

# Ekspertni sistem za podporo odločanju na aluvialnih telesih podzemnih voda Slovenije

## An expert system as a support to the decision making process for groundwater management of alluvial groundwater bodies in Slovenia

Petra SOUVENT<sup>1</sup>, Goran VIŽINTIN<sup>2</sup>, Sašo CELARC<sup>3</sup> & Barbara ČENČUR CURK<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: petra.souvent@gov.si

<sup>2</sup>Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, NTF, UL, Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: goran.vizintin@guest.arnes.si

<sup>3</sup>BRON d.o.o., Litostrojska 44, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: saso@bron.si

<sup>4</sup>Oddelek za geologijo, NTF, UL, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: barbara.cencur@geo.ntf.uni-lj.si

Prejeto / Received 7. 10. 2014; Sprejeto / Accepted 24. 11. 2014

*Ključne besede:* upravljanje z vodami, vodne pravice, podzemne vode, aluvialni vodonosniki, numerični modeli toka podzemne vode

*Key words:* water management, water rights, groundwater, alluvial aquifers, numerical models of groundwater flow, Slovenia

### Izvleček

Ekspertni sistem za podporo odločanju pri upravljanju s podzemnimi vodami na aluvialnih vodonosnikih povezuje numerične modele toka podzemne vode s podatkovnima zbirkama vodnih dovoljenj in koncesij, kar omogoča ocenjevanje izdatnosti vodonosnikov in zagotavljanje trajnostnega upravljanja podzemne vode. Samostojni numerični modeli toka podzemne vode pa se uporabljajo tudi pri oceni količinskega stanja podzemnih voda in pri spremljavi izdatnosti lokalnih vodnih virov v obdobju največjih potreb po vodi in najmanjšega količinskega obnavljanja podzemne vode.

### Abstract

The expert decision support system for groundwater management in the shallow alluvial aquifers links numerical groundwater flow models with the water permits and concessions databases in order to help groundwater managers to quantify sustainable yield for a given groundwater body and provide additional information for sustainable groundwater management. Stand alone numerical groundwater models are used in the process of the assessment of groundwater quantitative status as well as for assessing local yield quantity during the period of maximum water demand and minimum groundwater recharge.

### Uvod

Agencija RS za okolje izvaja projekt Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji, znanega pod akronimom **BOBER** - **B**oljše **O**pazovanje za **B**oljše **E**kološke **R**ešitve (SIRC, 2009; VOGRINČIČ et al., 2010). Projekt BOBER je del evropskega Operativnega programa za razvoj okoljske in prometne infrastrukture v obdobju 2007–2013. V okviru projekta BOBER smo izvedli tudi projekt »Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvialnih telesih podzemnih voda Slovenije«.

Upravljanje podzemnih vodnih virov ter spremljanje in ocenjevanje stanja podzemnih vod zahteva dobro razumevanje vodonosnih sistemov in procesov za optimalno rabo ob zadostitvi ekoloških potreb mokrišč, izvirov in rek ter ohranjanju kakovosti površinskih in podzemnih

voda. Ekspertni sistem in modeli podzemnih vod podpirajo integracijo, validiacijo in kvantifikacijo hidrogeoloških informacij, ki so potrebne za razvoj strategij trajnostne rabe podzemnih vodnih virov.

Ekspertni sistem za podporo odločanju na aluvialnih vodonosnikih tako povezuje numerične modele toka podzemne vode s podatkovnima zbirkama vodnih dovoljenj in koncesij, upravljavcu pa pomaga pri oceni vodnih količin na danem vodnem telesu oziroma mu nudi dodatno informacijo o modelski izhodiščni količini podzemne vode za potrebe izdaje vodnih pravic, ki jih po zakonu o vodah (URADNI LIST RS, 2008), predstavljajo vodna dovoljenja in koncesije. Samostojni modeli toka podzemne vode se uporabljajo tudi kot pomoč pri oceni količinskega stanja podzemnih voda oziroma spremljanju količin vodnih virov v določenem časovnem obdobju. Zgrajenih je šest regionalnih

modelov toka podzemne vode na območjih vodnih teles podzemnih voda: Mursko in Dolinsko Ravensko polje, Dravsko in Ptujsko polje, Spodnje Savinjsko polje, Krško polje, Kranjsko in Sorško polje ter Ljubljansko polje.

