



Primerjava rezultatov modeliranja vsebnosti nitrata v vodi pod koreninskim območjem tal v lokalnem in regionalnem merilu

Comparison of the modeling results of nitrate concentrations in soil water below the root zone in the local and regional scale

Jože UHAN & Mišo ANDJELOV

Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: joze.uhan@gov.si

Prejeto / Received 15. 6. 2018; Sprejeto / Accepted 11. 11. 2018; Objavljeno na spletu / Published online 20. 12. 2018

Ključne besede: podzemna voda, nitrat, tla, aluvialni vodonosnik, Spodnje Savinjska dolina

Key words: groundwater, nitrate, soil, alluvial aquifer, Spodnje Savinjska dolina

Izvleček

Na raziskovalnem območju plitvega aluvialnega vodonosnika Spodnje Savinjske doline v osrednjem delu Slovenije, predstavljamo primerjalno analizo rezultatov modeliranja vsebnosti nitrata v vodi pod koreninskim območjem tal, v lokalnem in regionalnem merilu z enodimenzijskim modelom DNDC (ang. Denitrification – Decomposition) in z regionalnim modelom GROWA–DENUZ (nem. Großräumiges wasserhaushalt – Denitrifikation im durchwurzelten Boden). Ob uporabi koncepta hidroloških enot HRU (ang. Hydrological Response Unit) in Cohenove Kappa statistične analize ujemanja ter ocenjevanja zanesljivosti rezultatov prostorskega modeliranja nitrata v vodi pod koreninskim območjem tal smo ugotovili in interpretirali predele največjega ujemanja in razhajanja modelskih rezultatov. Dobro ujemanje je bilo ugotovljeno pri najvišjih modeliranih vrednostih, odstopanja pa so bila zaznana predvsem v nižjem delu razpona modeliranih vrednosti nitrata v vodi. Vzroke odstopanja lahko domnevno iščemo predvsem v razlikah pri ocenah denitrifikacijskih pogojev v anaerobnih pogojih hipoglejev in psevdoglejev s podzemno vodo plitvo pod tlemi in v razlikah pri scenarijih gnojenja ter kmetijske prakse.

Abstract

The article presents a comparative analysis of the modeling results of nitrate concentrations in water below the root zone of the soil in the local and regional scale. In this research, the field-scale DNDC (Denitrification – Decomposition) and the regional-scale GROWA–DENUZ (ger. Großräumiges wasserhaushalt – Denitrifikation im durchwurzelten Boden) models were applied to the study area of the shallow aluvial aquifer of the Spodnje Savinjska dolina in the central part of Slovenia. Using the concept of Hydrological Response Unit (HRU) and Cohen Kappa statistical analysis of the degree of agreement and assessment of the reliability of the results of spatial modeling of nitrate in soil water below the root zone, we determined and interpreted the areas of maximum agreement and disagreement of model results. A good agreement was found at the highest modeled concentrations of nitrate in soil water, whereas the greatest deviations were detected primarily in the lower part of the range. The main reasons for disagreement were differences in the estimation of the denitrification conditions in the anaerobic environments of gley-soils with the shallow groundwater and differences in fertilisation scenarios and agricultural practices.

Uvod

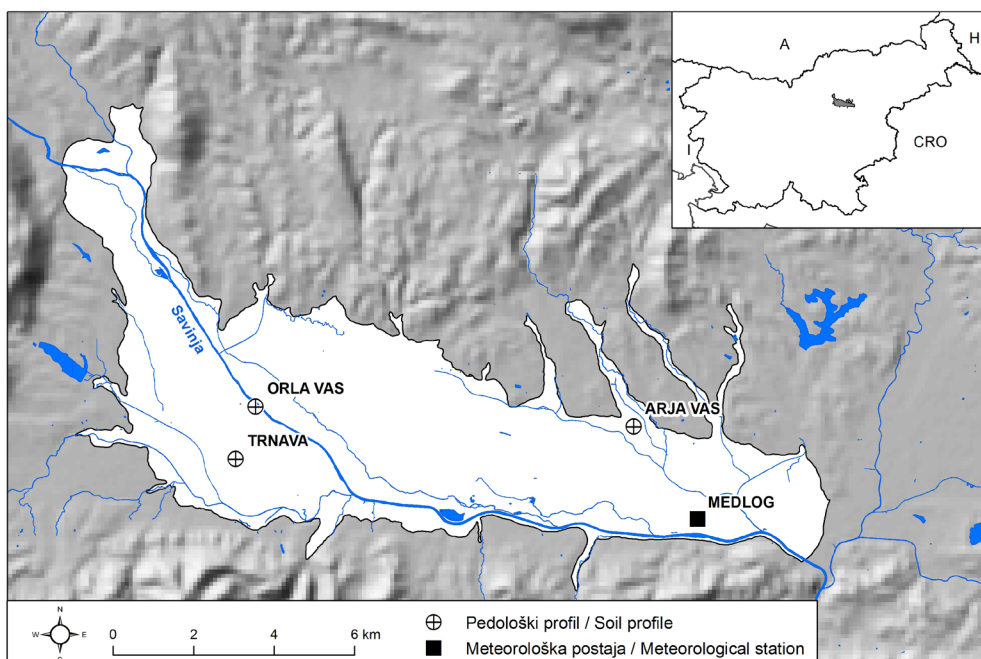
Vsebnost nitrata v podzemni vodi predstavlja resno grožnjo okolju na regionalni in lokalni ravni (Kurkowiak, 2017). Tudi ocene kemijskega stanja podzemnih voda, kot jo zahteva okvirna direktiva o vodah (Direktiva 2000/60/ES), v načrtih upravljanja voda Slovenije že desetletje izpostavljajo več vodnih teles, kjer vsebnost nitrata

v podzemni vodi presega mejno vrednost (MOP, 2011, 2016). Vzroke najpogostejše povezujemo s pomanjkljivo komunalno urejenostjo in intenzivnim kmetovanjem ob uporabi manj primernih kmetijskih praks. Obe področji se urejata v okvirih, ki jih predpisujeta evropski direktivi o čiščenju komunalne odpadne vode (Direktiva 91/271/EGS) in direktiva o varstvu voda pred onesnaževanjem

z nitrati iz kmetijskih virov (Direktiva 91/676/EGS). Poročevalske sheme terjajo tudi strokovno argumentirane ocene učinkov načrtovanih ukrepov in napoved časovnic izboljšanja kemijskega stanja voda s skrajnim časovnim mejnikom 2027, ko naj bi dosegli zastavljene cilje dobrega stanja voda (Matoz et al., 2016). Agencija Republike Slovenije za okolje je v sodelovanju z nemškim raziskovalnim središčem JÜLICH za območje celotne Slovenije prilagodila modelski sistem GROWA-DENUZ/WEKU (Kunkel & Wendland, 2006; Wendland et al., 2008), ki poleg bilance vode upošteva bilanco dušika ter modelira tok dušika preko tal in vodonosnika v površinska vodna telesa. Za prvo oceno zanesljivosti rezultatov tega kompleksnega modelskega sistema smo na območju plitvega aluvialnega vodonosnika Spodnje Savinjske doline s podzemno vodo v slabem kemijskem stanju izdelali primerjalno analizo rezultatov regionalnega modeliranja toka dušika preko koreninskega območja tal GROWA-DENUZ (Kunkel & Wendland, 2006; Andjelov et al., 2014, 2015) in rezultatov lokalnega modela toka dušika iz koreninskega območja tal DNDC (Li et al., 1992) v posameznih talnih profilih. Zanimala nas je stopnja ujemanja modelskih rezultatov v lokalnem in regionalnem merilu v izbranem letu 2008, ko so bile opravljene tudi obsežne terenske meritve, laboratorijske analize in študijske raziskave (Uhan, 2011), ter primernost uporabe modelskega sistema GROWA-DENUZ/WEKU za potrebe simuliranja učinkov ukrepov v smeri izboljšanja kemijskega stanja podzemnih voda.

