil, ki so predstavljeni na sliki 3.



Slika 3: Shematski prikaz procesov na ravni porečij. Modre puščice predstavljajo hidrološke procese, rjave pa procese spiranja hranil (prirejeno po Škerjanec et al., 2014).

Figure 3: Schematic presentation of catchment scale processes. Blue arrows represent major fluxes in the water cycle, while green arrows symbolize nutrient fluxes (adapted from Škerjanec et al., 2014).

3.1 Hidrološki procesi

Za modeliranje površinskega odtoka je uporabljena modificirana metoda SCS (NRCS, 1986), ki upošteva dinamično spreminjanje vrednosti parametra CN v odvisnosti od predhodne vlažnosti tal. Parameter CN poleg vpliva predhodne vlažnosti tal zajema tudi vpliv pedologije in rabe zemljišč ter dosega vrednosti med 0 in 100. Nizke vrednosti parametra so indikator visoke infiltracijske sposobnosti tal, medtem ko so visoke vrednosti CN značilne za neprepustne površine.

Ker ProBMoT formalizem ne podpira zapisa pogojnih (IF-THEN) stavkov, je v knjižnici

uporabljen zapis, ki sledi Monodovi enačbi (Monod, 1949):

$$CN = CN_3 \cdot \frac{ant}{k + ant} \quad (1)$$

V zgornji enačbi predstavljajo CN_3 maksimalno vrednost parametra CN , ant vsoto padavin, zapadlih v preteklih petih dneh (mm), k pa parameter, ki ga umerjamo.

Evapotranspiracijo (ET) izračunamo kot produkt referenčne evapotranspiracije (ET_0) in koeficienta pokrovnosti CV ali pa s pomočjo vodne bilance tal, pri čemer upoštevamo manjšo od obeh vrednosti. Za izračun ET_0 (mm) sta uporabljeni dve alternativni enačbi:

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

$$ET_0 = \frac{0,0023 \cdot R_a \cdot \sqrt{T_{max} - T_{min}} \cdot (T_{avg} + 17,8)}{\lambda} \quad (3)$$

V enačbi (2) (Hamon, 1961) predstavlja H število sončnih ur na dan, e nasičeni parni tlak (mbar) in T povprečno dnevno temperaturo zraka ($^{\circ}C$). V enačbi (3) (Hargreaves et al., 1985) nastopajo R_a (jakost sončnega obsevanja, v $MJ/m^2 \cdot dan$), T_{max} , T_{min} , T_{avg} (maksimalna, minimalna in povprečna dnevna temperatura zraka, v $^{\circ}C$) in λ (izparilna toplota vode, v MJ/kg).

Količina vode v nenasičeni in plitvi nasičeni plasti tal je določena s pomočjo enačb (4) in (5):

$$\frac{dU}{dt} = R - Q - ET - Perc \quad (4)$$

$$\frac{dSS}{dt} = Perc - GW - DS \quad (5)$$

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

pronicanja (vse spremenljivke so izražene v mm/dan).

Pronicanje (*Perc*) poteka samo pod pogojem, da količina vode v nenasičeni plasti tal preseže količino rastlinam dostopne vode (U^* , v mm):

$$Perc = \max(0; U + R - Q - ET - U^*) \quad (6)$$

Plitva nasičena plast tal je obravnavana kot enostaven rezervoar. Ta se prazni bodisi z baznim odtokom, ki posredno prispeva k pretoku odvodnika, ali z globokim pronicanjem.

$$GW = SS \cdot r \quad (7)$$

$$DS = SS \cdot s \quad (8)$$

V zgornjih dveh enačbah (Haith in sod., 1992) predstavljajo *GW* količino baznega odtoka (mm), *r* recesijsko konstanto, *DS* količino vodnih izgub zaradi globokega pronicanja in *s* konstanto ponikanja.

3.2 Spiranje sedimenta in hranil

Za izračun količine odplavljenega sedimenta (*Y*, v t/dan) sta na voljo dve enačbi:

$$Y = 0,132 \cdot Q^{5/3} \cdot A \cdot R_{USLE} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot DR \quad (9)$$

$$Y = 11,8 \cdot (Q \cdot A \cdot q_{peak})^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \quad (10)$$

Enačba (9) (Haith, 1985) temelji na osnovni obliki enačbe USLE (Universal Soil Loss Equation; Wischmeier in Smith, 1978), pri čemer predstavljajo 0,132 pretvorbeni faktor med enotami, $Q^{5/3}$ transportno zmogljivost površinskega odtoka (angl. transport capacity of runoff) in *DR* koeficient odplavljanja. Enačba (10) predstavlja enačbo MUSLE (Williams, 1995), kjer sta *Q* količina vode, ki površinsko odteče (mm), in q_{peak} maksimalni površinski odtok (m^3/s). V obeh enačbah nastopajo tudi velikost prispevne površine *A* (ha), dejavnik padavin in odtoka R_{USLE} ($(MJ \cdot mm)/(ha \cdot h)$), dejavnik erodibilnosti tal *K* ($(t \cdot ha \cdot h)/(ha \cdot MJ \cdot mm)$), dejavnik pokrovnosti in obdelave tal *C*, dejavnik zaščitnih ukrepov *P* in topografski dejavnik oz. dejavnik dolžine in naklona pobočja *LS*.

Obremenitev vodotoka s hranili v raztopljeni obliki je izračunana posebej za dušik in fosfor. K njej prispevajo površinski in bazni odtok, izpusti iz greznic in točkovni viri onesnaženja (npr. ČN in industrijski izpusti).

Obremenitev s hranili 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):

$$L_{D_{sr}} = 0,01 \cdot C_{sr} \cdot Q \cdot A \quad (11)$$

pri čemer predstavljata *Q* količino vode, ki površinsko odteče (mm), in *A* velikost prispevne površine (ha). Na podoben način je izračunana tudi obremenitev z dušikom in fosforjem v raztopljeni obliki, 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):

$$L_{D_{gw}} = 0,01 \cdot C_{gw} \cdot GW \cdot A \quad (12)$$

Obremenitev z izbranim hranilom v raztopljeni obliki, h kateri prispevajo izpusti iz greznic ($L_{D_{sept}}$, v kg/dan), je določena 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 greznice (n_{inh}), in deleža letnega baznega odtoka, ki se generira v posameznem dnevu (GW / GW_{ann} , oboje v mm):

$$L_{D_{sept}} = 0,001 \cdot n_{inh} \cdot (e_{nut} - u_{nut}) \cdot \frac{GW}{GW_{ann}} \quad (13)$$

