

NUMERIČKE SIMULACIJE PRONOSA IZOPROTURONA PRI KONVENCIONALNOJ OBRADI TLA UZ PRIMJENU KOMPOSTA DOBIVENOG RECIKLIRANJEM URBANOG BIO-OTPADATA

dr. sc. Vilim Filipović, dipl. ing. agr.

Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet,
Zavod za melioracije
Svetošimunska 25, 10000 Zagreb, Hrvatska
vfilipovic@agr.hr

Yves Coquet

Sveučilište u Orleansu, ISTO, UMR 7327,
45071, CNRS/INSU, ISTO, UMR 7327, 45071;
BRGM, ISTO, UMR 7327, BP 36009
45060 Orléans, Francuska

Valérie Pot

UMR ECOSYS, INRA, AgroParisTech,
Sveučilište Paris-Saclay, 78850 Thiverval-
Grignon, Francuska

Lana Matijević

Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet,
Zavod za melioracije
Svetošimunska 25, 10000 Zagreb, Hrvatska

Philippe Cambier

UMR ECOSYS, INRA, AgroParisTech,
Sveučilište Paris-Saclay, 78850 Thiverval-
Grignon, Francuska

Sabine Houot

UMR ECOSYS, INRA, AgroParisTech,
Sveučilište Paris-Saclay, 78850 Thiverval-
Grignon, Francuska

Pierre Benoit

UMR ECOSYS, INRA, AgroParisTech,
Sveučilište Paris-Saclay, 78850 Thiverval-
Grignon, Francuska

Strukturna heterogenost tla uzrokovana agrotehničkim zahvatima može imati veliki utjecaj na tok vode i pronos tvari. Glavni cilj rada je bio procijeniti kako prisustvo različitih strukturnih zona u obradivom sloju tla utječe na iniciranje preferencijalnih tokova vode u tlu te procijeniti utjecaj degradacije herbicida izoproturona na dinamiku njegova pronosa. Dugogodišnji podatci s poljskog pokusa (QualiAgro, 2004. – 2010.) na kojem se vrši primjena komposta dobivenog recikliranjem urbanog bio-otpada korišteni su za kalibraciju i verifikaciju numeričkog modela HYDRUS-2D. Tok vode i dinamika izoproturona uspješno su simulirani nakon kalibracije hidrauličkih parametara i temporalne optimizacije brzine degradacije izoproturona. Preferencijalni tokovi su inicirani u međubrazdama uslijed velike poroznosti nastale dodatkom komposta, a kao posljedice usmjeravanja toka okolo zbijenih zona tla. S druge strane, dodatak komposta dobiven recikliranjem kanalizacijskog mulja i zelenog bio-otpada povećao je degradaciju i sorpciju izoproturona u zonama koje su sadržavale najveće količine komposta te se posljedično smanjio i njegov pronos.

Ključne riječi: obrada tla, aplikacija komposta, tok vode, pronos izoproturona, numeričko modeliranje, HYDRUS-2D

1. UVOD

Tok vode i pronos onečišćivača u nesauriranoj zoni tla su uvelike pod utjecajem heterogenosti koja se javlja u strukturi tla. Heterogenost tla može biti uzrokovana prirodnim procesima ili antropogenim intervencijama kao što su: obrada tla, primjena gnojidbe ili komposta tijekom koje dolazi do zbijanja tla i miješanja njegovih različitih agregata. Obrada tla, kao i ostali agrotehnički zahvati, mogu utjecati na hidrauličke karakteristike tla s posljedicama na zadržavanje vode u profilu tla, kretanje vode i nutrijenata/onečišćivača te na rast i razvoj uzgajanih kultura (Strudley et al., 2008.).

Obrada tla može pruzročiti strukturne heterogenosti u profilu tla, u vidu različitih zona zbijenosti tla (Manichon i Roger-Estrade, 1990.). Zbijene zone tla generalno imaju mnogo nižu hidrauličku vodljivost u usporedbi s rahlim tlom (Schneider et al., 2009.) i mogu imati veliki utjecaj na tok vode i pronos tvari u tlu. Coquet et al. (2005. a) su proveli poljski pokus kako bi procijenili utjecaj strukture tla uzrokovane agrotehničkim zahvatima na tok vode i pronos trasera bromida. Tok vode i pronos bromida se odvijao uglavnom na lokacijama nezbijenog tla, dok je vrlo mala količina bromida penetrirala u zbijene zone tla te su posljedično takve zone inicirale preferencijalne tokove oko njih samih.

Uz obradu tla, primjena i prisustvo organskih dodataka u tlu mogu izmijeniti strukturu tla i isto tako posljedično utjecati na dinamiku vode i prisutnih tvari koje su dodane primjenom agrotehničkih mjera (gnojidba-nutrijenti, zaštita usjeva-pesticidi). Dodatak komposta u tlu povećava organsku frakciju koja uvelike utječe na sorpciju i degradaciju pesticida u tlu (De Wilde et al., 2008.). Schneider et al. (2009.) su otkrili da je velika varijabilnost u hidrauličkoj vodljivosti u obradivom horizontu tla dominantno uzrokovana samom obradom tla (osnovna obrada, predsjedvena obrada), dok je dodatak komposta imao manje izraženu ulogu.

Numerički su modeli postali standardni alati u znanstvenim istraživanjima koja se odnose na tok vode i dinamiku pesticida u tlima (Doussset et al., 2007.), Gärdenäs et al. (2006.) su proveli usporedbu četiri različita preferencijalna modela toka vode i pronosa tvari iz perspektive njihove sposobnosti simuliranja drenažnih isteka i koncentracije pesticida. Autori su zaključili kako su dvodimenzionalni modeli prikladni alati za simuliranje procjeđivanja pesticida na dreniranim poljoprivrednim područjima s velikom prostornom varijabilnošću karakteristika prisutnih tala. Coquet et al. (2005. b) primjenjuju numerički model HYDRUS-2D i uspješno interpretiraju tok vode i pronos bromida u profilu tla koji je sadržavao zbijene zone nastale uslijed primjene agrotehničkih mjera.

Izoproturon [3-(4-isopropylphenyl)-1,1-dimethylurea] je herbicid čija je namjena suzbijanje jednogodišnjih uskolisnih i nekih širokolisnih korova u žitaricama te je ujedno jedan od učestalo detektiranih herbicida u

površinskim i podzemnim vodama (SOeS, 2012.). Zbog navedenog utjecaja na okoliš, dinamika izoproturona je istraživana kako u laboratorijskim tako i u poljskim pokusima (Köhne et al., 2006.).