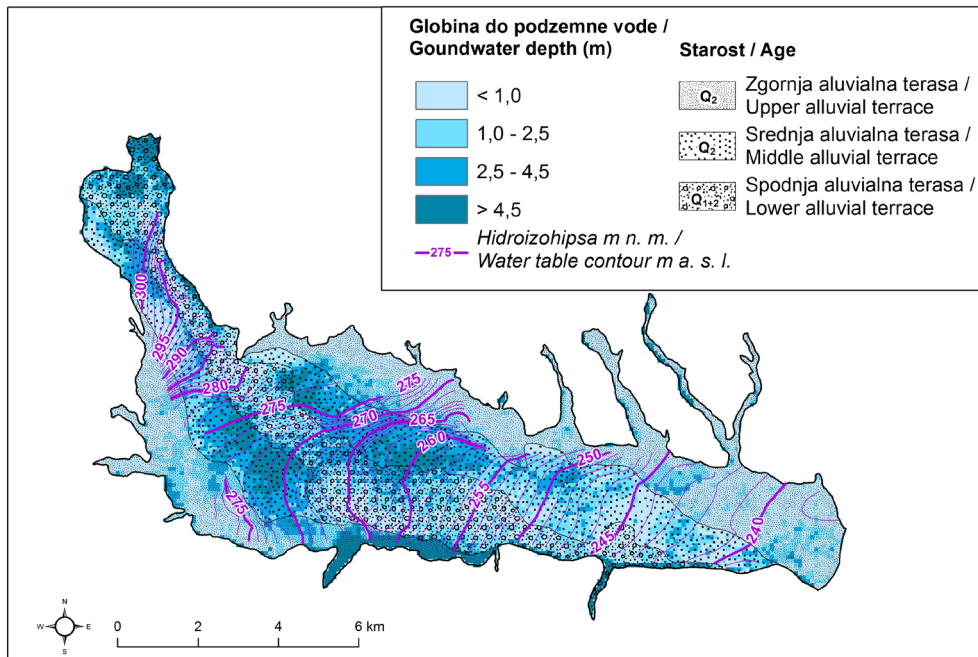
Raziskovalno območje

Raziskovalno območje obsega 73,5 km² velik aluvialni vodonosnik Spodnje Savinjske doline (sl. 1) s tremi izrazitimi nivoji aluvialnih teras v holocenskih in pleistocenskih peščeno-prodnih rečnih naplavinah (sl. 2). Zanj so značilne obsežne kmetijske obdelovalne površine: travniki (24 %), njive in vrtovi (33 %) ter hmeljišča (15 %), urbaniziranih površin je okoli 19 % (MKGP, 2007) (sl. 3). V primerjalno analizo rezultatov modeliranja vsebnosti nitrata pod koreninskim območjem tal so vključene le kmetijske površine. Plitva tla so pretežno rjava evtrična (41 %) in obrečna (25 %), predvsem v obrobni delih pa so prisotni hipogleji in psevdogleji (21 %) (MKGP, 2007) (sl. 4). Debelina tal reprezentativnih profilov omenjenih talnih enot v Trnavi, Orli vasi in Arji vasi je v razponu od 50 do 64 cm (Zupan et al., 2008), globina koreninjenja pa v posameznih primerih presega omenjeno debelino tal (Andjelov et al., 2016a). Globina do podzemne vode je po podatkih državnega monitoringa Agencije Republike Slovenije za okolje v razponu od 0,7 do 7,5 m, s povprečjem 2,4 m in standardnim odklonom gladine podzemne vode 2,0 m (sl. 2). Aluvialni vodonosnik z medzrnsko poroznostjo pleistocenskih in holocenskih peščenih in prodnatih sedimentov s povprečno 21.450.000 m³ obdobjno razpoložljivih količin podzemne vode (Uhan, 2015), zagotavlja pomembne vodne vire regionalne oskrbe, sicer zahtevnim varovanjem in zagotavljanjem standardov pitne vode.



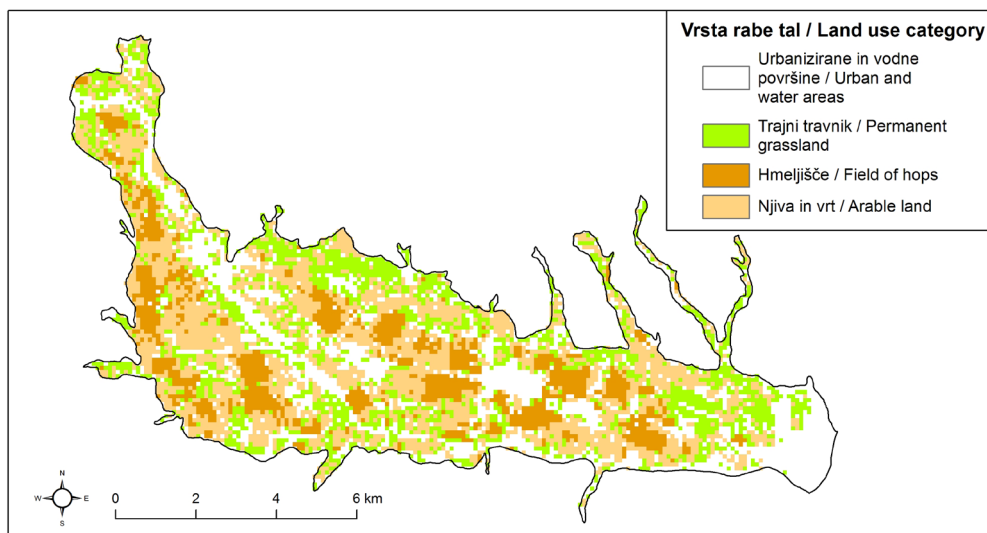
Sl. 1. Študijsko območje Spodnje Savinjske doline.

Fig. 1. Study area of Spodnje Savinjska dolina.



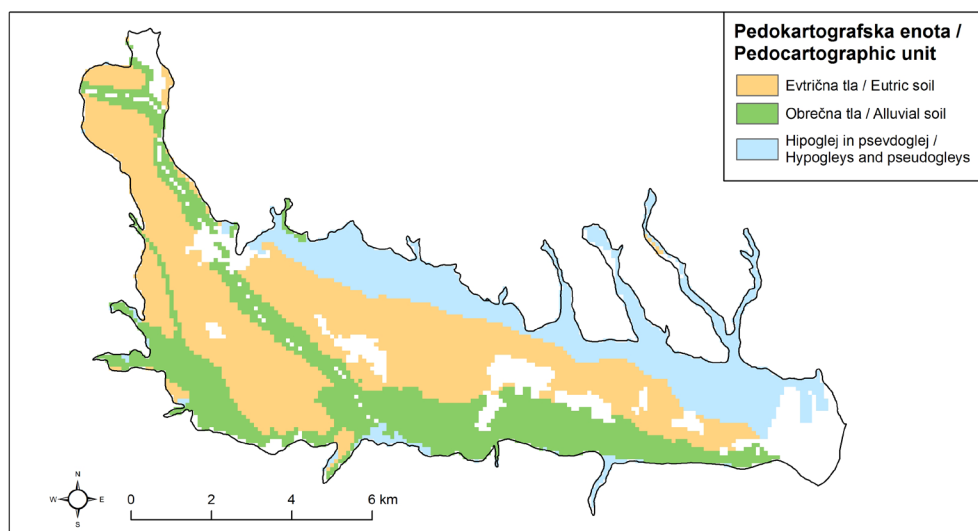
Sl. 2. Hidrogeološka karta Spodnje Savinjske doline (Viri podatkov: Uhan, 2011; Souvent et al., 2014).

Fig. 2. Hydrogeological map of Spodnje Savinjska dolina (Data sources: Uhan, 2011; Souvent et al., 2014).



Sl. 3. Raba prostora (Vir podatkov: MKGP, 2007).

Fig. 3. Land use (Data source: MKGP, 2007).



Sl. 4. Vrsta tal (Vir podatkov: MKGP, 2007; Vidic et al., 2015).

Fig. 4. Soil types (Data source: MKGP, 2007; Vidic et al., 2015).

Podatki

Podatki za regionalno modeliranje toka nitrata preko koreninskega območja tal, so črpani iz uradnih nacionalnih podatkovnih zbir ministrstev, agencij, uprav, zavodov, inštitutov in fakultet ter nekaterih mednarodnih inštitucij (Tabela 1). Merila in ločljivosti prostorskih podatkovnih slojev so različna: merila kart so v razponu od 1: 25.000 do 1: 250.000, ločljivosti prostorskih rastrov pa so od 100 × 100 metrov do 50 × 50 kilometrov. Osnovne vhodne podatke za model GROWA-DENUZ so predstavljali podatki o neto bilanci dušika v kmetijstvu (Sušin et al., 2015) na ravni grafične enote rabe kmetijskega gospodarstva GERK, ki jih zbirajo na Agenciji Republike Slovenije za kmetijske trge in razvoj podeželja. Podatki o staležu goveda so vzeti iz zbirke GOVEDO, ki jo vodijo na Kmetijskem inštitutu Slovenije. Atmosferski nanos pa je bil na kmetijskih območjih Slovenije za potrebe regionalnega modeliranja ocenjen na podlagi podatkovne zbirke EMAP (EEA, 2002).