Tudi obremenitev s hranili v vezani obliki je izračunana posebej za dušik in fosfor. K njej prispevajo obremenitve s kmetijskih in urbanih površin. Obremenitev s kmetijskih površin je izračunana kot produkt povprečne koncentracije hranila v tleh (C_{soil} , v g/t), obogatitvenega razmerja *ER* in količine odplavljenega sedimenta *Y* (t/dan). Za izračun obremenitev z urbanih površin ($L_{S_{urb}}$, v kg) sta v knjižnici na voljo naslednji enačbi:

$$L_{S_{urb}} = (1 - e^{-1,81 \cdot Q/10}) \cdot N_{acc} \cdot A \quad (14)$$

$$L_{S_{urb}} = \frac{\beta_0 \cdot \left(\frac{R}{25,4}\right)^{\beta_1} \cdot \left(\frac{A \cdot i}{2,59}\right)^{\beta_2} \cdot (i \cdot 100 + 1)^{\beta_3} \cdot \beta_4}{2,205} \quad (15)$$

V enačbi (14) (Haith in sod., 1992) 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). N_{acc} izračunamo s pomočjo enačbe:

$$\frac{dN_{acc}}{dt} = n_{acc} - \beta \cdot N_{acc} \quad (16)$$

kjer sta n_{acc} hitrost akumulacije (kg/(ha·dan)) in β hitrost spiranja (angl. depletion rate, /dan).

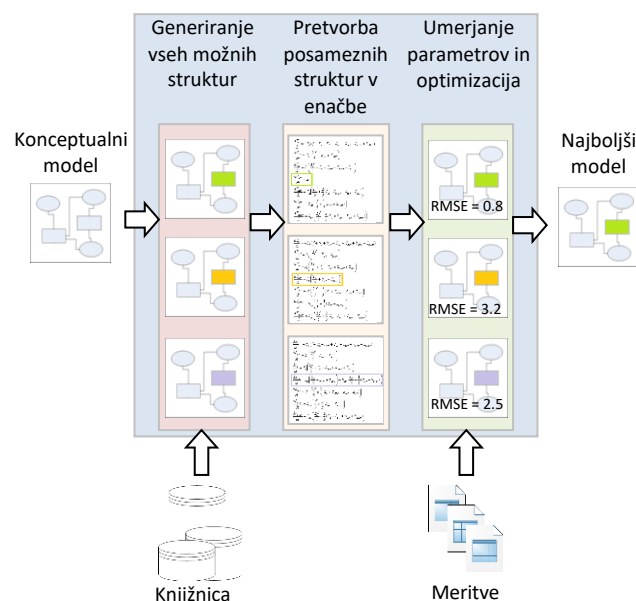
Enačba (15) predstavlja USGS regresijsko enačbo (Driver in Tasker, 1990), kjer so R dnevna višina padavin (mm), A velikost prispevne površine (km²), i delež neprepustnih površin in β_{0-4} vrednosti regresijskih koeficientov.

4. Avtomatizirano modeliranje z orodjem ProBMoT

Orodje ProBMoT (Process-Based Modelling Tool) je bilo razvito na Odseku za tehnologije znanja Instituta Jožef Stefan (Čerepnalkoski et al., 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 umerjanju izbranih parametrov.

Postopek modeliranja z orodjem ProBMoT je prikazan na sliki 4. V prvi fazi modeliranja se na podlagi domenske knjižnice (Škerjanec, 2014; Škerjanec et al., 2014) in konceptualnega modela (tj. opisa opazovanega sistema, npr. porečja) generirajo vse možne strukture modela. Sledi faza, v kateri je vsaka posamezna struktura modela prevedena v niz 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 napake RMSE. Model z najnižjo vrednostjo RMSE je izbran kot najprimernejši model opazovanega sistema.



Slika 4: Shematski prikaz modeliranja z orodjem ProBMoT (Škerjanec, 2014).

Figure 4: A schematic description of how ProBMoT works (Škerjanec, 2014).

4.1 Priprava konceptualnega modela

V konceptualnem modelu oz. konceptualnem opisu porečja so komponente sistema zapisane v obliki specifičnih entitet, procesov in razdelkov, ki sledijo zapisu predlog, shranjenih v domenski knjižnici. Entitete predstavljajo osnovne gradnike opazovanega sistema, ki jih lahko opišemo s konstantami oz. parametri ali s spremenljivkami. Primeri entitet so voda, podnebje, površje, sediment in hranila. Entitete lahko razdelimo na več podentitet (npr. dušik in fosfor). Procesni opisujejo odnose med entitetami v obliki enačb. Med procese na področju modeliranja porečij uvrščamo hidrološke pojave ter procese odplavljanja sedimenta in spiranja hranil (slika 3), ki jih lahko (podobno kot entitete) razdelimo v več podprocesov. Dinamični sistem, ki ga želimo

modelirati (npr. opazovano porečje) lahko strukturiramo z uporabo razdelkov. Ti so hierarhično urejeni, pri čemer vsak razdelek vsebuje pripadajoče entitete, procese in podrazdelke (npr. podporečja).

Za potrebe hidrološkega modeliranja in modeliranja spiranja sedimenta/hranil v porečju reke Quarteire sta bila pripravljena dva ločena konceptualna modela (Škerjanec, 2014). Ker je bilo za umerjanje modelov na voljo samo eno merilno mesto na iztoku iz porečja (tj. Ponte Rodoviária), je bilo porečje razdeljeno le na dva razdelka: porečje brez depresije Nave do Barão (sub1) in območje depresije (sub2). Oba razdelka sta bila nadalje razdeljena v podrazdelke, ki sovpadajo z različnimi rabami zemljišč. Tako so bile ločeno obravnavane urbane (urban), kmetijske (rural) in naravne površine (natural), pri čemer na območju depresije urbanih površin ni. V vsakem izmed obravnavanih podrazdelkov so bili definirani vsi procesi, predstavljeni v poglavju 3, ter vse sodelujoče entitete s svojimi odvisnimi in neodvisnimi spremenljivkami ter konstantami.

4.2 Priprava datotek z vhodnimi podatki

Za vse neodvisne spremenljivke, vključene v (pod)razdelke konceptualnega modela, je treba pripraviti časovni niz merjenih oz. izračunanih vrednosti. V obravnavanem primeru so vhodne datoteke za generiranje hidrološkega modela vsebovale podatke o dnevni višini padavin, vsoti padavin, zapadlih v preteklih petih dneh, povprečni, maksimalni in minimalni dnevni temperaturi, jakosti sončnega obsevanja, številu sončnih ur v dnevu in nasičenem parnem tlaku. Vhodne datoteke za generiranje modela kakovosti so poleg višine padavin vsebovale še rezultate hidrološkega modela (tj. podatke o količini vode, ki odteče površinsko oz. podpovršinsko), točkovne obremenitve in podatke o akumulaciji hranil na urbanih površinah (Škerjanec, 2014).

