

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

Simon HAJNC

**TOK VODE IN ONESNAŽEVAL SKOZI NENASIČENO
SREDINO**

Magistrsko delo
študijskega programa 2. stopnje
Tehniško varstvo okolja

Maribor, avgust 2016



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

TOK VODE IN ONESNAŽEVAL SKOZI NENASIČENO

SREDINO

Magistrsko delo

Študent: Simon HAJNC

Študijski program 2. stopnje: Tehniško varstvo okolja

Mentor: izr. prof. dr. Jure RAVNIK

Maribor, avgust 2016



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija

Številka: TVO-BM0011

Datum in kraj: 11.04.2016, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Uradni list RS, št. 44/2015 – UPB11) izdajam:

SKLEP O MAGISTRSKEM DELU

SIMONU HAJNCU, študentu študijskega programa 2. stopnje **Tehniško varstvo okolja**, se dovoljuje izdelati magistrsko delo.

Tema magistrskega dela je pretežno s področja **Katedre za energetsko, procesno in okoljsko inženirstvo**.

Mentor: **izr. prof. dr. Jure Ravnik**

Datum veljavnosti teme: **15.05.2016**

Tema podaljšana: **15.05.2017**

Naslov magistrskega dela: **Tok vode in onesnaževal skozi nenasičeno sredino**

Naslov magistrskega dela v angleškem jeziku: **Flow of water and pollutants through unsaturated zone**

Magistrsko delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo magistrskega dela« in ga do 15.5.2017 v treh izvodih oddati v pristojni referat za študentske zadeve.

V skladu z Navodili o pripravi in oddaji e-diplom je potrebno magistrsko delo oddati v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 15 dni.



Dekan:

red. prof. dr. Bojan Dolšek

Obvestiti:
- kandidata
- mentorja
- odložiti v arhiv

IZJAVA

Podpisani _____ Simon HAJNC _____, izjavljam, da:

- je magistrsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- da je predloženo delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe po študijskem programu druge fakultete ali univerze,
- da so rezultati korektno navedeni,
- da nisem kršil-a avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih,
- da soglašam z javno dostopnostjo magistrskega dela v Knjižnici tehniških fakultet ter Digitalni knjižnici Univerze v Mariboru, v skladu z Izjavo o istovetnosti tiskane in elektronske verzije zaključnega dela.

Maribor, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Juretu RAVNIKU za pomoč in vodenje pri opravljanju magistrskega dela. Zahvaljujem se tudi staršem, ki so mi omogočili študij.

TOK VODE IN ONESNAŽEVAL SKOZI NENASIČENO SREDINO

Ključne besede: HYDRUS 1D, simulacija toka vode in onesnaževala skozi nenasičeno cono, veriga razpada urea, nitrifikacija, nitrat v podzemni vodi, Apaško polje

UDK: [519.6:536.54]:628.19(043.2)

POVZETEK

V magistrskem delu smo naredili simulacije toka padavinske vode in onesnaževala skozi nenasičeno cono vodonosnika na Apaškem polju s programom HYDRUS 1D. V ta namen smo pregledali obstoječo zakonodajo in navedli pomembne člene posamičnih uredb. Prav tako smo opisali teoretično dogajanje v nenasičeni coni, podrobneje obravnavali dušikov cikel v njej in fizikalni princip toka tekočine in transporta onesnaževala. Kot onesnaževalo smo v magistrski nalogi upoštevali razpadajoče gnojilo urea. Gnojilo urea razpade vse do nitrata, kateri je problematičen v vodonosniku na Apaškem polju. Izdelana je bila tudi validacija modela na primeru nitrifikacijske verige. Simulacije smo naredili za dva različna profila tal, in sicer za profil tal v Podgradu in profil tal v Segovcih ob Muri.

FLOW OF WATER AND POLLUTANTS THROUGH UNSATURATED ZONE

Key words: HYDRUS 1D, simulation of water and pollutants flow through unsaturated zone, urea decay chain, nitrification chain, nitrate in groundwater, Apaško polje

UDK: [519.6:536.54]:628.19(043.2)

ABSTRACT

Using the software HYDRUS 1D, we made simulations of water and pollutants flow through unsaturated aquifer zone of Apaško polje. We reviewed existing legislation and stated relevant articles of the acts. We described the action in unsaturated zone, described nitrogen cycle and the flow of water and pollutants. As its final stage represents nitrate, we used urea decay chain mechanism as pollutant source. Nitrate is problematic in most aquifers. We also made validation on example of nitrification chain. Simulations were made for two different soil profiles. The first soil profile was made for Podgrad and second soil profile was made for Segovci ob Muri.