Lokalno modeliranje toka nitratov preko reprezentativnih profilov tal pa je podatkovno temeljilo predvsem na podatkih iz zbirke pedoloških profilov Centra za pedologijo in varstvo okolja Biotehniške fakultete (Zupan et al., 2008), na podatkih iz smernic za strokovno utemeljeno gnojenje (Mihelič et al., 2010), na razpoložljivih modelskih podatkovnih knjižnicah o fiziologiji izbranih rastlin (Li, 2009) in na zbirkah meteoroloških podatkov Agencije Republike Slovenije za okolje.

Primerjalna analiza vključuje obdobje hidrološkega leta 2008, ko so bile na območju vodonosnika Spodnje Savinjske doline opravljene tudi obsežne študijske raziskave (Uhan, 2011). Hidrološko leto 2008 se po količinskem obnavljanju podzemne vode uvršča med zmerno vodnate s +18 % odstopanjem od obdobjnega povprečja 1981-2010 (Uhan, 2015).

Tabela 1. Podatkovne zbirke za modeliranje toka nitratov v Spodnje Savinjski dolini z modeloma GROWA-DENUZ in DNDC.
Table 1. Databases for nitrogen flux modelling in Spodnje Savinjska dolina with GROWA-DENUZ and DNDC model.

Model GROWA-DENUZ			
Vrsta podatkov / Type of data	Podatkovna zbirka / Database	Merilo za vektorski podatek ali prostorska ločljivost za rasterski podatek / Scale for vector data or spatial resolution for raster data	Vir podatkov / Data source
Klimatski podatki (1971-2000) / Climate data (1971-2000)	Padavine (maj - oktober), padavine (november - april), potencialna evapotranspiracija / Precipitation (May - October), precipitation (November - April), potential evapotranspiration	100 × 100 m	Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo in hidrologijo / Slovenian Environment Agency, Meteorology and Hydrology Office
Pokrovnost tal / Land cover	Vrsta rabe tal / Land use category	1: 100.000	Zbirka podatkov CORINE / CORINE data base
Podatki o tleh / Soil data	Tipi tal, tekstura tal, efektivna poljska kapaciteta, globina koreninjenja / Soil types, soil texture, effective field capacity, rooting depth	1: 25.000	Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano; Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo; Kmetijski inštitut Slovenije / Ministry of Agriculture, Forestry and Food; University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Centre for Soil and Environment Science; Agricultural Institute of Slovenia
Podatki o površju / Relief data	Digitalni model višin / Digital elevation model	100 × 100 m	Geodetska uprava Republike Slovenije / Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia
Geološki podatki / Geological data	Geološka karta Slovenije / Geological map of Slovenia	1: 100.000	Geološki zavod Slovenije / Geological Survey of Slovenia

Hidrološki podatki / Hydrological data	Prispevna območja, dnevni pretoki (1971 - 2000) / Catchment areas, daily runoff (1971 - 2000)	1: 25.000	Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo in hidrologijo / Slovenian Environment Agency, Meteorology and Hydrology Office
Hidrografske podatki / Hydrographical data	Rečna mreža, umetno izsušena območja / River network, artificially drained areas	1: 25.000	Geodetska uprava Republike Slovenije, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano / The Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia, Ministry of Agriculture, Forestry and Food
Hidrogeološki podatki / Hydrogeological data	Hidrogeološka karta Slovenije, tipologija podzemne vode, hidroizohipse, globina do podzemne vode, hidravlična prepustnost / Hydrogeological map of Slovenia, groundwater typology, water table contours, groundwater depth, hydraulic permeability	1: 250.000 1: 100.000 1: 25.000	Geološki zavod Slovenije; Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo in hidrologijo / Geological Survey of Slovenia, Slovenian Environment Agency, Meteorology and Hydrology Office
Podatki o kakovosti voda / Water quality data	Kakovost podzemnih in površinskih voda (1995 - 2011) / Groundwater and surface water quality data (1995 - 2011)	1: 25.000	Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo in hidrologijo / Slovenian Environment Agency, Meteorology and Hydrology Office
Točkovni viri dušika / Point sources of nitrogen	Čistilne naprave komunalnih in industrijskih odpadnih voda, greznice / Municipal waste water treatment plants, industrial treatment plants, cesspools	1: 25.000	Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo in hidrologijo; Ministrstvo za okolje in prostor / Slovenian Environment Agency, Meteorology and Hydrology Office; Ministry of environment and spatial planning
Razpršeni viri dušika / Diffuse sources of nitrogen	Atmosferski nanos dušika, presežek dušika v kmetijstvu / Atmospheric N deposition, agricultural N surpluses	50 × 50 km, 100 × 100 m	European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), Kmetijski inštitut Slovenije / European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), Agricultural Institute of Slovenia
Model DNDC			
Vrsta podatkov / Type of data	Podatkovna zbirka / Data base	Vir podatkov / Data source	
Podatki o podnebnju (leto 2008) / Climate data (year 2008)	Dnevna višina padavin, dnevno povprečje temperature zraka / Daily precipitation, daily average air temperature	Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo in hidrologijo / Slovenian Environment Agency, Meteorology and Hydrology Office	
Podatki o tleh / Soil data	Talni informacijski sistem Slovenije / Soil information system of Slovenia	Univerza v Ljubljani, Biotehnična fakulteta, Center za pedologijo in varstvo okolja / University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Centre for Soil and Environment Science	
Podatki o rastlinah / Crop data	Podatki o fiziologiji in fenologiji rastlin / Crop phenology and physiology data	Knjižnica rastlin DNDC (Li, 2009) / Crop library of DNDC (Li, 2009)	
Podatki o kmetijski praksi / Agricultural management data	Podatki iz slovenskih smernic za strokovno utemeljeno gnojenje / Data from Slovene guidelines for expert based fertilization	Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (Mihelič in sod., 2010) / Ministry of Agriculture, Forestry and Food (Mihelič et al., 2010)	

Metode

Modeliranje toka nitrata v regionalnem merilu

Tok nitrata preko koreninskega območja tal je bil v regionalnem merilu v prostorski ločljivosti 100×100 metrov modeliran v okolju GROWA-DENUZ (Kunkel & Wendland, 2006; Kunkel et al., 2010), ki je temeljil na prostorskih podatkovnih slojih regionalne vodne bilance (Andjelov et al., 2016a) in neto bilance dušika v kmetijstvu (Sušin et al., 2015). Ob upoštevanju Michaelis-Mentenove kinetike (Michaelis & Menten, 1913) so bili ocenjeni denitrifikacijski pogoji kombinirani z izračunanimi presežki dušika (Sušin et al., 2015) in zadrževalnimi časi pronicanja vode v območju korenin ter predstavljeni kot funkcija povprečne poljske kapacitete in hitrosti odtoka s pronicanjem (sl. 5). Kot referenčne vrednosti so bile uporabljene ocenjene hitrosti denitrifikacije za srednjeevropske tla (Wienhaus et al., 2008). Ocene hitrosti denitrifikacije, ki so letno v razponu od okoli 10 do preko 100 kg N na hektar, temeljijo na vrsti tal in geološki podlagi ter vplivu plitve podzemne vode. Zadrževalni časi izcedne vode so v koreninskem območju tal ocenjeni preko učinkovite poljske kapacitete (Müller & Rassi, 2002; Hennings, 2000). Ocena relativne denitrifikacijske izgube v tleh temelji na razmerju med iznosom dušika iz tal po denitrifikaciji, ki jo prinaša rešitev Michaelis-Mentenove enačbe, in vnosom dušika iz razpršenih virov. Vsebnosti nitrata v izcedni vodi so v modelu GROWA-DENUZ ocenjene ob upoštevanju hitrosti pronicanja vode preko koreninskega območja tal za celotno območje Slovenije (Andjelov et al., 2016a, 2016b). Za vrednotenje rezultatov modela GROWA-DENUZ smo primerjali modelske rezultate z rezultati terenskih meritev nitrata v podzemni vodi (Uhan, 2011) in neparametrični Spermanov koeficient nakazuje korelacijo ranga 0,87 ($\alpha=0,05$).