Pomemben cilj projekta je bil vzpostavitev hidrogeoloških modelov toka podzemnih voda na količinsko najbolj obremenjenih vodnih telesih podzemnih voda in zagotoviti kontrolne mehanizme, s katerimi se preverja podeljevanje vodnih pravic za njihovo trajnostno upravljanje. Ti mehanizmi omogočajo, da se Vodna knjiga, ki je zbirka računalniških aplikacij z registrom zaprošenih in podeljenih vodnih pravic, na čim bolj enostaven način poveže z ekspertnim sistemom in se s tem pridobi informacijo o izdatnosti vodonosnikov in o izhodiščni količinski shemi upravljanja ter o sovplivih načrtovanih odvzemov z bližnjimi že obstoječimi vodnimi pravicami. Definirani kontrolni mehanizmi upoštevajo tehnologijo, s katero sta izdelani aplikaciji Vodna dovoljenja in Koncesije.

### Ekspertno numerični sistem (ENS)

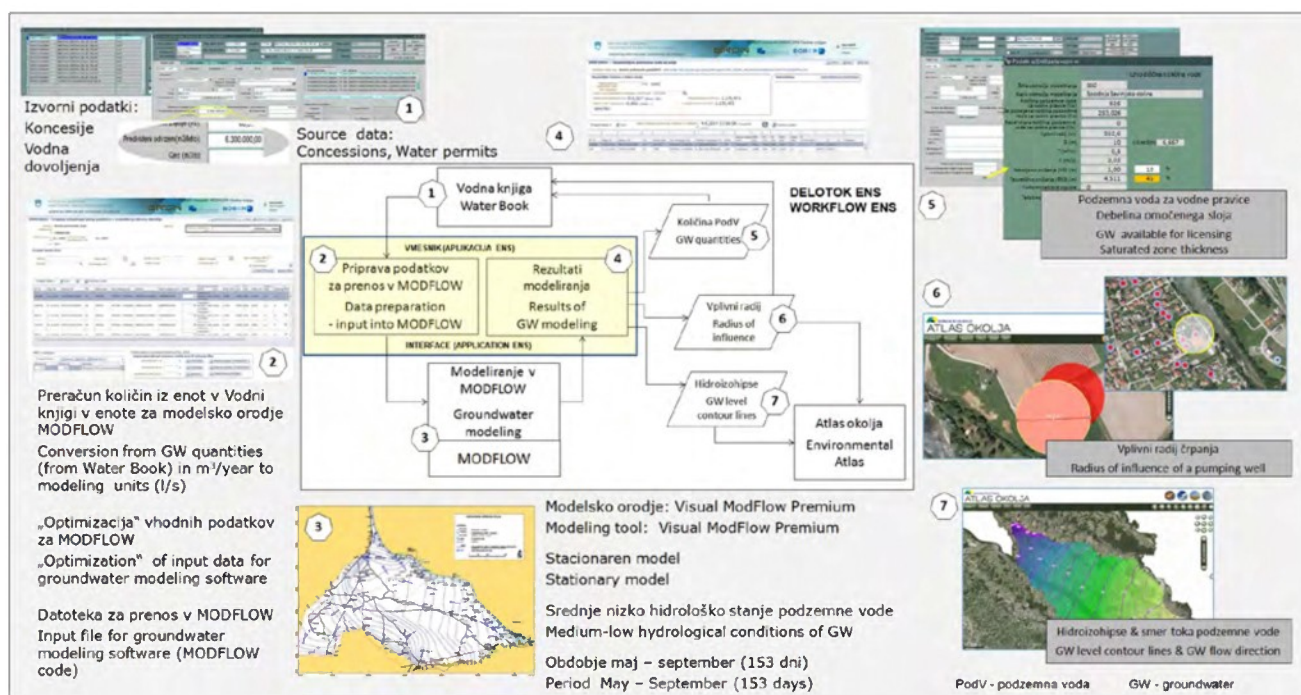
Izdelan **Ekspertno Numerični Sistem (ENS)** omogoča uporabo podatkov vodnih pravic (letni maksimalni odvzem podzemne vode v m<sup>3</sup> ali maksimalni trenutni odvzem v l/s) iz aplikacij Vodna dovoljenja in Koncesije (Vodna knjiga) in zagotavlja mehanizem za kontrolo znižanja gladine podzemne vode na izbrani lokaciji ter mehanizem za kontrolo poseganja v vplivno območje črpanja. Kriteriji odločanja so vgrajeni v prikazovalnik prostorskih podatkov - Atlas

okolja. ENS tako omogoča medsebojno izmenjavo podatkov med aplikacijami: Vodna knjiga, Atlas okolja in VisualModFlow (sl. 1) (CELARC et al., 2014a).