Primjena dvo ili trodimenzionalnih modela je jedan od načina koji omogućuje istraživanje prostorne strukturne varijabilnosti obradivog horizonta tla. Uz navedeno, modeliranje dinamike pesticida istovremeno omogućuje istraživanje kompleksnih procesa kao što su: tok vode, pronos tvari, transport topline, sorpciju pesticida, reakcije transformacije i degradacije, volatizaciju, upijanje korijenom i površinsko otjecanje. Takva istraživanja zahtijevaju veliki broj mjerenih parametara koja nisu uvijek praktična i izvediva, gdje svakako dolazi do izražaja primjena i značaj provedbe numeričkih simulacija.

Dugogodišnji podatci s poljskog pokusa (QualiAgro, 2004. – 2010.), na kojem se vrši primjena komposta proizvedenog recikliranjem urbanog bio-otpada, su korišteni za kalibraciju i verifikaciju numeričkog modela HYDRUS-2D. Glavni je cilj rada bio procijeniti kako prisustvo različitih strukturnih zona u obradivom sloju tla (koje su rezultat obrade tla i dodatka komposta) utječe na tok vode i dinamiku herbicida izoproturona tijekom višegodišnjeg razdoblja. Također je procijenjeno koje će strukturne promjene utjecati na pojavu preferencijalnih tokova te utjecaj degradacije herbicida na dinamiku njegova pronosa. Strukturne promjene tla nastale utjecajem agrotehničkih mjera su kvantificirane na otvorenim profilima tla i direktno implementirane u model te korištene u simulacijama toka vode i pronosa izoproturona.

2. MATERIJALI I METODE

2.1. Poljski eksperiment (QualiAgro)

Pokusna se lokacija nalazi u Fracuskoj, Feucherolles (Yvelines, 48°50'28"S i 1°56'31"l). Tlo je na navedenoj lokaciji okarakterizirano kao lesivirano, s 19% prosječnog udjela gline, 75% ilovače i 6% pijeska u obradivom horizontu. Poljski pokus je postavljen s namjerom istraživanja utjecaja dodatka komposta proizvedenog od urbanog biološkog otpada u tlo, počevši od 1998. Na pokusu su se u plodoredu izmjenjivale pšenica (*Triticum spp.*), ječam (*Hordeum Vulgare L.*) i kururuz (*Zea mays L.*). Osnovna obrada tla je provedena svake godine tijekom listopada ili početkom studenoga do 28 cm dubine pomoću četverobraznog pluga. Primjenom ovakvog pluga stvaraju se u obradivom sloju tla četiri brazde između kojih dolazi do stvaranja strukturnih agregata različitih fizikalnih karakteristika i razine zbijenosti. Dodatak komposta je proveden svake druge godine u količini koja odgovara količini od 4 t organskog ugljika po hektaru. Aplikacija izoproturona je provedena tri puta tijekom razdoblja 2004./2010. kod uzgoja žitarica u količini od 1000 g po hektaru. Prilikom modeliranja korišteni su podatci s jedne

Tablica 1. Prikaz najvažnijih fizikalno-kemijskih karakteristika primjenjivanog komposta od kanalizacijskog mulja i zelenog bio-otpada (KBO).

	pH H ₂ O	OT	Corg	Ntot	C/N	HEM	CEL	LIG
		g kg ⁻¹ suhe tvari				%OT		
KBO	7,7±0,9	474±71	282±69	22,8±4,2	12,5±2,9	5±3	22±13	33±13

*KBO - kompost od kanalizacijskog mulja i zelenog bio-otpada; OT – organska tvar; Ntot – ukupni dušik; C/N – odnos ugljik/dušik; HEM – hemiceluloza; CEL – celuloza; LIG – lignin; ± označava vrijednosti standardne devijacije.

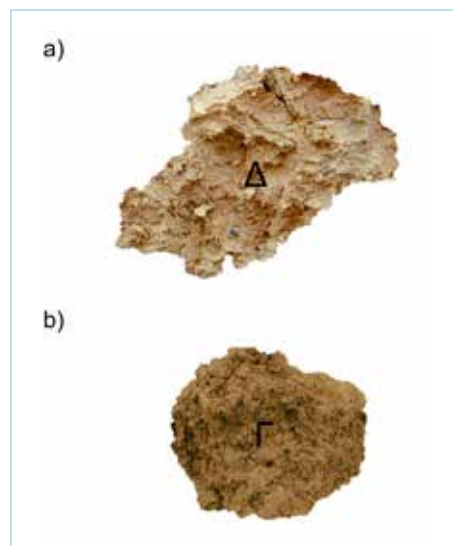
pokusne parcele na koju je dodan kompost proizveden od kanalizacijskog mulja i zelenog bio-otpada (KBO). Detalji o sastavu primjenjenog komposta su prikazani u [tablici 1](#). Dodatne informacije o samom poljskom pokusu QualiAgro dostupne su na web stranici: http://www6.inra.fr/qualiagro_eng.

2.2. Morfološki opis profila tla

U prosincu 2004. otvoren je profil tla (45 cm dubok i 200 cm širok) okomito na smjer obrade tla kako bi se proveo njegov opis prema Manichonovoj morfološkoj metodi (1982.) za karakterizaciju različitih struktura tla. Prema navedenoj metodi profil tla je podijeljen u 4 zone: međubrazda (*eng. interfurrows*), nepropusni sloj (*eng. ploughpan*), Δ zone i Γ zona. Međubrazde (MB) se formiraju prolaskom pluga i okretanjem brazdi te ih karakterizira veća poroznost i velik udio organskih ostataka uzgajanih kultura ili komposta u slučaju njegove aplikacije. Zbijene zone (Δ, [slika 1 a](#)) karakteristične su po zaravnjenim površinama bez prisustva vidljivih makropora tla, dok nezbijene zone (Γ, [slika 1 b](#)) imaju vidljivo prisustvo makropora uslijed rahlije strukture tla. Nepropusni sloj (NS) je posljedica konstantne obrade tla na istu dubinu (28 cm) koji utječe na stvaranje zbijenog sloja tla (tzv. "taban pluga", do nekoliko cm debljine) i kao takav uzrokuje otežanu propusnost. Teksturni sastav tla je varirao s dubinom gdje je najveći udio gline bio prisutan na dubini od 28–50 cm u nepropusnom sloju i E horizontu (NS=23% gline, E=31,9% gline).