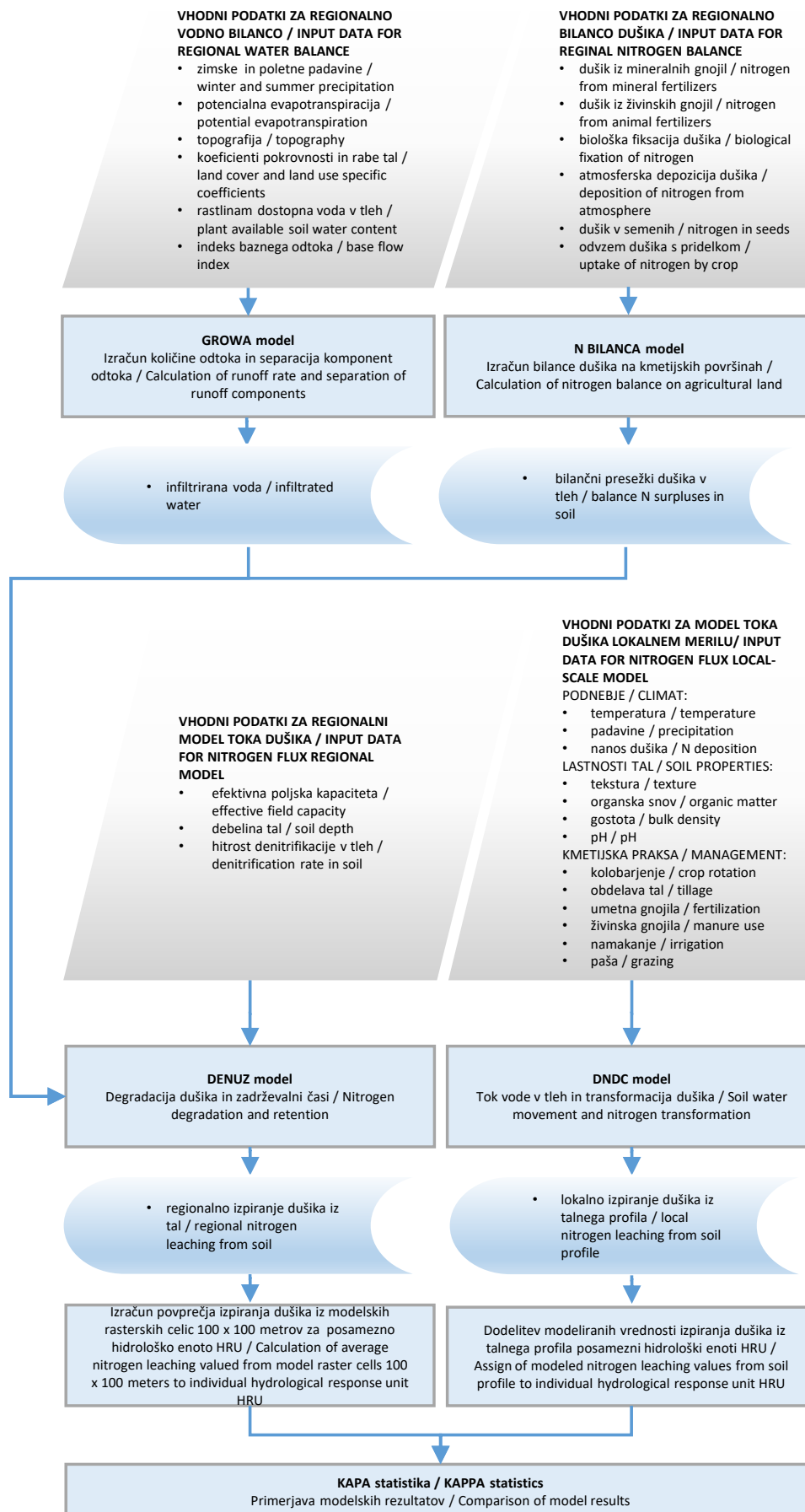
Modeliranje toka nitrata v lokalnem merilu

Za simuliranje biogeokemijskih procesov dušikovega kroga v lokalnih pogojih kmetijskih ekosistemov na plitvem vodonosniku Spodnje Savinjske doline smo na posameznih reprezentativnih profilih tal v Trnavi, Orli vasi in Arji vasi (Zupan et al., 2008) (sl. 1) uporabili enodimenzijski model DNDC (Li et al., 1992). Model omogoča povezavo med vhodnimi parametri okolja in izhodi iz dušikovega kroga tal v obliki biomase, plinov in izpiranja. Modelske procese poganjajo primarne gonilne sile v okolju, kot so procesi v ozračju, tleh in vegetaciji, ob upoštevanju kmetijske prakse oz. človekove aktivnosti (sl. 5). Mo-

del DNDC sestavljata dve osnovni komponenti, ki rešujeta enačbe klime tal z izračunom iztoka vode in enačbe biogeokemijskih procesov dušika v tleh. Prvo modelsko komponento sestavljajo trije podmodeli: klima tal, rast vegetacije in dekompozicija. V okviru te komponente je možna napoved faktorjev tal: temperatura in vlage tal, pH in oksidacijsko-redukcijskega potenciala ter vsebnosti substratov na podlagi vedenja o tleh, rastlinstvu in podnebj, ki lahko pomembno vpliva na rezultate biogeokemijskih procesov (Uhan, 2018). Druga komponenta je sestavljena iz nitrifikacijskega, denitrifikacijskega in fermentacijskega podmodela, ki omogočajo napoved emisije plinov iz sistema tla - rastline. Model predstavlja povezavo med ogljikovim in dušikovim biogeokemijskim ciklom in primarnimi gonilnimi silami ter med drugim simulira tudi količino letnega izhoda dušika iz koreninskega območja tal, ki ogroža kakovost podzemne vode tudi v zasičenem delu vodonosnika. Pri tem je pomemben proces denitrifikacije, ki se povezuje z nasičenostjo tal in pojavom anaerobnosti. Model DNDC preko Nernstove enačbe (Nernst, 1889) oceni oksidacijsko-redukcijske pogoje tal (Eh), nato pa ob upoštevanju Michaelis-Mentenove kinetike (Michaelis & Menten, 1913) simulira aktivnosti anaerobnih mehanizmov in izračuna stopnjo denitrifikacijske redukcije nitrata (Stumm & Morgan, 1981; University of New Hampshire, 2017). Analiza občutljivosti modela DNDC je z metodo Monte Carlo (Metropolis & Ulam, 1949) v primeru reprezentativnega pedološkega profila v Latkovi vasi izpostavila pomemben vpliv na izpiranje dušika predvsem s strani dveh vhodnih parametrov: hidravlične prevodnosti tal in količine uporabljenih gnojil (Uhan, 2011). Umerjanje modela oz. vrednotenje rezultatov modela DNDC je bilo izvedeno preko primerjave z merjenimi podatki poljskega poskusa v Latkovi vasi leta 2000 (Pintar et al., 2005) in neparametrični Spermanov koeficient korelacije ranga je dosegel vrednost 0,76 ($\alpha=0,05$).

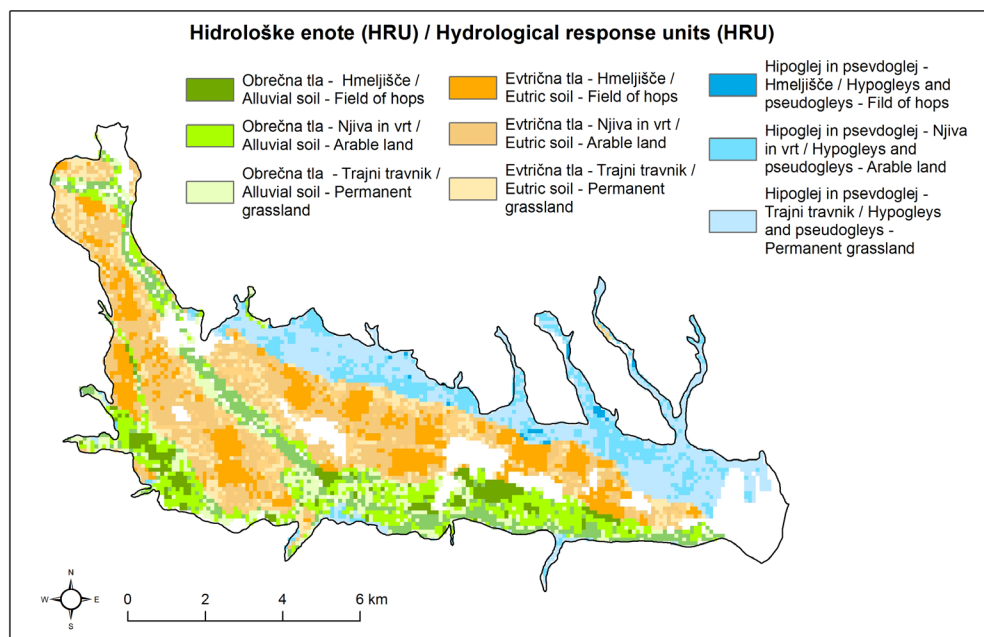
Statistična primerjalna analiza modelskih rezultatov

Primerjava rezultatov modeliranja vsebnosti nitrata v vodi pod koreninskim območjem tal v regionalnem in v lokalnem merilu je zahtevala posplošitev oz. prenos modelskih izhodnih podatkov na primerljive prostorske enote. Primerljive enote prostora, znotraj katerih naj bi bile vhodne veličine hidrološkega modela predpostavljeno homogene, so z enako vrsto tal, rabo prostora in naklonom površja definirane kot hidrološke enote HRU (angl. Hydrological Respon-



Sl. 5. Shema modelskih postopkov in primerjava modelskih rezultatov (po: Kunkel & Wendland, 2006; Salas, 2010).