5. Ocena napovedne uspešnosti generiranih modelov

Ker je napaka RMSE izražena v enotah opazovane spremenljivke, ni najbolj primerna za oceno

napovedne uspešnosti modela. Zato so pri vsakem generiranem modelu dodatno izračunane vrednosti izbranih (brezdimenzijskih) statističnih kriterijev, ki se pogosto uporabljajo v ta namen, tj. Pearsonov koeficient korelacije r , koeficient Nash-Sutcliffe (NS; Nash in Sutcliffe, 1970), odstotek pristranskosti (angl. percent bias oz. PBIAS; Yapo et al., 1996) in razmerje med RMSE in standardnim odklonom (angl. RMSE – observations' standard deviation ratio oz. RSR; Moriasi et al., 2007).

V preglednici 1 je prikazana ocena napovedne uspešnosti modela, podana na osnovi razponov vrednosti izbranih brezdimenzijskih kriterijev. Pri napovedovanju uspešnosti hidroloških modelov in modelov kakovosti voda se običajno uporabljajo enaki razponi, z izjemo kriterija PBIAS, kjer so pri modeliranju kakovosti voda dovoljeni nekoliko večji razponi.

Preglednica 1: Ocena napovedne sposobnosti modela na podlagi vrednosti izbranih statističnih kriterijev (prirejeno po Moriasi et al., 2007 ter Van Liew et al., 2003).

Table 1: 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 (< ±25)	0–0,5
dobra	0,65–0,75	+10–±15 (±25–±40)	0,5–0,6
zadovoljiva	0,50–0,65	+15–±25 (±40–±70)	0,6–0,7
nezadovoljiva	< 0,5	> ±25 (> ±70)	> 0,7

* Pri kriteriju PBIAS so v oklepaju podane vrednosti za oceno napovedne sposobnosti modela kakovosti voda.

6. Rezultati in diskusija

6.1 Modeliranje hidroloških procesov

Za umerjanje parametrov in iskanje najboljše strukture hidrološkega modela so bili uporabljeni vhodni podatki za obdobje med letoma 2000 in 2004. Na podlagi knjižnice in konceptualnega modela je ProBMoT za izbrano porečje generiral 32

različnih hidroloških modelov. Generiranje struktur modela s sočasnim umerjanjem 30 parametrov (preglednica 2), 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 je bil uporabljen osebni računalnik s procesorjem i7 2600K, frekvenco 3,40 GHz in delovnim pomnilnikom 8 GB.

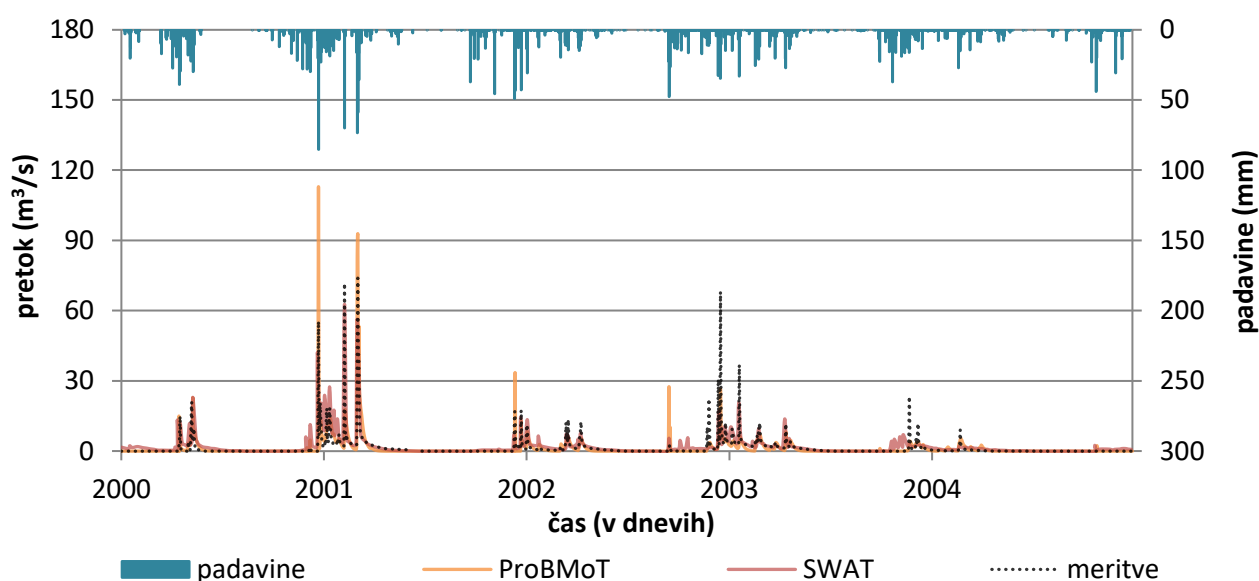
Generirani modeli se med seboj razlikujejo v enačbi, uporabljeni za izračun referenčne evapotranspiracije (ET_0) v posameznem podrazdelku. Najboljši hidrološki model (z najnižjo vrednostjo RMSE napake) je v podrazdelkih z naravnim pokrovom uporabil Hargreavesovo enačbo, ki v primerjavi s Hamonovo enačbo 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 logična.

V preglednici 2 so za najboljši hidrološki model predstavljeni razponi vrednosti posameznih konstant in njihove umerjene vrednosti.

Preglednica 2: Umerjene vrednosti konstant najboljšega hidrološkega modela in uporabljeni razponi vrednosti (v oklepajih).

Table 2: Calibrated constant values of the best hydrological model and the ranges used (in brackets).

Konstanta	Podrazdelki					Enota
	sub1.urban	sub1.rural	sub1.natural	sub2.rural	sub2.natural	
CN	94,59 (87–96)	71,06 (71–78)	64,00 (64–78)	87,94 (72–88)	73,29 (69–77)	-
k	1,70 (1–3)	2,99 (1–3)	3,00 (1–3)	1,28 (1–3)	1,78 (1–3)	-
CV	0,06 (0–0,6)	0,86 (0,7–1,1)	1,05 (0,7–1,1)	1,04 (0,7–1,1)	1,07 (0,7–1,1)	-
U*	141 (140–190)	186 (140–190)	190 (140–190)	140 (140–190)	165 (140–190)	mm
r	0,16 (0,1–0,3)	0,10 (0,1–0,3)	0,10 (0,1–0,3)	0,20 (0,1–0,3)	0,11 (0,1–0,3)	-
s	0,069 (0–0,08)	0,078 (0–0,08)	0,080 (0–0,08)	0,080 (0–0,08)	0,046 (0–0,08)	-



Slika 5: Primerjava povprečnih dnevni pretokov (m^3/s), izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, z rezultati modelov ProBMoT in SWAT, za obdobje 2000–2004.