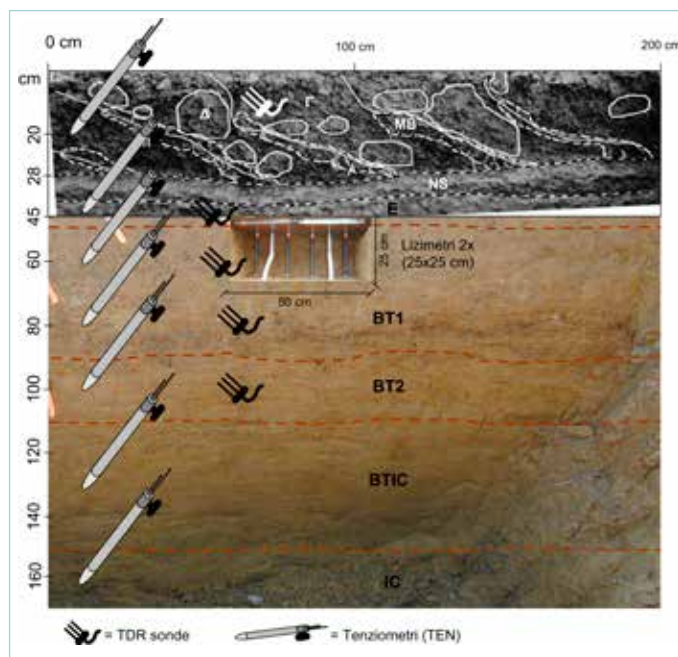
2.3. Terenska i laboratorijska mjerenja

Tlak vode u tlu je mjereno pomoću tenziometara (konstruiranih u INRI, Grignon) instaliranih na dubini od 20, 40, 60, 80, 100, 130 i 160 cm dubine tijekom 2007./2008. Količina vode u tlu je mjerena pomoću TDR sonde (Trase, Soil moisture eq., CA) tijekom razdoblja 2004. – 2010. koje su instalirane na dubini od 20, 40, 60, 80 i 100 cm. Meteorološki dnevni podatci (količina oborina, temperatura zraka, vlažnost zraka, brzina vjetera, i solarna radijacija) su prikupljeni s meteorološke postaje postavljene u blizini lokacije poljskog pokusa (500 m). Dva vakuumska lizimetra (25 x 25 cm) su instalirana na dubinu od 45 cm jedan do drugog u profilu tla, pažeći da se okolno tlo ostavi u neporemećenom stanju. Detaljan opis profila tla, uključujući i kvantifikaciju različitih strukturalnih zona u obradivom horizontu, te točan smještaj mjerne opreme prikazan je na [slici 2](#). Lizimetri su konstruirani na način da primjenom malog tlaka

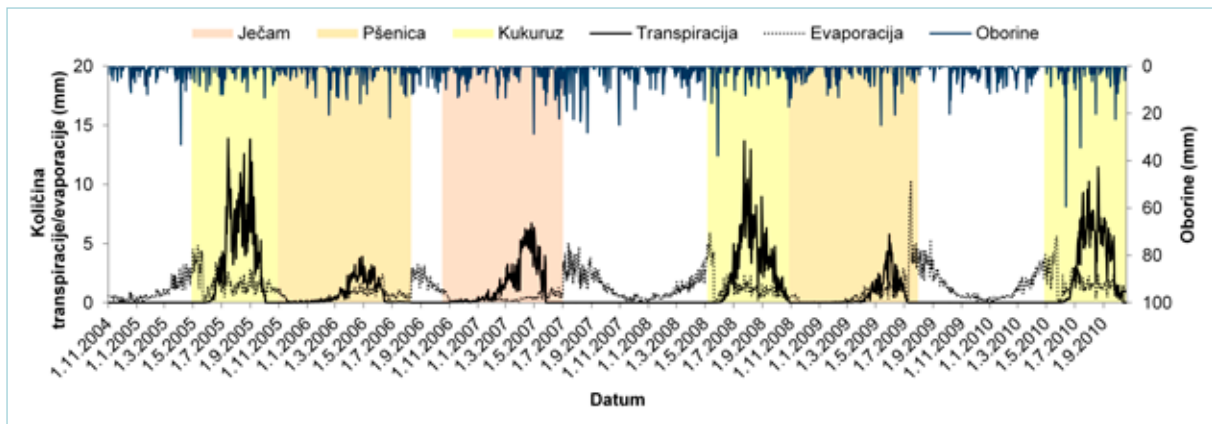


Slika 1. Prikaz strukturne poroznosti a) zbijene zone obradivog horizonta Δ i b) nezbijene (rahle) zone obradivog horizonta Γ, izdvojenih iz profila tla tijekom morfološkog opisa prema Manichonovoj metodi (1982.).

izvlače perkolat iz tla iznad njih i provode ga do posude za prikupljanje uzoraka. Uzorci su prikupljeni poslije većih količina oborina i uskladišteni na 4°C do provedbe laboratorijskih analiza. Koncentracije izoproturona u otopini tla su mjerene pomoću tekućinske kromatografije – masene spektrometrije (SPE-LC-MS-MS, QUATTRO Premium 2005; NF EN ISO 11369) na institutu Pasteur (Lille, Francuska). Količine isteka i masa izoproturona u radu su prikazane kao prosjek iz dva lizimetra. Hidraulička



Slika 2. Morfološki opis profila s prikazanim različitim strukturama u obradivom sloju tla (Γ, Δ, MB, NS) i distribucija dubljih horizonata tla (E, BT1, BT2, BTIC, IC) uz prikaz postavljene mjerne opreme (lizimetri, TDR, tenziometri). Navedeni prikaz je korišten u opisu domene HYDRUS-2D modela (horizont BT je podijeljen na dva horizonta, BT1 i BT2, zbog postavljenih mjernih instrumenata).



Slika 3. Dnevne vrijednosti evapotranspiracije i oborina (mm) tijekom razdoblja 2004. - 2010. na poljskom pokusu QualiAgro.

vodljivost nesaturiranog tla u poljskim uvjetima je izmjerena za svaki tip strukture primjenom tlačnog infiltrimetra (eng. *tension disk infiltrimeter*, Schneider et al., 2009.) koji mjere infiltraciju vode u nesaturirano tlo postavljanjem diskosne membrane na površinu tla i aplicirajuću vodu pri različitim tlakovima. Na temelju dobivenih podataka su izrađene retencijske krivulje za pojedine strukturne zone tla. Evapotranspiracija je izračunata pomoću Penman-Monteith metode na temelju provedenih meteoroloških podataka. Proračun evapotranspiracije je proveden pomoću HYDRUS-1D programa temeljem navedene metode i dobivene vrijednosti su prikazane na slici 3. Iz slike je vidljivo kako su veće vrijednosti transpiracije prisutne u vrijeme uzgoja kukuruza u usporedbi s periodom kada su uzgajane pšenica i ječam. Vrijednosti evaporacije su prvenstveno bile ovisne o kretanju oborina i temperaturi tla i shodno navedenom su prisutne oscilacije tijekom razdoblja od 2004. - 2010. Retencija vode u tlu je mjerena pomoću Richardsove tlačne membrane na neporušenim uzorcima tla volumena 50 cm³. Ostali van Genuchtenovi parametri, koji služe za izradu retencijskih krivulja tla, optimizirani su pomoću RETC programa uz visoku razinu korelacije (R² se kretao od 0,81 do 0,99).