Fig. 5. The scheme of model procedures and comparison of the model results (after: Kunkel & Wendland, 2006; Salas, 2010).



Sl. 6. Hidrološke enote (HRU) za določene tipe tal in rabe prostora v Spodnje Savinjski dolini.

Fig. 6. Hydrological response units (HRU) for a given soil types and land uses in Spodnje Savinjska dolina.

se Unit) (Arnold et al., 1998) (sl. 6). Prostorskim enotam z enako vrsto tal, rabo prostora in naklonom površja lahko pripišemo enake hidrološke značilnosti prostora. Hidrološkim enotam HRU študijskemu območju Spodnje Savinjske doline so bila v primeru modeliranja v regionalnem merilu izračunana prostorska povprečja letnega izpiranja dušika iz modelskih rastrskih celic 100×100 metrov, v primeru modeliranja v lokalnem merilu pa so bile hidrološkim enotam HRU pripisane vrednosti modeliranja letnega izpiranja dušika iz reprezentativnih profilov tal (sl. 3) s prevladujočimi rabami prostora (sl. 4). Statistična primerjalna analiza modelskih rezultatov je v tako pripravljenem rastrskem zapisu temeljila na matriki pravilnosti razvrščanja oz. matriki zamenjav, iz katere je izračunana mera ujemanja ali skladnosti (sl. 5). Cohenov koeficient K (kapa) pokaže stopnjo ujemanja klasifikacij dveh modelskih rezultatov oz. za koliko je ujemanje med modelskima rezultatoma boljše od naključnega ujemanja. Z izračunom koeficienta K smo opredelili delež ujemanja modelskih rezultatov, ki presega pričakovano naključje (Cohen, 1960):

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c},$$

kjer je P_o delež opazovanega ujemanja, P_c pa je delež naključnega ujemanja.

Podobno kot korelacijski koeficient je tudi Cohenov koeficient K v razponu od -1 do +1, kjer negativne vrednosti govorijo o ujemanju, ki je slabše od naključja, vrednost +1 pa nakazuje

odlično ujemanje. Primerjalna analiza rezultatov modeliranja vsebnosti nitrata v vodi pod koreninskim območjem tal v regionalnem in v lokalnem merilu Spodnje Savinjske doline je bila v GIS okolju izvedena s sistematičnim in robustnim postopkom Kappa Stats (Jenness & Wynne, 2007).

Rezultati in razprava

Vsebnosti nitrata v vodi pod koreninskim območjem tal smo v enodimenzijemskem modelskem okolju DNDC najprej modelirali v posameznih reprezentativnih profilih tal ob izbranih scenarijih rabe prostora in kmetijske prakse (Uhan, 2011). Ob tem smo za potrebe regionalizacije modelskih rezultatov letnega izpiranja dušik iz talnega profila privzeli poenostavljen koncept hidrološke enote HRU. Hidrološke enote HRU so osnovne enote izračunov v modelskem okolju SWAT, ki izvorno temeljijo na vrstah tal, rabah prostora in naklonih površja, znotraj katerih naj bi bile vse vhodne veličine modela predpostavljeno homogene (Arnold et al., 1998). S tremi reprezentativnimi vrstami tal Spodnje Savinjske doline (obrečna tla, evtrična rjava tla, hipoglej) in tremi vrstami kmetijske rabe prostora (hmeljišče, njiva in vrt, trajni travnik) smo vzpostavili prostorsko shemo devetih prevladujočih hidroloških enot HRU (sl. 6), s katerimi smo uspeli pokriti 89 % celotnega raziskovalnega prostora. Rezultati modelskih simulacij DNDC so za izbrano analizirano leto 2008 v razponu od 1,7 do 36,9 kg N/ha. Pri pregledu površin obdelovalnih kmetijskih zemljišč posameznih hidroloških

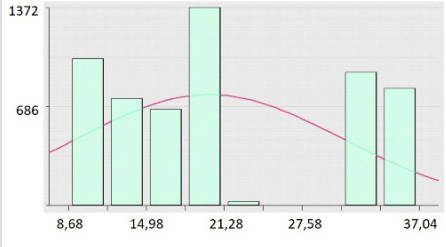
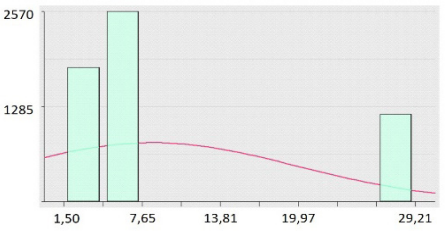
enot in modelskih izračunov izpiranja dušika iz reprezentativnih pedoloških profilov močno izstopajo hmeljišča (sl. 7 in 9) z obravnavano površino 1.212 ha in izpiranjem dušika v razponu od 13,6 kg N/ha na hipogleju Arje vasi do 36,9 kg N/ha na obrečnih tleh Orle vasi.

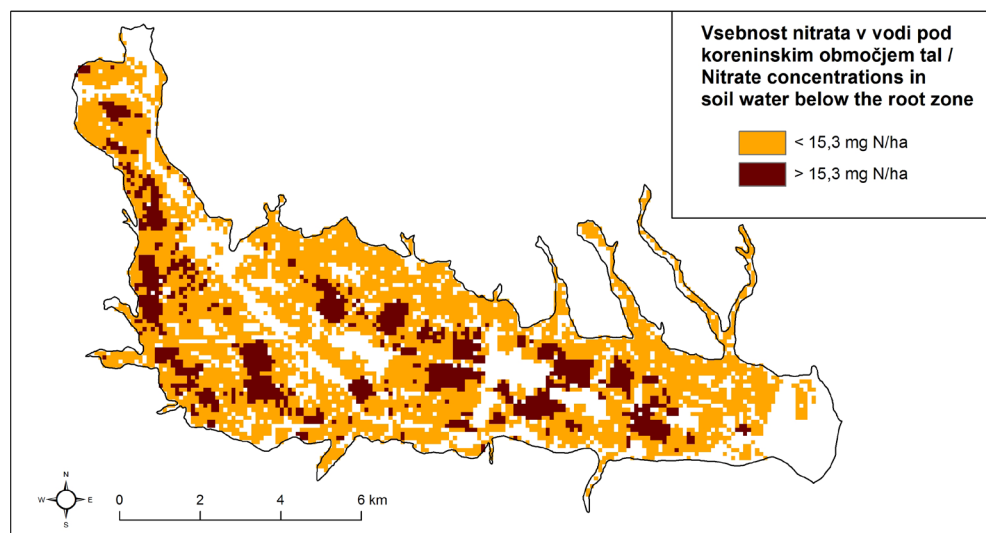
Koncept hidroloških enot HRU smo zaradi potreb primerjalne analize uporabili tudi za posplošitev rezultatov modela GROWA-DENUZ z izvorno prostorsko ločljivostjo 100×100 metrov (Andjelov et al., 2014, 2015). Rezultati regionalnega modela GROWA-DENUZ so za izbrano analizirano leto 2008 po posameznih hidroloških enotah HRU v razponu od 8,7 do 37,0 kg N/ha. Tudi v tej modelski simulaciji izstopajo hidrološke enote s hmeljišči in sicer v razponu od 23,8 do 37,0 kg N/ha. Model GROWA-DENUZ simulira tok dušika v manjšem razponu, vendar pa

je standardni odklon rezultatov obeh modelih zelo podoben: 10,2 kg N/ha pri modelu DNDC in 9,6 kg N/ha pri modelu GROWA-DENUZ (Tabela 2).