Figure 5: Comparison of average daily flow rates (m^3/s) measured at the Ponte Rodoviária hydrological station, and the simulation results obtained with ProBMoT and SWAT, for the period 2000–2004.

Glavni razlog za neujemanje rezultatov modela z visokimi konicami pretokov je najverjetneje v tem, da ProBMoT kot kriterijsko funkcijo v postopku optimizacije uporablja napako RMSE. Slednja enakovredno obravnava vse opazovane točke oz. meritve, pri čemer poda agregirano oceno odstopanja napovedi modela od dejanskih merjenih vrednosti opazovane spremenljivke. Za reko Quarteiro 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 obravnavanem primeru bolje približa prevladujočim (nizkim) vrednostim pretokov, medtem ko visoke konice večinoma podceni. Omenjeni 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 najbolj približati.

V preglednici 3 je podana primerjava napovedne uspešnosti izbranega modela, generiranega z orodjem ProBMoT, in umerjenega modela SWAT.

Iz primerjave je razvidno, da model ProBMoT dosega nekoliko boljše ujemanje z merjenimi vrednostmi pretokov, kot model SWAT, čeprav je napovedna sposobnost modela na podlagi vrednosti NS in RSR še vedno nezadovoljiva.

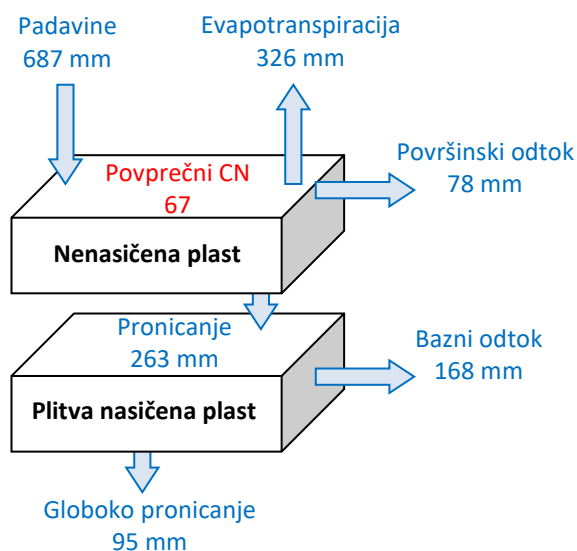
Preglednica 3: Ocena uspešnosti hidroloških modelov SWAT in ProBMoT pri napovedovanju pretokov reke Quarteire na iztoku iz porečja, na podlagi primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev.

Table 3: Assessment of the ability of hydrological models SWAT and GWLF to predict Quarteira River flow rates at the catchment outlet, based on a comparison of the selected statistical indicator values.

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

V predhodni hidrološki študiji (Sohel, 2012) je bila izvedena tudi sezonska analiza ujemanja 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, z modelom SWAT pa je bila izračunana vrednost 0,85 m³/s. To pomeni, da je bilo povprečje poletnih pretokov precenjeno za 85 %. Z modelom ProBMoT je bila izračunana vrednost 0,40 m³/s, kar pomeni, da so bili povprečni pretoki v suhih mesecih podcenjeni za 12 %. V mokrih mesecih (med oktobrom in marcem) je povprečni izmerjeni pretok znašal 1,99 m³/s, z modelom SWAT pa je bila izračunana vrednost 2,78 m³/s, s čimer so bili povprečni pretoki v mokrih mesecih precenjeni za 40 %. Z modelom ProBMoT je bila izračunana vrednost 1,90 m³/s, kar je le 5 % manj od izmerjenega petletnega povprečja.



Slika 6: Povprečna letna vodna bilanca porečja reke Quarteira, za obdobje 2000–2004.

Figure 6: Average annual water balances for the Quarteira River catchment, for the period 2000–2004.

Na sliki 6 je prikazana povprečna letna vodna bilanca porečja reke Quarteire za obdobje 2000–2004, izračunana na osnovi rezultatov izbranega modela ProBMoT. 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 plasti 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 izračunani 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.

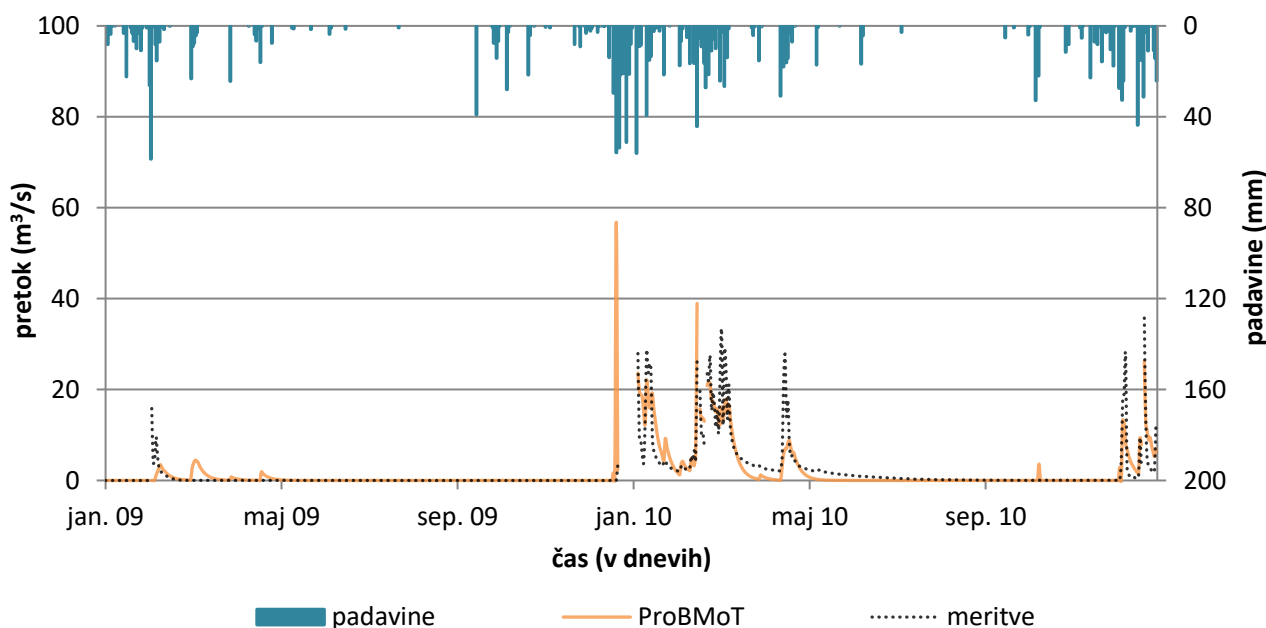
Uporabnost izbranega hidrološkega modela je bila preverjena še z validacijo. V ta namen je bila ustvarjena nova datoteka z vhodnimi podatki, in sicer za obdobje med letoma 2009 in 2010. Struktura konceptualnega modela se ni spremenila. Ohranjene so bile tudi vse (umerjene) vrednosti parametrov oz. konstant (preglednica 2).