2.4. Parametri sorpcije i degradacije izoproturona

Koeficijenti sorpcije (K_d) izoproturona su izmjereni za svaku morfološki opisanu zonu posebno (Γ , Δ , MB, NS, preuzeto iz Pot et al., 2011.). Koeficijent sorpcije predstavlja odnos sorbirane koncentracije tvari (izoproturona) na česticama tla, s_e , i koncentracije tvari (izoproturona) u otopini tla, c_e , nakon 24h:

$$K_d = \frac{s_e}{c_e} \quad (1)$$

Usiječnju isivbnju 2005. mineralizacija ¹⁴C-izoproturona je praćena u kontroliranim (laboratorijskim) uvjetima (pri temperaturi od 28 °C, i relativnoj količini vode od

80% pri pF=2,5) tijekom 65 dana. Nakon provednog laboratorijskog pokusa brzina degradacije izoproturona je izračunata iz mineralizacije ¹⁴C-izoproturona posebno za svaku strukturnu zonu tla (Γ , Δ , MB, NS). Više detalja o degradaciji i mineralizaciji izoproturona na QualiAgro poljskom pokusu može se naći u znanstvenom istraživanju autora Vieubl e-Gonodet al. (2009.).

2.5. Modeliranje

2.5.1. Matematički opis toka vode i pronosa tvari

Simulacije toka vode i pronosa izoproturona su provedene pomoću HYDRUS-2D programa (Šim nek et al., 2008.) koji numerički rješava dvodimenzionalni tok vode i pronos tvari u varijabilno saturiranom poroznom mediju. Tok vode je opisan pomoću Richardsove jednadžbe:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (2)$$

gdje θ predstavlja relativnu količinu vode u tlu [L³ L⁻³], h je tlak vode u tlu [L], x_i ($i=1,2$) predstavljaju prostorne koordinate [L], t je vrijeme [T], K_{ij}^A su komponente tenzora anizotropije u dva glavna prostorna smjera (x, z), K je hidraulička provodljivost u nesaturiranim uvjetima [L T⁻¹], z je vertikalna koordinata (pozitivan smjer gore) [L], S predstavlja upijanje vode od strane biljke.

Pronos tvari je simuliran primjenom jednadžbe advekcije i disperzije, uz pretpostavku kinetičkih reakcija izoproturona prvog reda u tekućoj fazi i trenutačnu linearnu sorpciju na čestice tla:

$$\frac{\partial (R\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial (q_i c)}{\partial x_i} - \mu_l \theta c \quad (3)$$

gdje je c koncentracija tvari u tekućoj fazi [M L⁻³], predstavlja i -tu komponentu pronosa tvari, tj. specifični protok [L T⁻¹], D_{ij} predstavlja tenzor disperzije [L² T⁻¹], μ_l predstavlja degradaciju prvog reda u tekućoj fazi (otopini

tla) [T^{-1}], i R predstavlja faktor zadržavanja [-] koji se može opisati izrazom:

$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta} \quad (4)$$

gdje je ρ_b gustoća tla [$M L^{-3}$]. Numeričke simulacije su provedene uz pretpostavku da je degradacija izoproturona ovisna o temperaturi tla i relativnoj količini vode u tlu pomoću Walkerovog (s njegovom ekponencijalnom vrijednošću od 0,38, Walker 1974.) i Arrheniusovog izraza (s aktivacijskom energijom od 45 $KJ mol^{-1}$, Stumm i Morgan 1981.).

Hidraulički parametri tla su opisani pomoću van Genuchten-Mualemovog modela (van Genuchten, 1980.):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \text{ za } h < 0 \quad (5)$$

$$\theta(h) = \theta_s \text{ za } h \geq 0$$

$$K(h) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m)^2 \quad (6)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (7)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}; \quad n > 1 \quad (8)$$

gdje je $\theta(h)$ relativna količina vode u tlu [$L^3 L^{-3}$], $K(h)$ je hidraulička vodljivost nesaturiranog tla [$L T^{-1}$] pri određenom tlaku vode u tlu h [L], θ je relativna količina vode u tlu, θ_r predstavlja rezidualnu količinu vode u tlu, a θ_s predstavlja količinu vode u tlu u uvjetima potpune saturacije [$L^3 L^{-3}$], S_e je efektivna saturacija tla, K_s je koeficijent hidrauličke vodljivosti tla u saturiranim uvjetima [$L T^{-1}$], parametar α predstavlja inverznu vrijednost pora ispunjenih zrakom [L^{-1}], n je indeks raspodjele veličine pora, m je koeficijent optimizacije i l je faktor povezanosti pora koji je postavljen na 0,5, što je preporučena vrijednost za većinu tipova tala (Mualem, 1976.).

2.5.2. Opis domene modela, inicijalni i rubni uvjeti

Simulacije su provedene za razdoblje od 1. studenog 2004. do 27. listopada 2010. u dvodimenzionalnoj kvadratnoj domeni veličine 200x200 cm. Distribucija materijala/zona u modelu je opisana prema terenskom morfološkom opisu obradivog horizonta i prema opisu profila za dublje horizonte tla (BT, BT/IC, IC, [slika 2](#)). Dublji horizonti nisu detaljnije opisivani, obzirom da je fokus ovog rada pronos izoproturona ispod obradivog

horizonta (45 cm). Inicijalni uvjeti toka vode postavljeni su kao hidrostatski tlak vode u tlu s vrijednošću od -100 cm na dnu profila. Inicijalna koncentracija izoproturona je zanemarena u cijelom profilu tla, jer u trenutku početka simulacija (1. studeni 2004.) u perkolatu iz lizimetra nije nađeno prisustvo izoproturona. Na površini profila su primjenjeni atmosferski rubni uvjeti (uključuju oborine i evapotranspiraciju kulture), dok su na dnu profila primjenjeni uvjeti slobodnog procjeđivanja. Procjedni uvjeti su postavljeni za simuliranje samog lizimetra s podtlakom koji je iznosio -70 cm. Cauchyjevim rubnim uvjetom je simuliran transport izoproturona na površini i dnu profila te na samom lizimetru. Verifikacija numeričkog modela je provedena pomoću koeficijenta efikasnosti modela (simbol E ; Nash i Sutcliffe, 1970.). Koeficijent efikasnosti modela se kreće u rasponu od $-\infty$ do 1, gdje vrijednost 1 predstavlja savršen model, tj. savršeno poklapanje s experimentalnim rezultatima.