V ekspertno numeričnem sistemu se najprej izvede inicialni prenos podatkov iz Vodne knjige (sl. 1, korak 1) v ENS vmesnik, temu sledi pregled in urejanje količinskih podatkov (sl. 1, korak 2), ter prenos v modelsko okolje MODFLOW (sl. 1, korak 3). Model toka podzemne vode umerimo s podatki o količini podzemne vode iz vodnih pravic in določimo izdatnost določenega aluvialnega vodonosnika. Modelski rezultati se prenesejo nazaj v ENS vmesnik (sl. 1, korak 4) in nato v Vodno knjigo ter na prikazovalnik prostorskih podatkov Atlas okolja (sl. 1, koraki 5, 6, 7).

Končni rezultati celotnega ekspertno numeričnega sistema so (VIŽINTIN et al., 2012, PETAUER et al., 2014a; PETAUER et al., 2014b; VIŽINTIN et al., 2014a, VIŽINTIN et al., 2014b, VIŽINTIN et al., 2014c):

- za vsak obravnavan aluvialni vodonosnik je opredeljena množica vodnih dovoljenj in koncesij, ki se po določenih kriterijih prenesejo v model MODFLOW in upoštevajo pri modeliranju,
- definirani so parametri za preračun podatkov o podeljenih vodnih pravicah iz Vodne knjige v enote, ki jih upošteva numerični model MODFLOW,
- vzpostavljeni in umerjeni so numerični modeli toka podzemne vode, ki dajejo optimalne rezultate glede na upoštevane podatke vodnih dovoljenj in koncesij,



Sl. 1. Delotok ekspertno numeričnega sistema za podporo odločanju pri upravljanju podzemnih voda (glej razlago posameznih oštevilčenih korakov v tekstu).

Fig. 1. Workflow of the expert decision support system for groundwater management (explanation of particular steps in the text).

- podan je predlog izhodiščne količinske sheme podzemne vode v vodonosniku s srednje nizkim hidrološkim stanjem, ki lahko predstavlja eno od upravljalških izhodišč za politiko podeljevanja vodnih pravic,
- definirani so parametri za izračun vplivnega radija posameznega odjemalca, ki so rezultat umerjanja modela in
- pripravljen je mehanizem za spremljanje podeljevanja pravic za rabo podzmenne vode in spremljanje vplivnih radijev ob podeljevanju novih vodnih pravic.

### Tehnična infrastruktura ENS

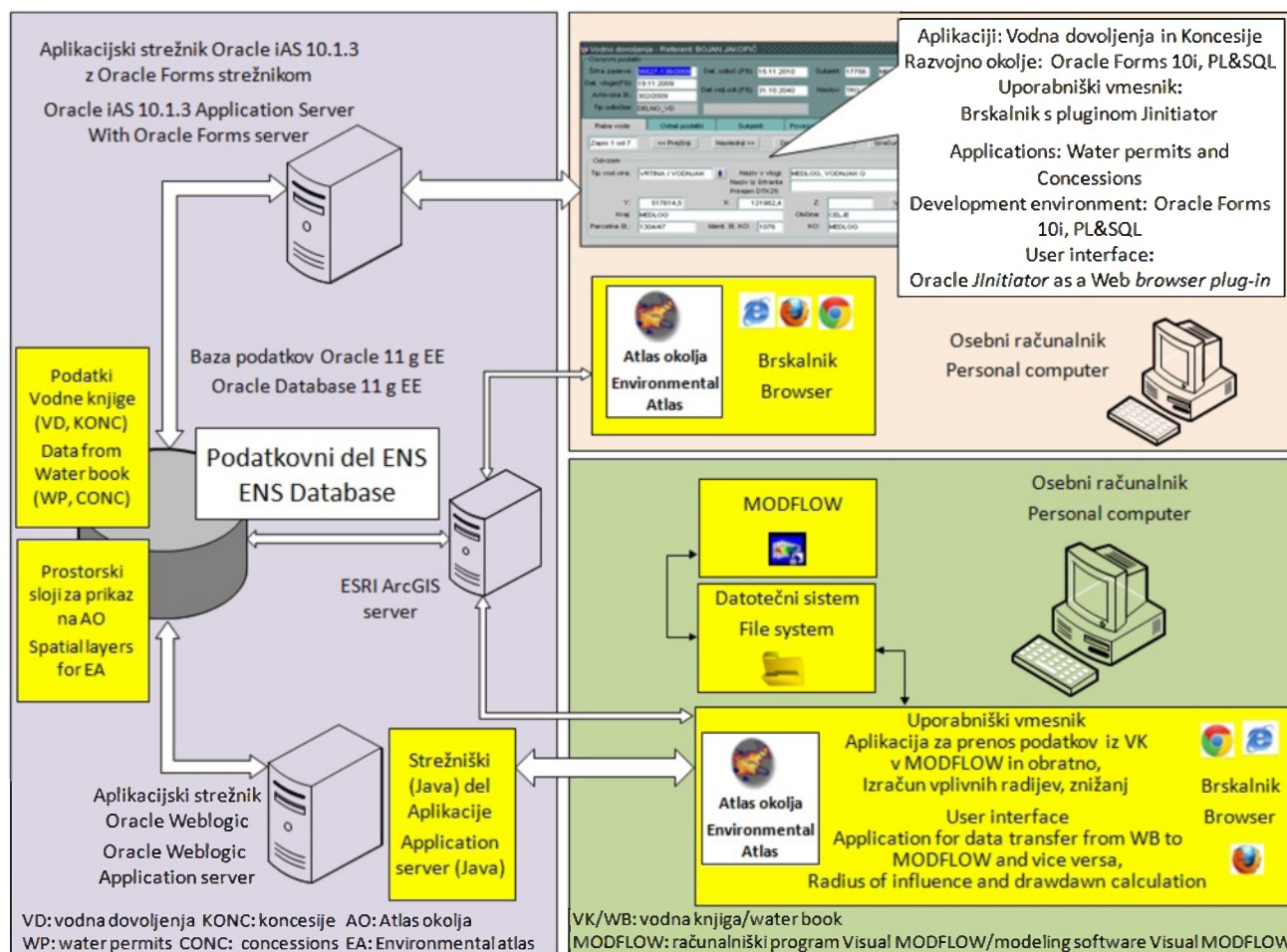
Gradniki tehnične infrastrukture okolja ENS so (sl. 2) (CELARC et al., 2014b):