Statistična primerjalna analiza podatkovnih slojev je terjala prostorsko klasifikacijo rezultatov obeh modelskih simulacij, ki je bila izvedena glede na število izhodiščnih karakteristik hidroloških enot HRU (trirazredna klasifikacijska shema) in glede na verjetnostno porazdelitev modeliranih vrednosti (dvorazredna klasifikacijska shema). Podlaga dvorazredni klasifikacijski shemi (sl. 7 in 8) je vrednost prevoja logaritemske verjetnostne porazdelitve (Panno et al., 2006), podlaga trirazredni klasifikacijski shemi (sl. 9 in 10) pa je Fisher-Jenksov algoritem naravnih mejnih vrednosti (Slocum et al., 2005). Mejne vrednosti razredov so prikazane v legendah na slikah od 7 do 10.

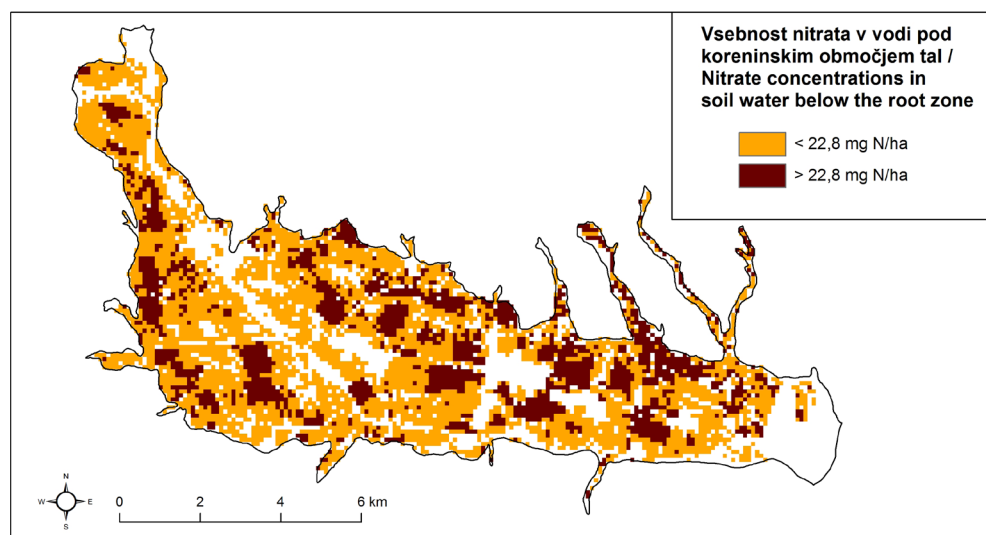
Tabela 2. Statistike rastrske karte posplošenih modelskih vrednosti iz modela GROWA-DENUZ in modela DNDC (v kg N/ha).
Table 2. Statistics of raster maps of generalized raster map from GROWA-DENUZ and DNDC model (in kg N/ha).

	Posplošena rastrska karta iz modela GROWA-DENUZ / Generalized raster map from GROWA-DENUZ model	Posplošena rastrska karta iz modela DNDC / Generalized raster map from DNDC model
Statistike / Statistics		
Število celic / Number of cells	5.565	5.563
Aritmetična sredina / Mean	20,37	9,20
Mediana / Mediana	18,69	5,52
Min. vrednost / Min. value	8,68	1,50
Max. vrednost / Max. value	37,05	29,21
Razpon / Range	28,60	27,72
Standardna napaka ocene sredine / Standard error of mean	0,12	0,14
Varianca / Variance	92,37	103,30
Standardni odklon / Standard Deviation	9,61	10,16



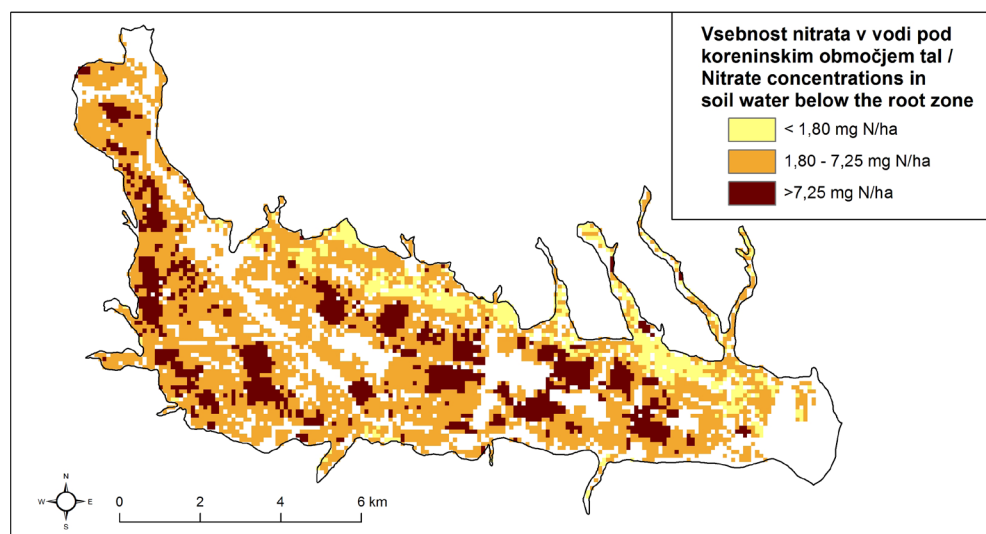
Sl. 7. Modelski rezultat DNDC v dvorazredni klasifikacijski shemi.

Fig. 7. DNDC model result in two-class classification scheme.



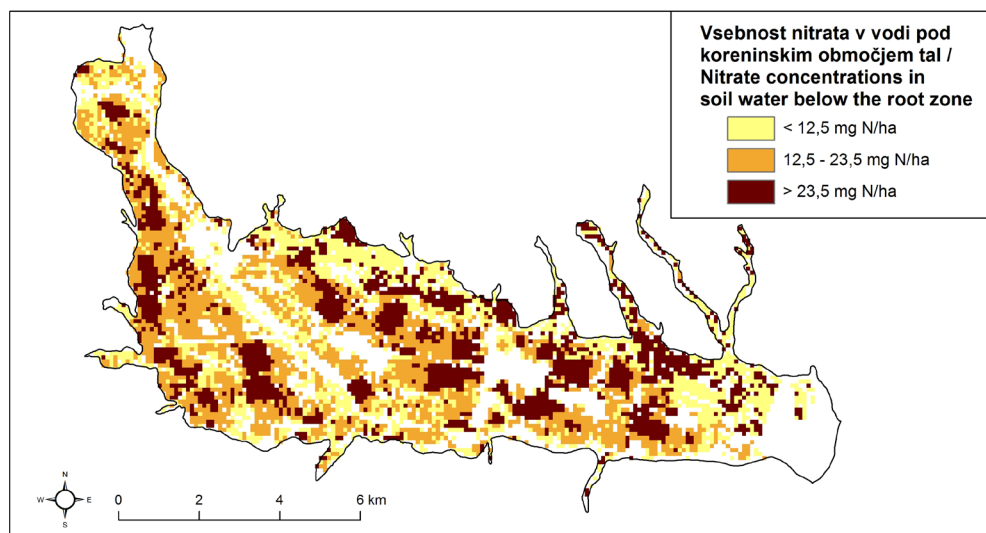
Sl. 8. Modelski rezultat GROWA-DENUZ v dvorazredni klasifikacijski shemi.

Fig. 8. GROWA-DENUZ model result in two-class classification scheme.



Sl. 9. Modelski rezultat DNDC v trirazredni klasifikacijski shemi.

Fig. 9. DNDC model result in three-class classification scheme.



Sl. 10. Modelski rezultat GROWA-DENUZ v trirazredni klasifikacijski shemi.

Fig. 10. GROWA-DENUZ model result in three-class classification scheme.

Za oceno ujemanja prostorskih podatkovnih slojev dveh modelskih simulacij (DNDC in GROWA-DENUZ) in dveh klasifikacijskih shem (dvorazredna in trirazredna shema) smo uporabili Cohenovo Kappa statistiko (Cohen, 1960) in ArcGIS orodje ocenjevanja zanesljivosti prostorskih modelov (Jenness & Wynne, 2005). V primeru trirazredne klasifikacijske sheme je stopnja zanesljivosti ujemanja 71,7 % s Cohenovim Kappa koeficientom 0,57, v primeru dvorazredne klasifikacijske sheme pa je stopnja zanesljivosti ujemanja 89,5 % s koeficientom 0,73, kar se že lahko interpretira kot razred dobrega ujemanja (Landis & Koch, 1977) (Tabela 3) (sl. 7 do 10).