Na sliki 7 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. 2. 2009, ko je bila izmerjena najvišja dnevna količina padavin (59 mm). Do večjega izpada podatkov je prišlo tudi v obdobju med 23. 12. 2009 in 4. 1. 2010. Sicer model dobro ujame sezonsko dinamiko nihanja merjenih pretokov, pri čemer izmerjene konice večinoma podceni.

6.2 Modeliranje kakovosti

Tako kot pri modeliranju hidroloških procesov je bilo prvo obdobje meritev (2000–2004) uporabljeno za umerjanje parametrov in iskanje primerne strukture modela kakovosti, drugo (2009–2010) pa za validacijo izbranega modela. Kot osnova za modeliranje so bili uporabljeni rezultati predhodno umerjenega hidrološkega modela z najboljšo strukturo, predstavljenega v poglavju 6.1.

Orodje ProBMoT bi lahko za izbrano porečje generiralo 128 različnih modelov kakovosti, ki bi se med seboj razlikovali v matematičnih izrazih, uporabljenih za izračun odplavljanja sedimenta in obremenitve s hranili z urbanih površin. Ker bi iskanje najprimernejše strukture modela kakovosti trajalo več tednov, so bile namesto tega koraka izbrane štiri testne strukture modela, zapisane v štiri ločene konceptualne modele.



Slika 7: Primerjava povprečnih dnevni pretokov (m^3/s), izmerjenih na hidrološki postaji Ponte Rodoviária, z rezultati validacije izbranega modela ProBMoT, za obdobje 2009–2010.

Figure 7: 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 4: Primerjava štirih testnih struktur modela kakovosti voda, ki za opis izbranih procesov uporabljajo različne kombinacije matematičnih izrazov.

Table 4: Comparison of four water quality model structures using different combinations of mathematical expressions to describe the selected processes.

Model	Proces		
	Odplavljanje sedimenta	Obremenitev z dušikom*	Obremenitev s fosforjem*
1	Haith	Haith	Haith
2	Haith	USGS	USGS
3	Williams	USGS	USGS
4	Williams	Haith	Haith

* Obremenitev z dušikom/fosforjem v vezani obliki z urbanih površin

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 4).

V preglednici 5 je podana primerjava vrednosti statističnih kriterijev za vse štiri strukture modela, pri čemer je napovedna sposobnost posameznega modela obravnavana 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, dosegata boljše ujemanje rezultatov modela z meritvami. Williamsova enačba 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.

Analiza vrednosti izbranih statističnih kriterijev za oceno uspešnosti napovedovanja obremenitev s celotnim dušikom pokaže, da modela 1 in 4, ki za račun obremenitev z dušikom z urbanih površin uporabljata Haithovo enačbo, dosegata nekoliko boljše ujemanje rezultatov modela z meritvami. Haithova enačba upošteva funkcijo eksponentnega

kopičenja in spiranja, ki sledi določenim fizikalnim zakonitostim, zato je v primerjavi z alternativno enačbo USGS, ki nastopa v modelu SWAT in temelji zgolj na empirično določenih regresijskih koeficientih, očitno bolj univerzalna in zato bolj primerna za obravnavani primer.

Preglednica 5: Ocena napovedne sposobnosti štirih testnih modelov kakovosti voda na podlagi primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev, posebej za sediment, celotni dušik in celotni fosfor.

Table 5: Assessment of the ability of the four water quality models under study to predict sediment and total nitrogen and total phosphorus loads, based on a 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 preglednice 5 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 3). Ker je dušik zelo mobilni element, vezan na dinamiko površinskega in baznega odtoka, je vpliv rezultatov hidrološkega modela na uspešnost napovedovanja obremenitev z dušikom pričakovan.

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 naj bi se fosfor v okolju prednostno premikal adsorbiran na delcih sedimenta in da vsi modeli dosegajo razmeroma slabo ujemanje z merjenimi količinami suspendiranega sedimenta, bi pričakovali slabšo uspešnost napovedovanja celotnega fosforja.

Na podlagi 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 (tj. model 4). Rezultati modela so prikazani na sliki 8, v preglednici 6 pa so podani razponi vrednosti posameznih konstant in njihove umerjene vrednosti.

Umerjanje parametrov izbranih modelov kakovosti voda je temeljilo na evidentiranih obremenitvah vodotoka s sedimentom in hranili. Ob tem je treba opozoriti, da so bile obremenitve s suspendiranim sedimentom, celotnim dušikom in celotnim fosforjem na lokaciji iztoka iz porečja izračunane 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.