- Podatkovna zbirka (Oracle DB 11g Enterprise Edition), kjer so shranjeni vsi podatki, kot so Vodna knjiga, podatki ENS za prenos podatkov iz Vodne knjige v MODFLOW in obratno, izračun vplivnih radijev, znižanja gladin podzemne vode in podatki za prikaz na Atlasu okolja ter prostorski sloji za prikaz na Atlasu okolja.
- Aplikacijski strežnik (Oracle IAS 10.1.3) s Forms strežnikom, kjer tečeta aplikaciji Vodna dovoljenja in Koncesije.

- Obstoječe aplikacije Vodna dovoljenja in Koncesije so izdelane v razvojnem okolju Oracle Forms in programskem jeziku PL/SQL. Izvajajo se v uporabniškem vmesniku brskalniku preko plugin-a Jinitiator.
- Aplikacijski strežnik (Oracle WebLogic 10.3.5) z Oracle ADF 11g izvajalnim okoljem, ki predstavlja strežniški del Aplikacije izdelan v okolju Oracle ADF 11g.
- Uporabniški vmesnik ENS.
- Programsko orodje za numerično modeliranje toka podzemne vode (koda MODFLOW).
- Vmesnik med Aplikacijo in sistemom MODFLOW je datotečni sistem, preko katerega se izvažajo in uvažajo datoteke.
- Za prostorski prikaz se uporablja Atlas okolja. Strežniški del Atlasa okolja teče na ESRI ArcGis strežniku, uporabniški del pa v brskalniku.
- Prostorski podatki so shranjeni v formatu Oracle Spatial.

### Hidrogeološki numerični modeli toka podzemne vode v oviru ENS

Regionalni hidrogeološki numerični modeli toka podzemne vode so vzpostavljeni znotraj območij vodnih teles podzemnih voda na: Murskem in



Sl. 2. Tehnična infrastruktura ekspertno numeričnega sistema za podporo odločanju pri upravljanju podzemnih voda.

Fig. 2. Technical infrastructure of the expert decision support system for groundwater management.

Dolinsko Ravenskem polju, Dravskem in Ptujskem polju, Spodnje Savinjski dolini, Krškem polju (sl. 3), Kranjskem in Sorškem polju ter na Ljubljanskem polju. Za postavitev numeričnih modelov toka podzemne vode so ključni kakovostni in prostorsko razporejeni hidrološki in hidrogeološki podatki.

Za vse večje aluvialne vodonosnike v Sloveniji je bil vzpostavljen enotni pristop izdelave konceptualnega modela. Za vsak vodonosnik se je določilo kritično hidrološko obdobje, ki je najbolj problematično s stališča iskoriščanja podzemne vode, hidrogeološke enote, robne pogoje modelov, začetne vrednosti nivojev v modelu in režim toka podzemne vode. Poleg tega se je s pomočjo vodnobilančnega modela GROWA-SI ocenilo vodno bilanco zaledja posameznega vodonosnika.