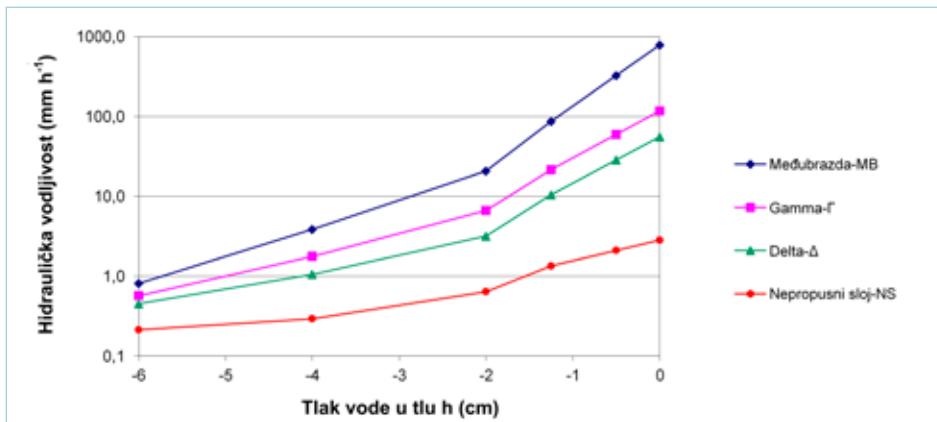
3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Tok vode

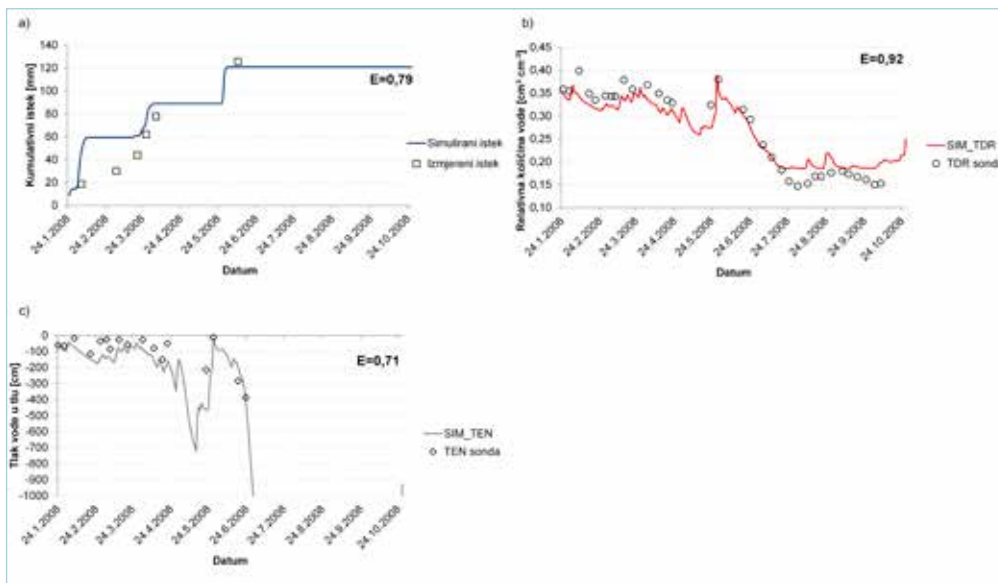
Pomoću infiltracijskih mjerenja provedenih u studenom 2004. i svibnju 2005. dobivene su vrijednosti hidrauličke vodljivosti tla u različitim strukturnim agregatima obradivog horizonta tla ([slika 4](#)). Iz prikaza se može vidjeti kako je vodopropusnost isključivo vezana uz pojedinu strukturnu zonu tla i kao takva ima tendenciju rasta u smjeru nepropusni horizont < delta zone < gama zone < međubrazde. Nepropusni je sloj pokazivao najniže vrijednosti hidrauličke vodljivosti koje su uzrokovane zbijanjem uslijed obrade na istu dubinu, dok je međubrazdni prostor imao najveće vrijednosti koje su rezultat povećane poroznosti uslijed većih količina organskog materijala/komposta i obrade tla. Ovakvi rezultati ukazuju na veliku varijabilnost obradivog horizonta i na vrlo uskom području (200 cm). Na temelju vrijednosti relativne količine vode u tlu (TDR), tlaka vode u tlu izmjerenog pomoću tenziometara i kumulativnih vrijednosti isteka iz lizimetara provedena je kalibracija hidrauličkih parametara tla. Kalibracija je provedena tijekom 2008. zbog najvećeg broja dostupnih terenskih podataka i njihove kvalitete. Nakon što je hidraulička vodljivost u saturiranim uvjetima značajno reducirana u odnosu na terenske vrijednosti, model je uspješno opisao kumulativni istek vode iz lizimetra ($E=0,79$) ([slika 5](#)). Hidraulička vodljivost u nesaturiranim uvjetima jako je varijabilan parametar uz velike oscilacije na malom prostoru, te je kalibracija navedenog parametra standardan postupak (Coquet et al., 2005. b). Model je uspješno reagirao na oborine velikog intenziteta i opisao lizimetarske isteke ([slika 5 a](#)). Relativna količina vode u tlu (TDR, [slika 5 b](#)) i tlak vode u tlu (TEN, [slika 5 c](#)) replicirani su pomoću modela nakon podešavanja saturirane hidrauličke vodljivosti i van Genuchtenovih α i n parametara ([tablica 2](#), [slika 5](#)).

Nakon kalibracije hidrauličkih parametara tla, HYDRUS-2D je uspješno korišten za simulaciju kumulativnih isteka iz lizimetara tijekom cijelog šestogodišnjeg razdoblja s vrlo dobrom pouzdanošću ($E=0,99$, *slika 6*). Simulacije su provedene koristeći opis profila prikazan na *slici 1*, uključujući Δ i MB zone prisutne u obradivom horizontu tla. Simulirani isteci su slijedili terenska mjerenja vrlo dobro, nakon dodatne korekcije vrijednosti indeksa

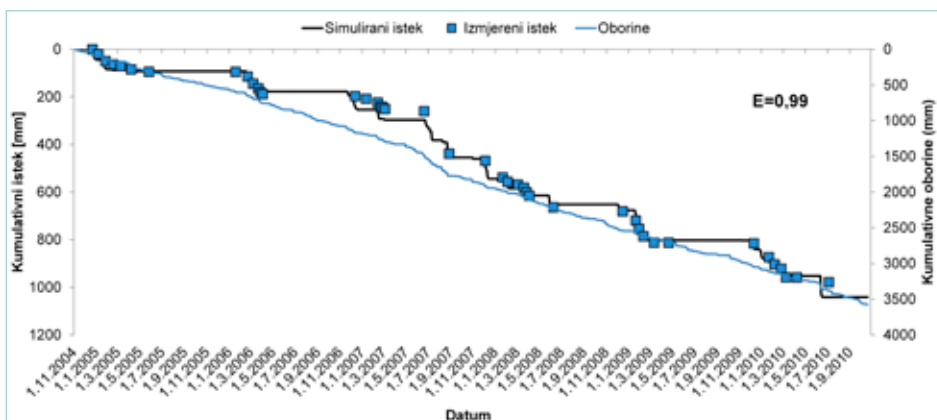
lisne površine (LAI). Korekcija je uzrokovala povećanje transpiracije tijekom 2005./06. i smanjenje transpiracije tijekom 2006./07. perioda, što je posljedično smanjilo ili povećalo kumulativni istek vode u samim lizimetrima. Naposljetku, nakon kalibracije hidrauličkih parametara i optimizacije LAI vrijednosti, model je vrlo uspješno reproducirao količine i vrijeme kumulativnog isteka iz lizimetara (*slika 6*, Filipović et al., 2014.).