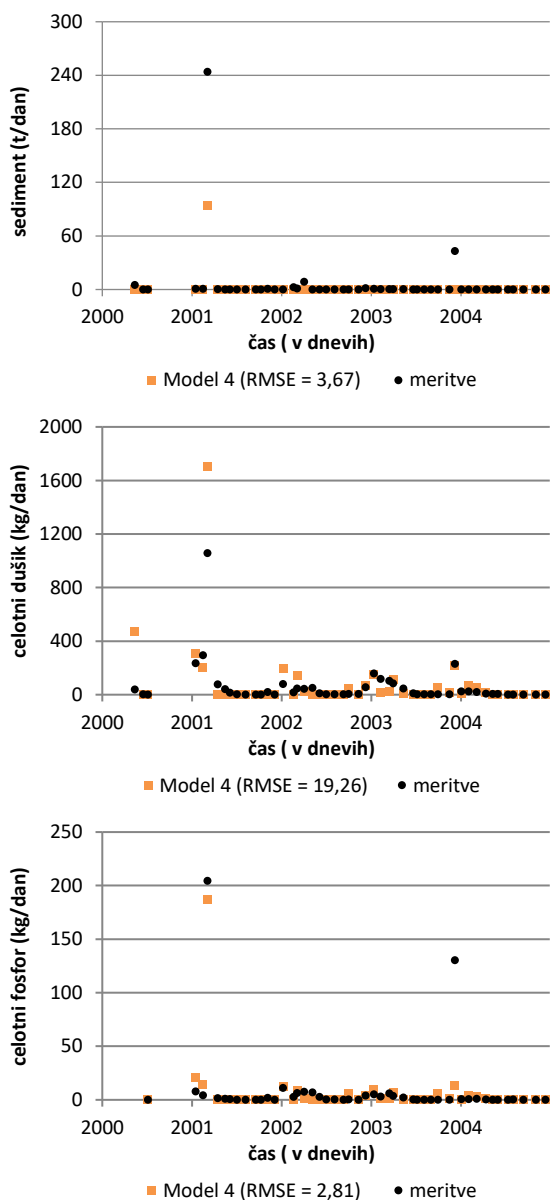
Iz primerjave merjenih in simuliranih obremenitev s suspendiranim sedimentom je razvidno pomanjkanje variabilnosti v podatkih, uporabljenih za umerjanje, in posledično tudi v rezultatih modela (slika 8). Razloge za pomanjkanje dinamike gre iskati v tem, da je bila večina meritev koncentracij suspendiranega sedimenta izvedena pri nizkih povprečnih dnevniških pretokih. Primerjava izračunanih in merjenih dnevniških obremenitev s hranili pokaže, da model sledi dinamiki letnih časov, pri čemer je količina hranil v reki Quarteiri v mokrih mesecih višja kot v suhih.

Za validacijo je bila uporabljena nova datoteka z vhodnimi podatki, in sicer za obdobje med letoma 2009 in 2010. Struktura konceptualnega modela je ostala nespremenjena.

Rezultati validacije so prikazani na sliki 9. Iz grafa, ki predstavlja primerjavo merjenih in izračunanih obremenitev s sedimentom (v t/dan), je razvidno, da

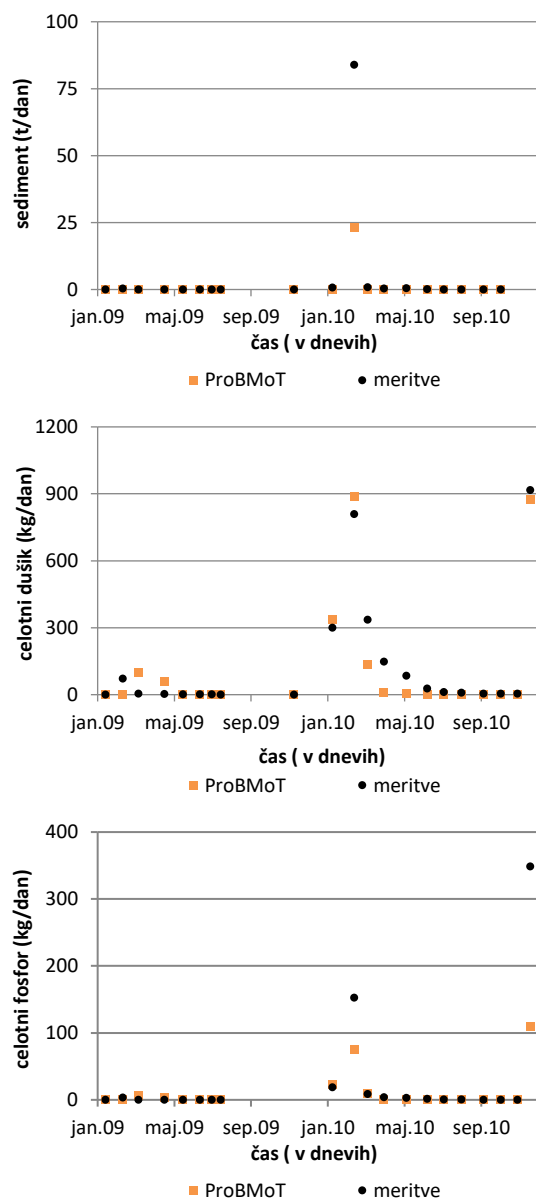
model ne ujame visoke izmerjene konice z dne 23. 2. 2010. Omenjeno neujemanje je posledica umerjanja modela na nizke izmerjene vrednosti v

obdobju med letoma 2000 in 2004, z občutnim pomanjkanjem variabilnosti v podatkih.



Slika 8: Primerjava rezultatov modela kakovosti v dnevni obremenitvi s: a) suspendiranim sedimentom, b) celotnim dušikom in c) celotnim fosforjem, izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, v obdobju 2000–2004.

Figure 8: Comparison between the water quality model results and the daily loads of a) suspended sediments, b) total nitrogen, and c) total phosphorus, measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2000–2004.



Slika 9: Primerjava rezultatov validacije in dnevni obremenitvi s: a) suspendiranim sedimentom, b) celotnim dušikom in c) celotnim fosforjem, izmerjenih na postaji Ponte Rodoviária, v obdobju 2009–2010.

Figure 9: Comparison between the validation results and the daily loads of a) suspended sediments, b) total nitrogen, and c) total phosphorus, measured at the Ponte Rodoviária station, for the period 2009–2010.

Preglednica 6: Umerjene vrednosti konstant najboljšega modela kakovosti voda in uporabljeni razponi vrednosti (v oklepajih).

Table 6: Calibrated constant values of the best water quality model and the ranges used (in brackets).