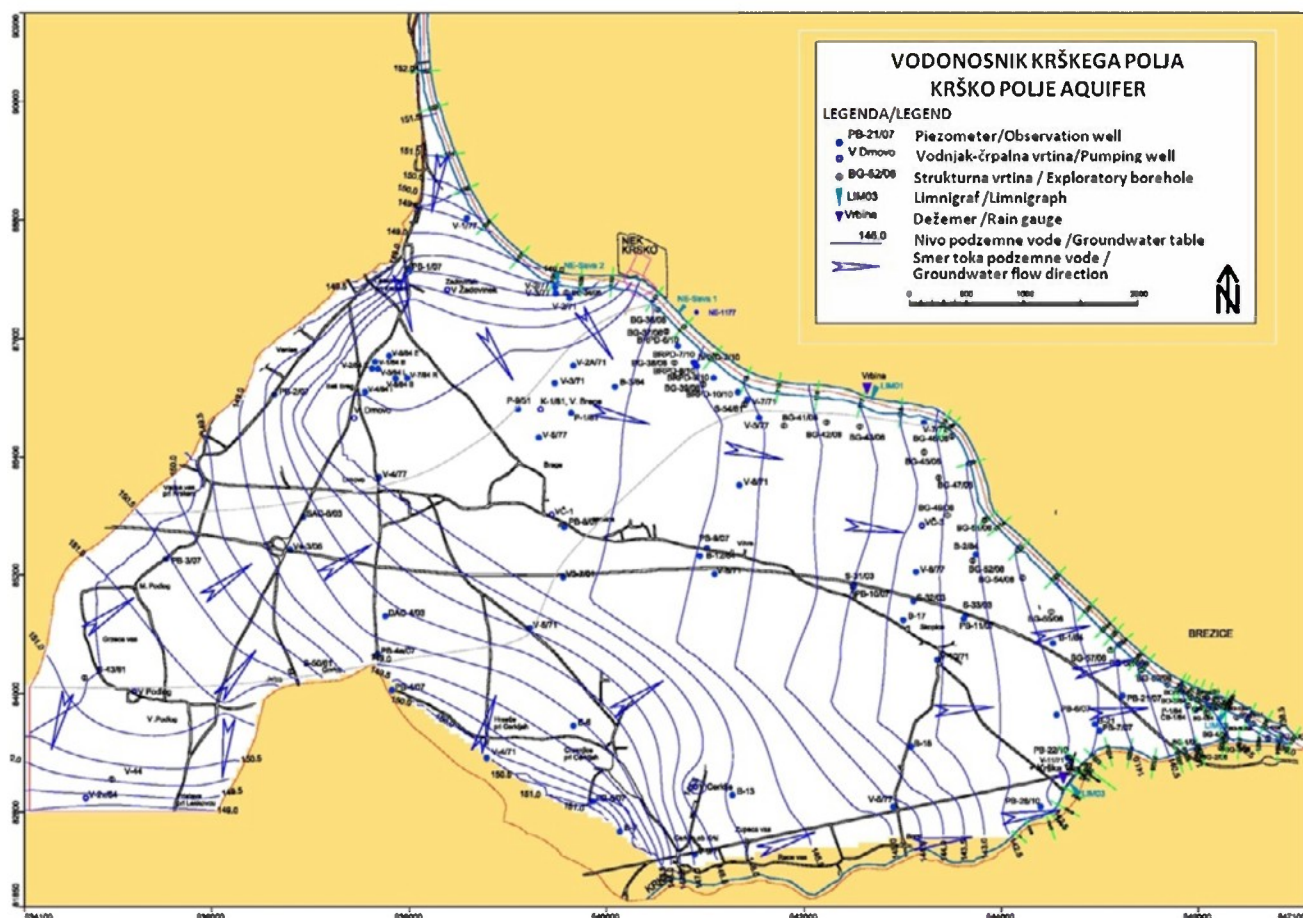
Kritično hidrološko obdobje je tisto obdobje leta, ko so pritiski uporabnikov na črpanje podzemne vode največji in ko je sposobnost obnavljanja aluvijalnega vodonosnika najmanjša. Na osnovi analize se je ugotovilo, da je kritično obdobje med majem in septembrom (153 dni).

Modeli so izdelani za stacionarni režim podzemne vode in so umerjeni na srednje nizke hidrološke razmere v kritičnem obdobju danega leta.