KAZALO

1	UVOD.....	13
2	PREGLED ZAKONODAJE.....	16
2.1	UREDBA o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Apaškega polja.....	16
2.2	Pregled pravilnika o pitni vodi	18
2.3	Kakovost podzemne vode v vodnem telesu Murska kotlina.....	19
3	TEORETIČNE OSNOVE.....	22
3.1	Nenasičen del Zemlje.....	22
3.2	Dušik v tleh	25
3.2.1	Izbira gnojila.....	26
4	FIZIKALNI OPIS TOKA FLUIDA V NENASIČENI CONI	28
4.1	Osnove toka tekočine skozi nenasičeno cono.....	28
4.2	Vodilne enačbe toka vode	29
4.3	Nenasičene hidrološke lastnosti tal.....	30
4.3.1	Histereza pri hidravličnih lastnostih tal	31
4.4	Začetni in robni pogoji.....	31
4.4.1	Neodvisni robni pogoj	31
4.4.2	Odvisni robni pogoj.....	32
4.5	Transport topljenca in verižni razpad topljenca, reakcije prvega reda.....	32
4.5.1	Robni pogoji.....	34
4.5.2	Učinek disperzijskega koeficienta.....	35
4.6	Numerična rešitev enačbe spremenljivo nasičenega toka.....	35
4.6.1	Numerična rešitev enačbe transporta topljenca.....	36
5	RAZISKOVALNI DEL MAGISTRSKE NALOGE	37
5.1	Obravnavano območje modela	37

5.1.1	Sestava tal na obravnavanih območjih.....	39
5.1.2	Padavine na obravnavanem območju	39
5.2	Validacija računalniškega modela na primeru	41
5.2.1	Rezultati validacije	42
5.3	Izdelava računalniškega modela.....	43
5.4	Predstavitev scenarijev.....	48
6	REZULTATI	49
6.1	Rezultati Podgrad	49
6.1.1	Scenarij 1	49
6.1.2	Scenarij 2	49
6.1.3	Scenarij 3	50
6.1.4	Scenarij 4	51
6.1.5	Scenarij 5	51
6.1.6	Scenarij 6	52
6.2	Rezultati Segovci ob Muri.....	53
6.2.1	Scenarij 1	53
6.2.2	Scenarij 2	54
6.2.3	Scenarij 3	54
6.2.4	Scenarij 4	55
6.2.5	Scenarij 5	55
6.2.6	Scenarij 6	56
6.3	Primerjava rezultatov	57
6.3.1	Primerjava rezultatov za Podgrad	57
6.3.2	Primerjava rezultatov za Segovce ob Muri.....	59
7	DISKUSIJA	62
8	SKLEP	63
9	LITERATURA.....	64

UPORABLJENI SIMBOLI

a_v	–	vsebnost zraka
c	–	koncentracija topljenca
c'	–	aproksimiran končni element od c
c_n	–	vrednost koncentracije v vozlišču n
D	–	dejanski disperzijski koeficient od matrike tal
D^g	–	difuzijski koeficient plinaste faze
D^w	–	disperzijski koeficient topljenca v tekoči fazi
D_g	–	koeficient molekulske difuzije v plinasti fazi
D_L	–	longitudinalna disperzivnost
D_w	–	koeficient molekularne difuzije v vodi
E	–	maksimalna stopnja evaporacije pod danimi atmosferskimi pogoji
g	–	koncentracija v plinasti fazi
g	–	gravitacijski pospešek
h	–	tlačna višina
h_A	–	minimalna tlačna višina, dovoljena na površini tal
h_i	–	začetno stanje tlaka (izraženo kot tlačna višina)
h_S	–	maksimalna tlačna višina, dovoljena na površini tal
h_0	–	površinski robni pogoj, predpisan s tlačno višino
k	–	k -ti člen verige
K	–	nenasičena hidravlična prevodnost tal
K_r	–	relativna hidravlična prevodnost tal
K_S	–	nasičena hidravlična prevodnost
K_{vh}	–	izotermna hidravlična prevodnost pare
K_{vT}	–	hidravlična prevodnost termalne pare
l	–	parameter povezljivosti por
L	–	x-koordinata za površino tal nad določeno referenčno ravnino
m	–	parameter zadrževanja vode v tleh
n	–	eksponent za zadrževanje vode v tleh
N	–	skupno število vozlišč
q	–	Darcyjeva hitrost toka tekočine