Slika 4. Prosječne vrijednosti hidrauličke vodljivosti tla u nesaturiranim uvjetima izmjerene pri različitim vrijednostima tlaka vode u tlu za međubrazde (MB), gama zone (Γ), delta zone (Δ) i nepropusni horizont (NS), mjereno pomoću tlačnog infiltrometra (eng. tension disk infiltrometer).



Slika 5. Izmjerene (simboli) i simulirane (linija) vrijednosti a) kumulativnog isteka iz lizimetra, b) relativne količine vode na dubini od 20 cm i c) tlaka vode tla na dubini od 20 cm tijekom kalibracije modela na podacima iz 2008. godine.



Slika 6. Izmjerene (simboli) i simulirane (linija) vrijednosti kumulativnog isteka iz lizimetara (HYDRUS-2D) te kumulativne oborine tijekom razdoblja 2004. – 2010. nakon primjene kalibriranog modela.

Tablica 2. Fizikalni i kemijski parametri korišteni za provedbu numeričkih simulacija pomoću HYDRUS 2D modela.

	Zona/Horizontal tla							
	Γ	Δ	MB	NS	E	BT (BT1 i BT2)	BTIC	IC
	0-28 cm		28-38 cm		38-50 cm	50-90 cm	90-145 cm	145-200 cm
Hidraulički parametri								
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	0,0002	0,0	0,0	0,105	0,0	0,0006	0,0006	0,0
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0,410	0,410	0,461	0,455	0,38	0,37	0,38	0,37
α (cm ⁻¹)	0,0385	0,00733	0,024	0,042	0,015	0,024	0,028	0,02
n	1,14	1,2	1,18	1,1	1,17	1,12	1,12	1,09
K_s (cm day ⁻¹)	19,6	2,8	353,1	4,8	14	5,8	7,9	3,8
ρ_b (g cm ⁻³)	1,32	1,4	1,26	1,495	1,5	1,5	1,38	1,38
Parametri izoproturona								
K_d (l kg ⁻¹)	1,49	1,69	2,28	1,05	0,42	0,35	0,25	0,25
M (day ⁻¹)	0,0361	0,0513	0,0673	0,0361	0,0062	0,0065	0,0	0,0

θ_r – rezidualna količina vode, θ_s – količina vode pri saturaciji tla, α i n – van Genuchten-Mualemovi parametri, K_s – hidraulička vodljivost u saturiranim uvjetima, K_d – koeficijent sorpcije, μ – brzina degradacije izoproturona, ρ_b – gustoća tla.

3.2. Pronos izoproturona

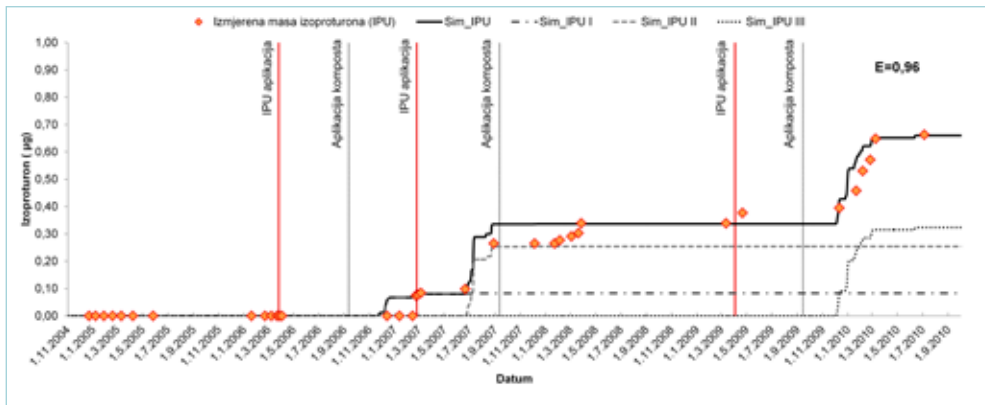
Nakon što je bilanca vode uspješno simulirana u tlu, započeo je postupak modeliranja dinamike izoproturona u tlu koristeći parametre sorpcije i degradacije prikazane u tablici 2. Nakon provedenih simulacija model je producirao velike količine izoproturona u isteku iz lizimetra, što je direktna posljedica niskih vrijednosti degradacije dobivenih na temelju laboratorijskih eksperimenata. Vrijeme pojave izoproturona je uspješno simulirano, dok je masa istoga bila prevelika u odnosu na terenska opažanja, što je dovelo do zaključka da laboratorijski mjerene vrijednosti izoproturona nisu reprezentativne za korištenje u poljskim uvjetima, te isto tako da predstavljaju jako osjetljiv parametar koji utječe na konačnu dinamiku izoproturona. Walker et al. (2002.) su prikazali kako vrijeme poluraspada izoproturona u poljskim uvjetima varira čak od 6 do 30 dana. Cheviron i Coquet (2009.) su proveli analizu osjetljivosti za degradaciju izoproturona kod tri tipa tla i zaključili kako je testirani model iznimno osjetljiv na navedeni parametar. Nakon provedenih simulacija zaključeno je kako je degradacija izoproturona vremenski i prostorno jako varijabilna, te se pristupilo s pretpostavkom kako je prilikom svake aplikacije izoproturona degradacija

pesticida imala različite vrijednosti. Primijenjene vrijednosti degradacije izoproturona su prikazane u tablici 3. Nakon provedenih simulacija primjenom temporalno varijabilne degradacije dobivena su jako dobra poklapanja s izmjerenim vrijednostima tijekom terenskih istraživanja s vrijednošću modela efikasnosti od 0,96 (slika 7). U modelu su korištene različite vrijednosti degradacije za svaku simulaciju pronosa izoproturona s obzirom na tri datuma aplikacija (Sim_IPU I; Sim_IPU II i Sim_IPU III), te je prikazana njihova sumarna krivulja (Sim_IPU). Prikazani rezultati ukazuju kako su u poljskim uvjetima prisutne velike varijacije u parametrima sorpcije i degradacije pesticida te ih svakako treba uzeti u obzir prilikom provedbe numeričkih simulacija. Temporalne razlike u degradaciji pesticida su odraz varijabilnosti mikrobiološke aktivnosti koja je prisutna u tlu u trenutku same aplikacije herbicida.