### Sistem ENS kot podpora odločanju pri podeljevanju vodnih pravic

Z vpeljavo ENS je omogočeno sprotno spremljanje količin podzemne vode za podeljevanje pravic in morebitne medsebojne vplive med različnimi porabniki podzemne vode. Tako imajo uporabniki sistema ob vnosu vodnih dovoljenj in koncesij v svojih obstoječih aplikacijah vpogled v naslednje podatkovne informacije:

- izhodiščno količino podzemne vode za vodne pravice za posamezni aluvialni vodonosnik (modelsko območje),
- količino podzemne vode, ki je že odobrena (in porabljena) z veljavnimi vodnimi dovoljenji in koncesijami,
- količino podzemne vode, ki bo potencialno porabljena s strani novih prosilcev za vodno pravico (vloge v reševanju),
- izhodiščno količinsko shemo upravljanja z upoštevanjem količin, ki so že podeljene in pa tistih, ki so še v reševanju,
- seznam tistih prosilcev, ki imajo vloge v reševanju in bodo ob potencialni izdaji dovoljenja odvzemali podzemno vodo,
- vplivne radije obstoječih odvzemov in vlog, ki so v reševanju,



Sl. 3. Primer numeričnega modela toka podzemne vode: gladine podzemne vode vodonosnika Krškega polja po umeritvi modela na nizke hidrološke razmere.

Fig. 3. An example of numerical groundwater model: groundwater levels for Krško polje aquifer after calibration of the model to a medium-low hydrological field conditions.

- s črpalnim poskusom izmerjeno znižanje gladine podzemne vode na dani novi lokaciji (podatek iz hidrogeološkega poročila, ki je priloga vlogi za vodno pravico) in
- sistem opozoril, ko odvzemi dosegajo ali presegajo izhodiščno količino podzemne vode za vodne pravice.

Drevo odločanja (sl. 4), ki se opira na rezultate ekspertno numeričnega sistema, upravljavcu pomaga pri sprejemanju odločitev v postopku podeljevanja vodne pravice za črpanje podzemne vode.

Sistem odločanja je postavljen ob zasledovanju petih načel, ki so upoštevana v drevesu odločanja:

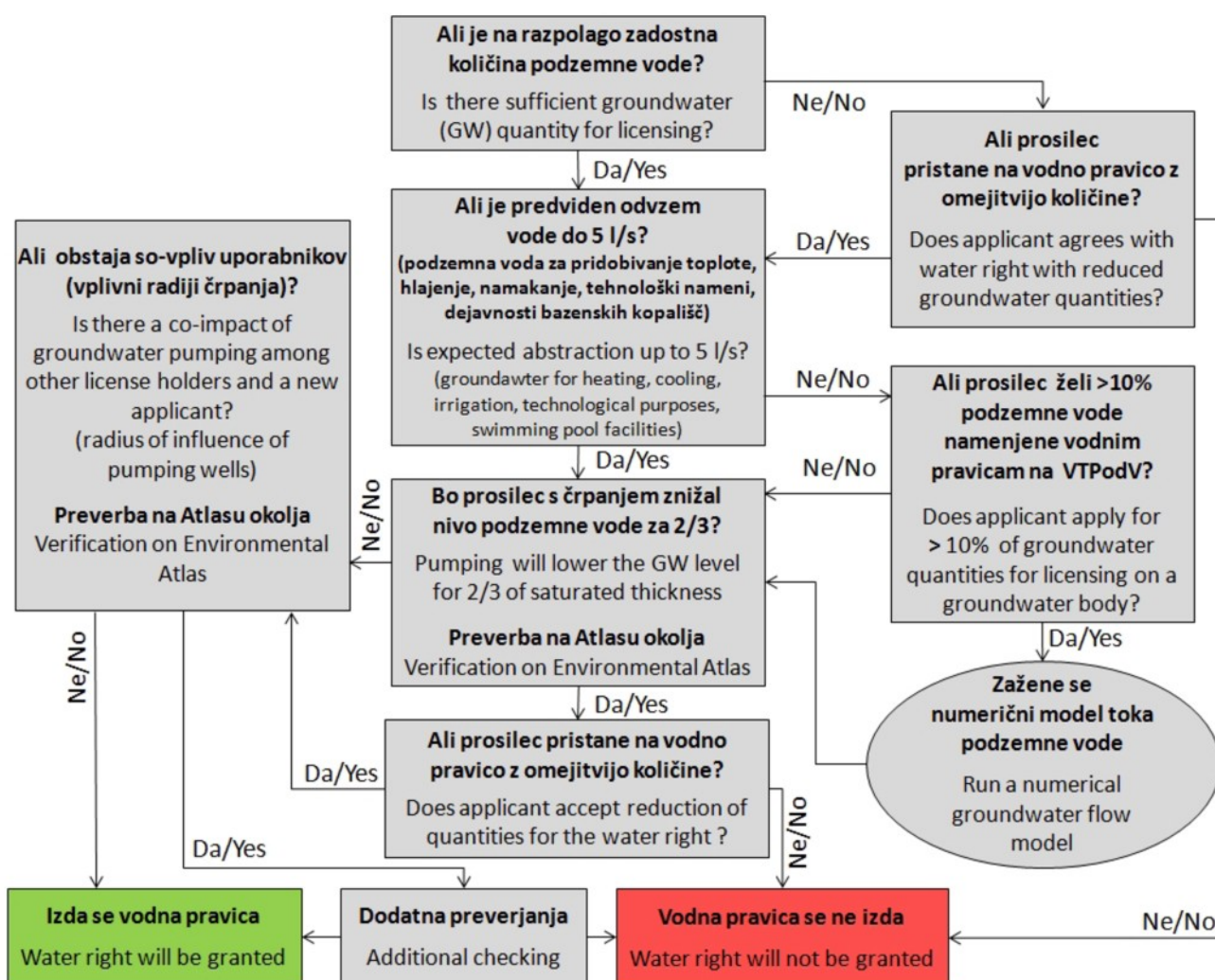
1. Načelo trajnostne rabe podzemne vode in s tem ohranjanja dobrega količinskega stanja podzemne vode (*Ali je na razpolago zadostna količina podzemne vode?*)
2. Načelo upoštevanja dosedanjih kriterijev podeljevanja vodne pravice z možnostjo dodatne modelske simulacije (*Kolikšen je predviden odvzem podzemne vode?*)
3. Načelo neovirane rabe podzemne vode (*Ali obstaja so-vpliv uporabnikov?*)