Konstanta	Podrazdelki					Enota
	sub1.urban	sub1.rural	sub1.natural	sub2.rural	sub2.natural	
K	0,038 (0,038–0,048)	0,038 (0,038–0,048)	0,038 (0,038–0,048)	0,047 (0,038–0,048)	0,040 (0,038–0,048)	(t·ha·h)/ (ha·MJ·mm)
C	0 -	0,04 (0,04–0,3)	0,002 (0,002–0,06)	0,08 (0,04–0,3)	0,06 (0,002–0,06)	-
P	1 -	0,35 (0,25–0,5)	0,91 (0,9–1)	0,49 (0,25–0,5)	0,98 (0,9–1)	-
C _{sr_N}	0,3 (0,1–0,3)	0,29 (0,1–0,4)	0,05 (0,05–0,2)	0,19 (0,1–0,4)	0,09 (0,05–0,2)	mg/l
C _{sr_P}	0,047 (0,01–0,07)	0,05 (0,05–0,08)	0,014 (0,01–0,04)	0,062 (0,05–0,08)	0,014 (0,01–0,4)	mg/l
C _{gw_N}	0,4 (0,1–0,4)	0,64 (0,5–0,7)	0,12 (0,1–0,4)	0,7 (0,5–0,7)	0,24 (0,1–0,4)	mg/l
C _{gw_P}	0,02 (0,01–0,04)	0,039 (0,02–0,06)	0,017 (0,01–0,03)	0,02 (0,02–0,06)	0,018 (0,01–0,03)	mg/l
C _{soil_N}	-	575 (500–700)	408 (400–600)	570 (500–700)	507 (400–600)	g/t
C _{soil_P}	-	254 (150–450)	100 (100–150)	195 (150–450)	149 (100–150)	g/t
ER _N	-	3 (1–3)	2,14 (1–3)	1,45 (1–3)	2,55 (1–3)	-
ER _P	-	1 (1–3)	1,04 (1–3)	2,08 (1–3)	2,46 (1–3)	-
n _{acc_N}	0,053 (0,045–0,056)	-	-	-	-	kg/(ha·dan)
n _{acc_P}	0,006 (0,0045–0,0067)	-	-	-	-	kg/(ha·dan)

Iz primerjave izračunanih in merjenih dnevni 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. 3. 2010, ko je bilo omenjeno neujemanje največje, je pokazala, da je bil dejanski izmerjeni povprečni dnevni pretok (4,95 m³/s) za 24,4 % višji od simuliranega (3,74 m³/s), kar pomeni, da izbrani hidrološki model podceni količino površinskega in/ali baznega odtoka. Posledično je bila nižja tudi izračunana dnevna obremenitev s celotnim dušikom.

Slika 9 prikazuje tudi primerjavo izračunanih in merjenih dnevni 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 sovpadata s podcenjeno obremenitvijo vodotoka s suspendiranim sedimentom.

Na osnovi izbranega modela kakovosti voda, modela 4, je bila izračunana še povprečna letna obremenitev reke Quarteire s sedimentom (517 t/leto oz. 0,02 t/(ha·leto)), celotnim dušikom (22.583 kg/leto oz. 0,75 kg/(ha·leto)) in celotnim fosforjem (1.861 kg/leto oz. 0,06 kg/(ha·leto)). Razvidno je, da je povprečna letna obremenitev s sedimentom razmeroma majhna, kar 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, 2008), je manjša obremenitev vodotoka s suspendiranim sedimentom pričakovana.

Analiziran je bil tudi prispevek različnih rab zemljišč k obremenitvi reke Quarteire s celotnim dušikom in celotnim fosforjem. Največ dušika in fosforja na letnem nivoju prispevajo kmetijske površine (80 oz. 71 %). Sledi prispevek z urbanih površin (17 oz. 23 %) in površin z naravnim pokrovom (3 oz. 6 %). Površine na območju depresije Nave do Barão k obremenitvi reke Quarteire s celotnim dušikom in fosforjem prispevajo manj kot en odstotek.

Na območju kmetijskih površin k obremenitvi s celotnim dušikom in fosforjem največ prispeva bazni odtok (88 oz. 72 %). Nekoliko manj k skupni obremenitvi površinskih voda s hranili prispevata površinski odtok (8 oz. 19 %) in spiranje delcev s površja (4 oz. 7 %). 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 z dušikom in fosforjem prevladuje tudi na območju naravnih površin, le da je tu v primerjavi s kmetijskimi površinami nekoliko manjši (57 oz. 49 %), na račun povečanja prispevkov površinskega odtoka (24 oz. 37 %) in spiranja delcev s površja (18 oz. 13 %). 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.

Urbane površine niso bile posebej analizirane, ker tam z 99 % prevladuje prispevek spiranja delcev s površja.

Pričakovali bi, da se fosfor premika predvsem adsorbiran na delcih sedimenta. Vseeno pa rezultati modela pokažejo, da spiranje delcev s površja k obremenitvi s celotnim fosforjem prispeva le 7 % (na območju kmetijskih površin) oz. 13 % (na

območju naravnih površin). Veliko večja sta prispevka baznega in površinskega odtoka, kar pojasni boljše ujemanje rezultatov modela z meritvami celotnega fosforja napram slabšemu ujemanju rezultatov modela z meritvami suspendiranega sedimenta.

Za suspendirani sediment, dušik in fosfor je konkretno oceno (tj. odstopanje med izmerjeno in izračunano obremenitvijo v suhih in mokrih mesecih) težje podati, ker se meritve kakovosti v obravnavanem porečju izvajajo le enkrat mesečno in je zato težko določiti dejansko mesečno/letno obremenitev.

7. Zaključki

V prispevku sta predstavljena dva dosežka, ki imata lahko pomemben vpliv na nadaljnji razvoj področja matematičnega modeliranja okoljskih procesov v porečjih. Prvi je domenska knjižnica, ki v kombinaciji z orodjem ProBMoT omogoča avtomatsko generiranje modelov porečij. Predstavljeni pristop drugim raziskovalcem omogoča, da hitreje in bolj enostavno razvijejo matematične modele za svoje potrebe.

Drugi pomembni dosežek so modeli, generirani za izbrani testni primer, pri čemer je bila kombinacija domenske knjižnice in orodja ProBMoT uporabljena za avtomatsko generiranje različnih struktur in umerjanje hidrološkega modela ter za umerjanje štirih izbranih struktur modela kakovosti voda. Najboljši strukturi hidrološkega modela in modela kakovosti voda sta bili izbrani na podlagi izvednotene napake RMSE, primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev za oceno napovedne uspešnosti modelov ter interpretacije rezultatov in umerjenih vrednosti parametrov. Z obema modeloma je bila ujeta sezonska dinamika 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 ugotovitve predhodnih raziskav, vezanih na porečje reke Quarteire in preučevanje procesov, ki se odvijajo na ravni porečij.

Rezultati umerjenega hidrološkega modela so bili primerjani z rezultati modela SWAT, ki je znan predvsem po svoji kompleksnosti in velikem številu uporabljenih parametrov. Iz primerjave vrednosti izbranih statističnih kriterijev je razvidno, da oba modela dosejata primerljivo uspešnost napovedovanja pretokov. Primerjava sezonskega ujemanja rezultatov obeh hidroloških modelov s povprečnimi pretoki, izmerjenimi na iztoku iz izbranega porečja, govori v prid modelu ProBMoT. Z bistveno enostavnejšim modelom so bili torej doseženi primerljivi (in v določenih pogledih celo boljši) rezultati.