Primerjalna analiza rezultatov modeliranja toka dušika preko koreninskega območja tal v regionalnem in lokalnem merilu Spodnje Savinjske doline odkriva dobra medsebojna ujemanja

predvsem pri višjih modeliranih vrednostih, to je v velikostnem območju nad okoli 23 kg N na hektar. Skoraj popolno ujemanje je ugotovljeno za povprečja hidroloških enot s hmeljišči na obrečnih tleh in zelo prepustnem vodonosniku s podzemno vodo plitvo pod tlemi (sl. 7 do 10). Večja odstopanja pa so bila ugotovljena pri nižjih vrednosti modeliranega dušika pod koreninskim območjem, predvsem na območju hipoglejev in psevdoglejev. To so območja na severnem obrobju doline z bolj anaerobnimi talnimi pogoji in regionalno modeliranimi vrednostmi pod 12 kg N na hektar. Z obsežnimi terenskimi meritvami raztopljenega kisika v podzemni vodi so bila na teh območjih že dokazana izrazita redukcijska okolja, pomembna za regionalno porazdelitev nitrata v podzemni vodi (Uhan, 2010, 2011; Uhan et al., 2011).

Tabela 3. Kappa statistike za različne klasifikacijske sheme.

Table 3. Kappa statistics for different classification scheme.

Klasifikacijska shema / Classification scheme	K_{HAT} / Kappa statistics	Varianca / Variance	Z-vrednost (%) / Z-score (%)	P	Spodnja meja intervala zaupanja (95 %) / Lower confidence interval (95 %)	Zgornja meja intervala zaupanja (95 %) / Upper confidence interval (95 %)	Ocena zanesljivosti / Accuracy assessment
Dvorazredna klasifikacijska shema / two-class classification scheme	0,73	0,00010	71,87	< 0,00001	0,714	0,754	0,895
Trirazredna klasifikacijska shema / three-class classification scheme	0,57	0,00008	62,60	< 0,00001	0,549	0,584	0,717

Ocenjujemo, da je stopnja denitrifikacije v območju korenin v primeru bolj glinastih talnih razmer z nizko vsebnostjo kisika in visoko vsebnostjo vode, kot tudi visoko vsebnostjo organskih snovi, zaznavno višja, kot jo prikazujejo rezultati regionalnega modela. V regionalnem modelu GROWA-DENUZ so denitrifikacijski pogoji v tleh Slovenije ocenjeni na podlagi referenčnih vrednosti, pridobljenih z meritvami na srednjeevropskih tleh, kar je nedvomno lahko velik vir variacije oz. odstopanja od rezultatov lokalnega modela, ki temelji na raziskanih reprezentativnih profilih tal študijskega območja. Poleg razlik v vhodnih podatkih o gnojenju in kmetijski praksi v obeh modelskih simulacijah lahko tudi v tem iščemo razloge za razlike med povprečnimi vrednostmi obeh modelskih rešitev (Tabela 2). V prihodnje je priporočljivo terensko raziskati območja z ugodnimi denitrifikacijskimi pogoji in v regionalnem modelu bolj natančno opredeliti potencial za redukcijo nitrata v koreninskem območju in posledično tudi v podzemni vodi vseh plitvih vodonosnikov s slabim kemijskim stanjem. Ob tem pa se je potrebno zavedati, da je proces denitrifikacije modularnega značaja, kar dodatno otežuje meritve in modeliranje ter terja razširitev raziskav tudi na izotopsko sestavo vode, predvsem na stabilne izotope ^{18}O v NO_3 ter ^{15}N in ^{11}B . Znotraj t.i. »izotopskega triptiha« je za razlikovanje virov nitrata in frakcionacijskih procesov, kot je denitrifikacija, pomembno poznavanje predvsem izotopske sestave ^{11}B , na katero biogeokemijski transformacijski procesi ne vplivajo (Widory et al., 2013; Van Groenigen et al., 2015).

Sklep

Zaradi odsotnosti dolgoročnega trenda izboljševanja stanja voda po oceni Evropske komisije nitrat v podzemni vodi še vedno predstavlja resno grožnjo okolju na regionalni in lokalni ravni. Regionalna modelska simulacija toka nitrata preko koreninskega območja v vodonosnik je pomemben pristop ocenjevanja učinkovitosti načrtovanih ukrepov zmanjšanja tveganja za onesnaženje podzemne vode, predvsem v primerih intenzivnega kmetovanja na plitvih prepustnih vodonosnikih s slabim kemijskim stanjem podzemne vode in regionalnimi vodooskrbnimi viri. V poročilu na podlagi evropske direktive Sveta 91/676/EEC, ki se nanaša na varstvo voda pred onesnaženjem z nitrati iz kmetijskih virov za obdobje 2012–2015, je Slovenija tovrstni modelski pristop že napovedala. Ob tem pa je pomembno poznavanje omejitev modelskega sistema in zanesljivosti modelskih rezultatov. Z rezultati lokalnega modela DNDC

smo podprli analizo vrednotenja rezultatov regionalnega modeliranja izpiranja dušika na območju celotne države. Primerjalna analiza rezultatov modeliranja v regionalnem merilu z rezultati modeliranja v reprezentativnih profilih tal je ena od pomembnih stopenj v procesu preizkušanja modela oz. ocenjevanja zanesljivosti rezultatov regionalnih modelov. Primerjalna analiza je na tej stopnji potrdila primernost uporabe rezultatov regionalnega modelskega sklopa GROWA-DENUZ v procesu priprave ukrepov potrebnega zmanjšanja obremenitev na nivoju vodnih teles s slabim kemijskim stanjem podzemnih voda, ob tem pa je izpostavila potrebo po boljši karakterizaciji denitrifikacijskih pogojev po posameznih delih vodnih teles, kar lahko izboljša napovedovanje učinkov ukrepov tudi v nižjem velikostnem razredu vsebnosti nitrata v vodi pod koreninskim območjem tal.

Literatura

- Andjelov, M., Kunkel, R., Uhan, J. & Wendland, F. 2014: Determination of nitrogen reduction levels necessary to reach groundwater quality targets in Slovenia. *Journal of Environmental Sciences*, 26/9: 1806–1817. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.06.027>
- Andjelov, M., Kunkel, R., Sušin, J., Uhan, J. & Wendland, F. 2015: Modelling and management of nitrate inputs into groundwater and surface water in Slovenia. In: Loiskandl, W. (ed.): *International Interdisciplinary Conference on Land Use and Water Quality, Agricultural Production and the Environment*, Vienna, Institute of Hydraulics and Rural Water Management, pp. 27. Internet: http://web.natur.cuni.cz/luwq2015/download/LUWQ2015_Volume_of_abstracts_TOC-abstracts-AuthorIndex_UPDATE_for_web.pdf (17. 10. 2018)
- Andjelov, M., Mikulič, Z., Tetzlaff, B., Uhan, J. & Wendland, F. 2016a: Groundwater recharge in Slovenia : results of a bilateral German-Slovenian research project. *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt*, Bd. 339: 138 p. Internet: http://juser.fz-juelich.de/record/824161/files/Energie_Umwelt_339.pdf (17. 10. 2018)
- Andjelov, M., Sušin, J. & Uhan, J. 2016b: Vsebnost nitrata v vodi pod koreninsko cono. In: Novak, M. & Rman, N. (eds.): *Geološki atlas Slovenije*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 74–75.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. & Williams, J.R. 1998: *Large area hydrology*