4. Načelo preprečitve lokalne količinske preobremenjenosti vodonosnika (*Ali bo črpanje povzročilo znižanje gladine podzemne vode za več kot 2/3 omočenega dela vodonosnika?*)
5. Načelo sodelovanja stranke v postopku pridobitve vodne pravice (*Ali prosilec soglaša z vodno pravico z omejitvijo količine?*)

V primeru, da se pri procesu odločanja podeljevanja vodne pravice ugotovi, da se s črpanjem podzemne vode v novem vodnjaku vpliva na že obstoječega imetnika vodne pravice, je v drevesu odločanja (sl. 4) predvideno dodatno preverjanje (dodatne raziskave in analize).

## Zaključek

Predstavljeni ekspertno numerični sistem (ENS) je orodje za podporo trajnostnemu upravljanju podzemnih voda pri odločanju o vodnih pravicah za odvzem podzemne vode. V procesu odločanja v okviru ENS je upravljavcu omogočena uporaba dodatnih informacij, vendar ga v nobenem koraku ne omejuje pri odločanju. Podatki, ki so uporabljeni v ENS, temeljijo na numeričnih modelih toka podzemne vode za



Sl. 4. Drevo odločanja v procesu podeljevanja vodne pravice za črpanje podzemne vode  
Fig. 4. The decision tree for the process of granting groundwater rights.

posamezen aluvialni vodonosnik (izhodiščna količinska shema upravljanja podzemne vode, prostorski prikaz hidroizohips in smeri toka, ocena vplivnih radijev črpanja), ki predstavljajo modelsko okolje za simuliranje učinkov novih odvzemov podzemne vode. Zaradi navedenega so numerični modeli toka podzemne vode pomembni pri trajnostnem upravljanju podzemne vode.

### Zahvala

Projekt Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji, znanega pod akronimom BOBER (Boljše Opazovanje za Boljše Ekološke Rešitve), je bil del evropskega Operativnega programa za razvoj okoljske in prometne infrastrukture v obdobju 2007–2013. Kohezijski sklad Evropske unije je prispeval 85 %, slovenski državni proračun pa 15 % vrednosti projekta. Avtorji članka se zahvaljujemo vsem članom projektne skupine za izvedbo projekta (HGEM d.o.o.: Ivan Supovec, Martin Tancar, GEORAZ d.o.o.: Darko Petauer, Tadej Hiti, FGG: prof. dr. Mitja Brilly, mag. Andrej Vidmar) in članom delovne skupine za spremljanje in svetovanje s strani naročnika Agencije RS za okolje (dr. Jože Uhan, dr. Mišo Andjelov, Urša Pavlič).