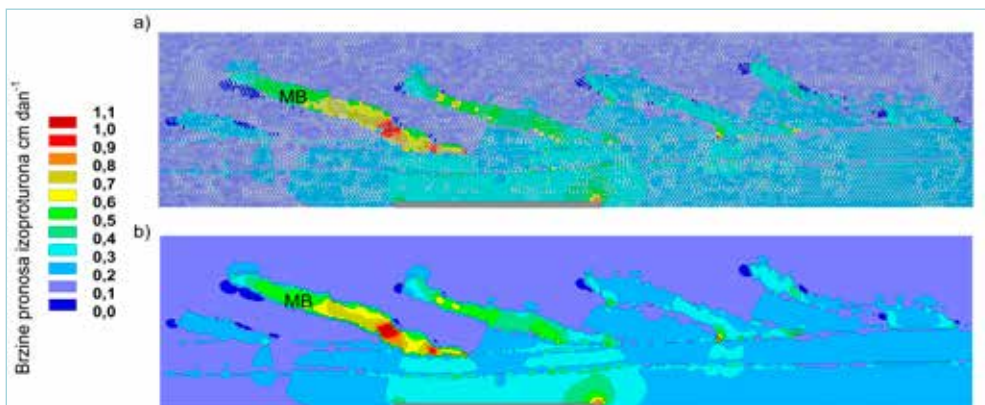
Na slici 8 su prikazane brzine pronosa izoproturona iz kojih je vidljivo kako su najveće brzine prisutne u prostoru međubrazda tla, što je odraz povećane hidrauličke vodljivosti prisutne u istim zonama tla (353 cm dan⁻¹, tablica 2), a posljedica je dodatka komposta koji je povećao poroznost tla i prisutnost makropora. Ovakva distribucija vrijednosti hidrauličke vodljivosti

Tablica 3. Brzina degradacije izoproturona korištena u numeričkim simulacijama prema različitom vremenu aplikacije izoproturona.

	Sloj/Struktura							
	Γ	Δ	MB	NS	E	BT (BT1 i BT2)	BTIC	IC
	0-28 cm		28-38 cm		38-50 cm	50-90 cm	90-145 cm	145-200 cm
<i>I. aplikacija (Sim_IPU I)</i>	0,0361	0,0361	0,0673	0,0513	0,0062	0,0065	0,0	0,0
<i>II. aplikacija (Sim_IPU II)</i>	0,274	0,274	0,511	0,389	0,0471	0,0494	0,0	0,0
<i>III. aplikacija (Sim_IPU III)</i>	0,252	0,252	0,471	0,359	0,0434	0,0455	0,0	0,0



Slika 7. Izmjerene (simboli) i simulirane (linije) vrijednosti kumulativne mase izoproturona (HYDRUS-2D) iz lizimetara tijekom razoblja 2004. – 2010. nakon primjene optimiziranih vrijednosti degradacije izoproturona.



Slika 8. Vektori brzine pronosa a) i vrijednosti brzine pronosa izoproturona b), na dan 6. veljače 2010. godine tijekom djelomične saturacije profila tla u sloju 0-45 cm.

uzrokovala je iniciranje preferencijalnih tokova oko Δ zona (kao posljedica manje vrijednosti hidrauličke vodljivosti od $2,8 \text{ cm dan}^{-1}$) i ubrzan tok vode u MB zonama. Ovim prikazom je vidljiva velika varijabilnost u hidrauličkim značajkama obradivog horizonta tla kao posljedica dodatka komposta i obrade tla. Preferencijalni tokovi nastali uslijed prisustva pukotina/makropora mogu ubrzati prodor onečišćivača do dubljih horizonata tla. Slične rezultate su dobili i Coquet et al. (2005. b) gdje su zbijene zone tla, nastale uslijed obrade i gaženja, uzrokovale preusmjeravanje toka prema propusnijim zonama.

4. ZAKLJUČAK

Kako bi se odredio utjecaj dodatka komposta i obrade tla na tok vode i kretanje herbicida izoproturona provedene su numeričke simulacije za period 2004. – 2010. pomoću HYDRUS-2D programa. Istraživanje je provedeno na temelju podataka prikupljenih na QualiAgro pokusnom polju koji su uključivali dugogodišnje mjerenje isteka vode iz lizimetara i koncentraciju izoproturona, količine vode u tlu te tlaka vode u tlu (2004. – 2010.). Nakon provedene kalibracije hidrauličkih parametara tla i korekcije vrijednosti transpiracije (modifikacijom indeksa lisne površine) uspješno je simuliran tok vode za razdoblje 2004.-2010. s vrlo visokom razinom efikasnosti ($E=0,99$). Primjenom laboratorijski mjerenih vrijednosti degradacije izoproturona nisu simulirane zadovoljavajuće vrijednosti

mase izoproturona te je izvršena vremenska modifikacija parametara degradacije s obzirom na datum aplikacije samog herbicida. Takav je pristup rezultirao vrlo dobrim poklapanjem modela i izmjerenih vrijednosti koncentracije izoproturona ($E=0,96$) te dovodi do zaključka kako se terenske vrijednosti degradacije značajno razlikuju od laboratorijskih, uz velike vremenske i prostorne oscilacije. Preferencijalni tokovi su inicirani u međubrazdama s najvećim vrijednostima hidrauličke vodljivosti uslijed velike poroznosti nastale dodatkom komposta, a kao posljedice usmjeravanja toka oko zbijenih zona tla. Kako su preferencijalni tokovi kroz makropore tla odgovorni za procjeđivanje najveće mase onečišćivača, važno ih je kvantificirati i locirati u profilu tla kako bi se zaštitili vodni resursi. S druge strane, dodatak komposta proizvedenog od kanalizacijskog mulja i zelenog bio-otpada povećao je degradaciju i sorpciju izoproturona u zonama koje su sadržavale najveće količine komposta i na taj način smanjio njegovo procjeđivanje.

ZAHVALA

Istraživanje je financirala Europska komisija u sklopu GENESIS projekta o mjerama zaštite podzemnih voda (FP7, broj ugovora 226536). Također zahvaljujemo Veolia Environment grupi na financijskoj podršci za dugogodišnja poljska istraživanja (QualiAgro). Zahvaljujemo i anonimnim recenzentima koji su doprinijeli publikaciji kvalitetnijeg rada. ■