- modeling and assessment. Part 1: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34/1: 73-89.
- Cohen, J. 1960: A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20/1: 37-46.
- Direktiva 91/271/EGS: Direktiva sveta 91/271/EGS z dne 21. maja 1991 o čiščenju komunalne odpadne vode. *Uradni list RS*, 135, 30.5.1991: 40-52.
- Direktiva 2000/60/ES: Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike. *UL L št. 327 z dne 22. 12. 2000*: 1-73. Direktiva 91/676/EGS: Direktiva Sveta 91/676/EGS z dne 12. decembra 1991 o varstvu voda pred onesnaževanjem z nitrati iz kmetijskih virov. *UL L št. 375 z dne 31. 12. 1991*: 1-8.
- EEA, 2002: EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook. Technical Report No 30. European Environment Agency, Copenhagen. Internet: <http://www.snc.europa.eu/publications/EMEP-CORINAIR3> (10. 2. 2013)
- Hennings, V. (ed.) 2000: Methodendokumentation Bodenkunde: Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. *Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Heft SG 1*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover: 232 p.
- Jenness, J. & Wynne, J.J. 2007: Kappa analysis (kappa_stats.avx) extension for ArcView 3.x. Internet: http://www.jennessent.com/arcview/kappa_stats.htm (10. 5. 2018)
- Kunkel, R. & Wendland, F. 2006: Diffuse Nitrateinträge in die Grund- und Oberflächengewässer von Rhein und Ems. *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt*, 62: 124.
- Kunkel, R., Kreins, P., Tetzlaff, B. & Wendland, F. 2010: Forecasting the effects of EU policy measures on the nitrate pollution of groundwater and surface waters. *Journal of Environmental Sciences*, 22/6: 872-877. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60191-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60191-1)
- Kurkowiak, B.M. (ed.) 2017: Sustainable development in the European Union. Monitoring report on progress towards the SDGs in an EU context, 2017 edition. EUROSTAT, Luxembourg: 368 p.
- Landis, J.R. & Koch, G.G. 1977: The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33/1:159-74.
- Li, C.S., Frolking, S. & Frolking, A.T. 1992: A Model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, 97/D9: 9759-9776.
- Li, C.S. 2009: User's guide for the DNDC model - Version 9.3. University of New Hampshire. 88 p.
- Matoz, H., Nagode, P., Mihorko, P., Cvitanich, I., Dobnikar Tehovnik, M., Remec Rekar, Š., Rotar, B., Andjelov, M., Uhan, J., Sever, M., Zajc, M., Krsnik, P., Kušar, U., Marolt, P., Hebat, I., Sušin, J., Verbič, J. & Zagorc, B. 2016: Poročilo Slovenije na podlagi 10. člena Direktive Sveta 91/676/EEC, ki se nanaša na varstvo voda pred onesnaženjem z nitrati iz kmetijskih virov za obdobje 2012 – 2015. Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana: 73 p.
- Michaelis, L. & Menten, M.L. 1913: Kinetik der Invertinwirkung. *Biochem. Zeitung*, 49: 333-369.
- Mihelič, R., Čop, J., Jakše, M., Štampar, F., Majear, D., Tojnko, S. & Vršič, S. 2010: Smernice za strokovno utemeljeno gnojenje. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, Ljubljana: 182 p.
- MKGP 2007: Grafični podatki GERK in RABA. Internet: <http://rkg.gov.si/GERK> (20. 12. 2007)
- MOP 2011: Načrt upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja 2009 - 2015, Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana: 524 p.
- MOP 2016: Načrt upravljanja voda na vodnem območju Donave za obdobje 2016 - 2021, Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana: 287 p.
- Müller, U. & Raissi, F. 2002: Arbeitshilfe für bodenkundliche Stellungnahmen und Gutachten im Rahmen der Grundwassernutzung. *Arbeitshefte Boden Heft 2*. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover: 49 p.
- Nernst, W.H. 1889: Die elektromotorische Wirksamkeit der Ionen. *Z. Phys. Chem.*, 4: 129-181.
- Panno, S.V., Kelly, W.R., Martinsek, A.T. & Hackley, K.C. 2006: Estimating background and threshold nitrate concentrations using probability graphs. *Ground Water*, 44/5: 697-709.
- Salas, W. 2010: Agricultural Strategies for Mitigating GHG Emission: DNDC Model and Case Studies. Internet: <https://www.arb.ca.gov/research/seminars/salas/salas.pdf> (30. 5. 2018)
- Slocum, T.A., R. B. McMaster, R.B., Kessler, F.C. & Howard, H.H. 2005: Thematic cartography and geographic visualization. Prentice-Hall, Inc., New Jersey: 518 p.

- Souvent, P., Vižintin, G., Celarc, S. & Čenčur Curk, B. 2014: Ekspertni sistem za podpora odločanju na aluvialnih telesih podzemne vode Slovenije. *Geologija*, 57/2: 245-252, doi:10.5474/geologija.2014.021
- Stumm, W. & Morgan, J. J. 1981: Oxidation and Reduction. In: Stumm, W. & Morgan, J. J. (eds.): *Aquatic Chemistry: An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters*. 2nd edition, John Wiley & Sons, New York: 418-503.
- Sušin, J., Bergant, J., Šinkovec, M., Kralj, T., Verbič, J., Žnidaršič, T., Babnik, D., Glad, J. & Zagorc, B. 2015: Strokovne naloge s področja okolja za Ministrstvo za okolje in prostor: poročilo za leto 2014. Kmetijski inštitut Slovenije, Ljubljana: 63 p.
- University of New Hampshire 2017: DNDC (Version 9.5) Scientific basis and processes. Internet: http://www.dndc.sr.unh.edu/papers/DNDC_Scientific_Basis_and_Processes.pdf (30. 5. 2018)
- Uhan, J., Vižintin, G. & Pezdič, J. 2010: Groundwater nitrate vulnerability assessment using process-based models and weights-of-evidence technique: Lower Savinja Valley case study (Slovenia). In: Zuber, A., Kmiecik, E. & Zuber, A. (eds.): *Groundwater Quality Sustainability*. XXXVIII IAH Congress, Abstract book, Krakow: 47-48.
- Uhan, J. 2011: Ranljivost podzemne vode na nitrarno onesnaženje v aluvialnih vodonosnikih Slovenije: doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Ljubljana: 163 p.
- Uhan, J., Brilly, M., Pintar, M., Vižintin, G., Trček, B. & Pezdič, J. 2011: The impact of anoxic conditions on regional groundwater nitrate distribution and vulnerability assessment. In: *Groundwater: our source of security in an uncertain future: papers presented at the international conference: 19th to 21st September 2011, Pretoria, South Africa: incorporating the Biennial Conference of the Ground Water Division (GWD) of the Geological Society of South Africa (GSSA) and Meeting of the International Association of Hydrogeologists (IAH)*. Pretoria: 1 p.
- Uhan, J. (ed.) 2015: Količinsko stanje podzemnih voda v Sloveniji. Osnove za NUV 2015-2021. Agencija RS za okolje, Ljubljana: 64 p.
- Uhan, S. 2018: Assessment of the influences of climate variability on nitrogen leaching rate into groundwater. *RMZ – Materials & Geoenvironment*, 64: 1-8. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2018-0013>
- Van Groenigen, J.V., Huygens, D., Boeckx, P., Kuypers, Th.W., Lubbers, I.M., Rütting, T. & Groffman, P. M. 2015: The soil N cycle: new insights and key challenges. *Soil*, 1: 235-256. <https://doi.org/10.5194/soil-1-235-2015>
- Vidic, N. J., Prus, T., Grčman, H., Zupan, M., Lisec, A., Kralj, T., Vrščaj, B., Ruprecht, J., Šporar, M., Suhadolc, R., Mihelič, R. & Lobnik, F. 2015: Tla Slovenije s pedološko karto v merilu 1: 250 000 = Soils of SLOvenia with soil map 1: 250 000. Evropska komisija, Skupni raziskovalni center (JRC)/European Commission Joint Research Centre (JRC)/Publication Office of the European Union, Luxembourg: 152 p. <https://doi.org/10.2788/88750>
- Wendland, F., Kunkel, R., Gömann, H. & Kreins, P. 2008: Regional modelling of nitrate flux into groundwater and surface water in the Ems basin and the Rhine basin, Germany. In: Mikulič, Z. & Andjelov, M. (eds.): *Groundwater modelling. International Symposium on Groundwater Flow and Transport Modelling. Proceedings of Invited Lectures*. Agencija RS za okolje, Ljubljana: 95 p. Internet: http://www.arso.gov.si/en/water/reports%20and%20publications/Groundwater_Modelling.pdf (17. 10. 2018)
- Widory, D., Petelet-Giraud, E., Brenot, A., Bronders, J., Tirez, K. & Boeckx, P. 2013: Improving the management of nitrate pollution in water by the use of isotope monitoring: the $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{11}\text{B}$ triptych. *Isotopes Environ Health Stud.*, 49/1: 29-47. <https://doi.org/10.1080/10256016.2012.666540>
- Wienhaus, S., Höper, H., Eisele, M., Meesenburg, H. & Schäfer, W. 2008: Nutzung bodenkundlich-hydrogeologischer Informationen zur Ausweisung von Zielgebieten für den Grundwasserschutz- Ergebnisse eines Modellprojektes (NOLIMP) zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie. *GeoBerichte*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover: 57 p.
- Zupan, M., Grčman, H., Tič, I., Hodnik, A., Kralj, T., Šporar, M., Ruprecht, J., Šinkovec, M., Lapajne, S., Šijanec, V., Ilc, Z., Gogić Knežić, S., Mohorovič, B., Istenič, B., Kralj, T., Rojec, L., Rojec, M., Zupan, M. & Šijanec, M. 2008: Raziskave onesnaženosti tal Slovenije v letu 2007. Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Center za pedologijo in varstvo okolja, Ljubljana: 105 p.