### Literatura in viri

- CELARC, S., VIŽINTIN, G. & ČENČUR CURK, B. 2014a: Izdelava modelskih orodij za spremljanje suše, ocenjevanje stanja podzemnih voda in prognoziranje dinamike morja, 3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije, Mejnik 8/1, Poročilo P4B, Priloga 3: Uporabniška dokumentacija-Podatkovni del ENS, BRON d.o.o., 53 str., arhiv ARSO, Ljubljana.
- CELARC, S., VIŽINTIN, G. & ČENČUR CURK, B. 2014b: Izdelava modelskih orodij za spremljanje suše, ocenjevanje stanja podzemnih voda in prognoziranje dinamike morja, 3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije, Mejnik 8/1, Poročilo P4B, Priloga 4: Tehnična dokumentacija-Podatkovni del ENS, BRON d.o.o., 31 str., arhiv ARSO, Ljubljana.
- PETAUER, D., HITI, T., VIŽINTIN, G. & ČENČUR CURK, B. 2014a: Izdelava modelskih orodij za spremljanje suše, ocenjevanje stanja podzemnih voda in prognoziranje dinamike morja, 3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije, Mejnik 8/1, Poročilo P4B: Izvedba nadgradnje numeričnega modela toka podzemne vode za Ljubljansko polje za ekspertno numerični sistem, Končno poročilo, GEORAZ d.o.o., 32 str., arhiv ARSO, Ljubljana.
- PETAUER, D., HITI, T., VIŽINTIN, G. & ČENČUR CURK, B. 2014b: Izdelava modelskih orodij za spremljanje suše, ocenjevanje stanja podzemnih voda in prognoziranje dinamike morja, 3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije, Mejnik 8/1, Poročilo P4B: Izvedba nadgradnje numeričnega modela toka podzemne vode za Krško polje za ekspertno numerični sistem, Končno poročilo, GEORAZ d.o.o., 31 str., arhiv ARSO, Ljubljana.
- SIRC, P. 2009: študija izvedljivosti za projekt: Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji, 325 str., ARSO, Ljubljana.
- URADNI LIST RS 2008: Zakon o vodah. Uradni list Republike Slovenije, 67/02, 110/02 – ZGO-1, 2/04 in 4/04 – ZVO-1, 57/2008.
- VIŽINTIN, G., SUPOVEC, I., TANCAR, M., CELARC, S. & ČENČUR CURK, B. 2012: Izdelava modelskih orodij za spremljanje suše, ocenjevanje stanja podzemnih voda in prognoziranje dinamike morja, 3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije, Mejnik 8/1, Poročilo P4B: Izvedba nadgradnje numeričnega modela toka podzemne vode za Spodnje Savinjsko dolino za ekspertno numerični sistem, Končno poročilo, NTF, 27 str., arhiv ARSO, Ljubljana.
- VIŽINTIN, G., BRILLY, M., VIDMAR, A. & ČENČUR CURK, B. 2014a: Izdelava modelskih orodij za spremljanje suše, ocenjevanje stanja podzemnih voda in prognoziranje dinamike morja, 3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije, Mejnik 8/1, Poročilo P4B: Izvedba nadgradnje numeričnega modela toka podzemne vode za Dravsko in Ptujsko polje za ekspertno numerični sistem, Končno poročilo, NTF, 27 str., arhiv ARSO, Ljubljana.
- VIŽINTIN, G., SUPOVEC, I., TANCAR, M., CELARC, S. & ČENČUR CURK, B. 2014b: Izdelava modelskih orodij za spremljanje suše, ocenjevanje stanja podzemnih voda in prognoziranje dinamike morja, 3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije, Mejnik 8/1, Poročilo P4B: Izvedba nadgradnje numeričnega modela toka podzemne vode za Mursko in Prekmursko polje za ekspertno numerični sistem, Končno poročilo, NTF, 28 str., Ljubljana.
- VIŽINTIN, G., SUPOVEC, I., TANCAR, M. & ČENČUR CURK, B. 2014c: Izdelava modelskih orodij za spremljanje suše, ocenjevanje stanja podzemnih voda in prognoziranje dinamike morja, 3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije, Mejnik 8/1, Poročilo P4B: Izvedba nadgradnje numeričnega modela toka podzemne vode za Kranjsko in Sorško polje za ekspertno numerični sistem, Končno poročilo, NTF, 29 str., Ljubljana.
- VOGRINČIČ, V., KOČEVAR, H., GREGORČIČ, B. & ROŠKAR, J. (uredniki) 2010: Predstavitev projekta »Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji«, MOP-Agencija RS za okolje, 31 str., Ljubljana.