LITERATURA

- Cheviron, B.; Coquet, Y. (2009.): Sensitivity analysis of transient-MIM HYDRUS-1D: case study related to pesticide fate in soils. *Vadose Zone Journal*, 8, 1064–79.
- Coquet, Y.; Coutadeur, C.; Labat, C.; Vachier, P.; van Genuchten, M.Th.; Roger-Estrade, J.; Šimůnek, J. (2005.a): Water and solute transport in a cultivated silt loam soil: 1. Field observations. *Vadose Zone Journal*, 4, 573–586.
- Coquet, Y.; Šimůnek, J.; Coutadeur, C.; van Genuchten, M.Th.; Pot, V.; Roger-Estrade, J. (2005.b): Water and solute transport in a cultivated silt loam soil: 2. Numerical analysis. *Vadose Zone Journal*, 4, 587–601.
- De wilde, T.; Mertens, J.; Spanoghe, P.; Ryckeboer, J.; Jaeken, P.; Springael, D. (2008.): Sorption kinetics and its effects on retention and leaching. *Chemosphere*, 72, 509–516.
- Dousset, S.; Thevenot, M.; Pot, V.; Šimůnek, J.; Andreux, F. (2007.): Evaluating equilibrium and non-equilibrium transport of bromide and isoproturon in disturbed and undisturbed soil columns. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94, 261–276.
- Filipović, V.; Coquet, Y.; Pot, V.; Houot, S.; Benoit, P. (2014.): Modeling the effect of soil structure on water flow and isoproturon dynamics in an agricultural field receiving repeated urban waste compost application. *Science of Total Environment*, 499, 546–559.
- Gårdenäs, A.I.; Šimůnek, J.; Jarvis N.; van Genuchten, M.Th. (2006): Two-dimensional modelling of preferential water flow and pesticide transport from a tile-drained field. *Journal of Hydrology*, 329, 647–660.
- Klute, A.; Dirksen, C. (1986.): Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph no. 9. ASA-SSSA: Madison, USA.
- Köhne, J.M.; Köhne, S.; Šimůnek, J. (2006.): Multi-process herbicide transport in structured soil columns: experiments and model analysis. *Journal of Contaminant Hydrology*, 85, 1–32.
- Manichon, H. (1982.): Influence of cropping systems on the cultivation profile: development of a diagnostic method based on morphological observation [in French]. PhD thesis, INRA, Paris.
- Manichon, H.; Roger-Estrade, J. (1990.): Characterization of soil structure and its evolution at short and medium term due to cropping system effects. [in French] In Picard D.; Combe L. (ed.) *Les systèmes de culture*. INRA Editions, Paris, 27–55.
- Mualem, Y. (1976.): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513–522.
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. (1970.): River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–90.
- Pot, V.; Benoit, P.; Etievant, V.; Bernet, N.; Labat, C.; Coquet, Y.; Houot, S. (2011.): Effects of tillage practice and repeated urban compost application on bromide and isoproturon transport in a loamy Albeluvisol. *European Journal of Soil Science*, 62, 797–810.
- Schneider, S.; Coquet, Y.; Vachier, P.; Labat, C.; Roger-Estrade, J.; Benoit, P.; Pot, V.; Houot, S. (2009.): Effect of urban waste compost application on soil near-saturated hydraulic conductivity. *Journal of Environmental Quality*, 38, 772–781.
- SOeS French national service for the environment (2012.): Groundwater contamination by pesticides [in French].
- Strudley, M.W.; Green, T.R.; Ascough, J.C. (2008.): Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil & Tillage Research*, 99, 4–48.
- Stumm, W.; Morgan, J.J. (1981.): *Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. John Wiley & Sons, New York.
- Šimůnek, J.; van Genuchten, M.Th.; Šejna, M. (2008.): Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal*, 7, 587–600.
- van Genuchten, M.Th. (1980.): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898.
- Vieublé-Gonod, L.; Benoit, P.; Cohen, N.; Houot, S. (2009.): Spatial and temporal heterogeneity of soil microorganisms and isoproturon degrading activity in a tilled soil amended with urban waste composts. *Soil Biology & Biochemistry*, 41, 2558–2567.
- Walker, A. (1974.): A simulation model for prediction of herbicide persistence. *Journal of Environmental Quality*, 3, 396–401.
- Walker, A.; Bromilow, R.H.; Nicholls, P.H.; Evans, A.A.; Smith, V.J.R. (2002.): Spatial variability in the degradation rates of isoproturon and chlorotoluron in a clay soil. *Weed Research*, 42, 39–44.

NUMERICAL SIMULATIONS OF ISOPROTURON TRANSPORT IN CONVENTIONAL SOIL CULTIVATION WITH COMPOST OBTAINED BY URBAN BIOLOGICAL WASTE RECYCLING

Abstract. The structural soil heterogeneity caused by agro-technical measures can have a large impact on water flow and sediment transfer. The main objective of the paper was to evaluate how the presence of different structural zones in the soil's arable layer affects the initiation of preferential water flows in the soil and to assess the impact of the herbicide isoproturon degradation rate on the dynamics of its transport.

Long-period data from the Polish trial (QualiAgro, 2004 - 2010) which applies compost obtained through urban biological waste recycling were used for the calibration and verification of the numerical model HYDRUS-2D. Water flow and isoproturon dynamics were successfully simulated after the calibration of hydraulic parameters and temporal optimization of the isoproturon degradation rate. Preferential flows occurred in interfurrows due to a high compost porosity resulting from the flow's direction around the soil's compacted zones. On the other hand, the addition of compost obtained through recycling of sewage sludge and green biological waste increased isoproturon degradation and sorption in areas containing the highest compost amounts, thus reducing its transport.

Key words: soil cultivation, compost application, water flow, isoproturon transport, numerical modelling, HYDRUS-2D

NUMERISCHE SIMULATIONEN DES ISOPROTURON-EINTRAGS BEI DER KONVENTIONELLEN BODENBEARBEITUNG MIT ANWENDUNG VON KOMPOST AUS KOMMUNALEM BIOABFALL

Zusammenfassung. Die strukturelle, durch agrotechnische Maßnahmen verursachte Heterogenität des Bodens kann einen großen Einfluss auf Wasserabfluss und Stoffeintrag haben. Das Hauptziel der Untersuchung war zu beurteilen, wie das Vorhandensein verschiedener Strukturzonen in der anbaufähigen Schicht auf das Auftreten von präferenziellen Fließwegen im Boden wirkt und wie der Abbau des Herbizids Isoproturon auf die Dynamik des Isoproturon-Eintrags wirkt. Die Daten, die auf einer langjährigen Felduntersuchung (QualiAgro, 2004-2010) basieren, wo Kompost aus dem kommunalen Bioabfall genutzt wurde, wurden zur Kalibrierung und Verifizierung des numerischen Modells HYDRUS-2D angewendet. Die Fließwege und die Dynamik des Isoproturons wurden erfolgreich nach der Kalibrierung der hydraulischen Parameter und zeitlicher Optimierung der Geschwindigkeit des Isoproturon-Abbaus simuliert. Die präferenziellen Fließwege traten in den Zwischenfurchen wegen der großen, nach der Beimischung von Kompost entstandenen Porosität des Bodens auf und sind Folge der Orientierung der Fließwege rund um die verdichteten Bodenbereiche. Auf der anderen Seite hat die Beimischung von Kompost aus Kanalisationsschlamm und Bioabfall den Abbau und die Adsorption von Isoproturon in den Bereichen beschleunigt, die die meisten Kompostmengen enthielten, und so wurde der Isoproturon-Eintrag vermindert.

Schlüsselwörter: Bodenbearbeitung, Kompostierung, Fließwege, Isoproturon-Eintrag, numerische Modellierung, HYDRUS-2D