V raziskavi je bilo ugotovljeno tudi to, da uporaba fiksne strukture modela, kot jo ponujajo že uveljavljena orodja za hidrološko modeliranje in modeliranje kakovosti voda na ravni porečij, ni vedno najbolj optimalna in da lahko s kombiniranjem različnih matematičnih izrazov dosežemo boljše rezultate.

Zahvala

Raziskava je potekala v sklopu doktorske naloge, ki jo je finančno podprla Javna agencija za tehnološki razvoj Republike Slovenije, po pogodbi št. P-MR-08/23.

Viri

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

Arnold, J.G., Fohrer, N. (2005). SWAT2000, current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrol. Process.* **19**(3), 563–572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>.

Atanasova, N., Todorovski, L., Džeroski, S., Kompore, B. (2006). Constructing a library of domain knowledge for automated modelling of aquatic ecosystems. *Ecol. Modell.* **194**(1-3), 14–36. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.10.002>.

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

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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.06.001>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.03.006>.

de Kok, J.-L., Engelen, G., Maes, J. (2015). Reusability of model components for environmental simulation – Case studies for integrated coastal zone management. *Environ. Model. Softw.* **68**, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.001>.

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*. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, U.S., 44 str. https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2363/pdf/wsp_2363.pdf (Pridobljeno 27. 1. 2022.)

Džeroski, S., Todorovski, L. (2003). Learning population dynamics models from data and domain knowledge. *Ecol. Model.* **170**, 129–140. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00221-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00221-7).

Haith, D.A., Mandel, R., Shyan Wu, R. (1992). *GWLF – Generalized Watershed Loading Functions. Version 2.0. User's manual*. Cornell University, Department of Agricultural & Biological Engineering, Ithaca, NY, 62 str.

Hamon, W.R. (1961). Estimating Potential Evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* **87**(3), 107–120. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000599>.

Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., Riley, J.P. (1985). Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. Drain Eng.* **111**(2), 113–124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1985\)111:2\(113\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:2(113)).

Jiang, J., Zhu, A.-X., Qin, C.-Z., Liu, J. (2019). A knowledge-based method for the automatic determination of hydrological model structures. *J. Hydroinformatics* **21**(6), 1163–1178. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.029>.

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 modeling: a vision and roadmap for the future. *Environ. Model. Softw.* **39**, 3–23. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.006>.
- 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. <https://doi.org/10.1002/hyp.344>.
- Liu, J., Zhu, A. X., Qin, C. Z., Wu, H. & Jiang, J. (2016). A two-level parallelization method for distributed hydrological models. *Environ. Modell. Softw.* **80**, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.032>.
- Mirsal, I.A. (2008). *Soil Pollution. Origin, Monitoring & Remediation. 2nd Edition*. Springer, Berlin, Heidelberg: 312 str.
- Monod, J. (1949). The Growth of Bacterial Culture. *Annu. Rev. Microbiol.* **3**, 371–394. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>.
- 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**(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- 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. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55*. USDA, Washington, DC, 164 str. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENT/S/stelprdb1044171.pdf (Pridobljeno 27. 1. 2022.).
- Radinja, M., Škerjanec, M., Džeroski, S., Todorovski, L., Atanasova, N. (2021a). Design and Simulation of Stormwater Control Measures Using Automated Modeling. *Water* **13**, 2268. <https://doi.org/10.3390/w13162268>.
- Radinja, M., Škerjanec, M., Šraj, M., Džeroski, S., Todorovski, L., Atanasova, N. (2021b). Automated modelling of urban runoff based on domain knowledge and equation discovery. *J. Hydrol.* **603**, 127077. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127077>.
- Rao, L.Y., Sun, G., Ford, C.R., Vose, J.M. (2011). Modelling potential evapotranspiration of two forested watersheds in the southern Appalachians. *Trans. ASABE* **54**(6), 2067–2078. <https://doi.org/10.13031/2013.40666>.
- Schwarz, G.E., Hoos, A.B., Alexander, R.B., Smith, R.A. (2006). *The SPARROW Surface Water Quality Model – Theory, Application and User Documentation*. USGS, Reston, VA, 248 str. <http://pubs.usgs.gov/tm/2006/tm6b3/PDF.htm> (Pridobljeno 27. 1. 2022.).
- Simidjievski, N., Todorovski, L., Kocijan, J., Džeroski, S., (2020). Equation discovery for nonlinear system identification. *IEEE Access* **8**, 29930–29943. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972076>.
- Storn, R., Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *J. Global Optim.* **11**, 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>.
- Sohel, S.I. (2012). Ecohydrological Modelling of a Mediterranean Catchment (Quarteira, Portugal) using SWAT: Model Setup, Calibration and Validation. Magistrsko delo. Kiel University, Department of Hydrology and Water Resources Management, 66 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. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1185-2009>.
- Škerjanec, M. (2014). Avtomatizirano modeliranje pri celostnem upravljanju z vodnimi viri. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 132 str.
- Škerjanec, M., Atanasova, N., Čerepnalkoski, D., Džeroski, S., Kompare, B., (2014). Development of a knowledge library for automated watershed modeling. *Environ. Model. Softw.* **54**, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.017>.
- Tanevski, J., Todorovski, L., Džeroski, S., (2016). Process-based design of dynamical biological systems. *Sci. Rep.* **6**, 34107. <https://doi.org/10.1038/srep34107>.
- Todorovski, L., Bridewell, W., Shiran, O., Langley, P. (2005). Inducing hierarchical process models in dynamic domains. Proceedings of the 20th National Conference on Artificial Intelligence, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 892–897.
- 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. <https://doi.org/10.13031/2013.15643>.
- Wang, L., Wang, Z., Liu, C., Bai, P. & Liu, X. (2018). A flexible framework hydroInformatic modeling system –

HIMS. *Water* **10(7)**, 962.
<https://doi.org/10.3390/w10070962>.

Whelan, G., Kim, K., Pelton, M.A., Castleton, K.J., Laniak, G.F., Wolfe, K., Parmar, R., Babendreier, J., Galvin, M. (2014). Design of a component-based integrated environmental modeling framework. *Environ. Model. Softw.* **55**, 1–24.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.016>.

Williams, J.R. (1995). The EPIC model. V: Singh, V.P. (ur.), *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 909–1000.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. USDA, Washington, DC, 58 str.

Yapo, P.O., Gupta, H.V., Sorooshian, S. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *J. Hydrol.* **181(1-4)**, 23–48. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02918-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02918-4).