q_0	–	robni pogoj toka vode na dnu profila tal
s	–	adsorbirana koncentracija topljenca
S	–	odtočni člen v enačbi toka
S_e	–	dejansko nasičenje
t	–	čas
t_0	–	začetni čas simulacije
T	–	temperatura
v	–	povprečna hitrost vode v porah
x	–	prostorska koordinata
α	–	parameter zadrževanja vode v tleh
β	–	empirična konstanta v adsorpciji izoterme
γ_g	–	konstanta ničnega reda topljenca v plinasti fazi
γ_s	–	konstanta ničnega reda za adsorbcijo topljenca na trdo fazo
γ_w	–	konstanta ničnega reda topljenca v tekoči fazi
ϑ	–	volumetrična vsebnost vode
ϑ_r	–	preostala vsebnost vode v tleh
ϑ_s	–	nasičena vsebnost vode v tleh
ϑ_T	–	skupna volumetrična vsebnost vode in pare
ϑ_v	–	volumetrična vsebnost vodne pare
μ_g	–	konstanta prvega reda za topljenec v plinasti fazi
μ_s	–	konstanta prvega reda za adsorbcijo topljenca na trdo fazo
μ_w	–	konstanta prvega reda za topljenec v tekoči fazi
μ_g'	–	konstanta razpada prvega reda v verigi za topljenec v plinasti fazi
μ_s'	–	konstanta razpada prvega reda v verigi za topljenec v trdni fazi
μ_w'	–	konstanta razpada prvega reda v verigi za topljenec v tekoči fazi
ρ	–	Bulkova gostota za porozni medij
τ_g	–	faktor zakrivljenosti za plinasto fazo
τ_w	–	faktor zakrivljenosti za tekočo fazo

UPORABLJENE KRATICE

- ARSO – Agencija Republike Slovenije za okolje
- IEI – Institut za ekološki inženiring, d. o. o.
- KAN – kalcijev amonitrat
- VRPAP – vodonosnika Vrbanski plato in Apaško polje, orodja za zagotavljanje vodnih virov

1 UVOD

Molekula vode je sestavljena iz treh atomov: enega atoma kisika (O) in dveh atomov vodika (H). Vodikova atoma sta s kisikovim atomom povezana s kovalentno vezjo. Zaradi razlike v elektro negativnosti atoma kisika in vodika je molekula vode di polarna. To pomeni, da ima molekula na različnih koncih molekule različen električni naboj, zato se negativen del molekule (O) poveže s pozitivnim delom (H) druge molekule in se med molekulama tvori vodikova vez. Molekule vode se na tak način povezujejo v večje skupke. V naravi pa nimamo opravka s čisto vodo (H_2O), temveč le-ta vsebuje tudi različne snovi. Voda v naravi kroži, s tem pa se spreminja tudi njena sestava. Voda v naravi lahko vsebuje anorganske in organske snovi, mikroorganizme ter raztopljene pline. Te snovi so lahko v vodi kot posledica naravnih izvorov ali pa kot posledica človeške dejavnosti. [10]

Ljudje največkrat za pitno vodo uporabljamo načrpano vodo iz podzemnih voda. Slovenija ima dobro ohranjene zaloge podzemnih voda v plitvejših vodonosnih slojih. Te vode so v Sloveniji najpomembnejši vodni vir, z njimi pa se oskrbuje kar 97 % prebivalcev Slovenije [16]. Ravno tako pa so te vode pomembne za industrijo, kjer se uporabljajo kot tehnološke vode in v kmetijstvu, kjer se mnogokrat uporabljajo za napajanje živali ter za namakanje. Ker je Slovenija bogata s podzemnimi vodami, večjih težav pri oskrbi ljudi s pitno vodo ne poznamo, razen lokalno in občasno. V svetu se poraba podzemne vode povečuje hitreje, kot se je ta voda sposobna obnavljati, zato je treba z danimi dobrinami Zemlje skrbno gospodariti. [16]

Kot je bilo že omenjeno, so številne snovi, ki so nezaželeni v vodi, prisotni zaradi raznovrstne človeške dejavnosti, kot so: neposredni ali posredni izpusti snovi v okolje, kmetijstvo, industrija, obrt, odlagališča odpadkov, gradbeni posegi ... Kakovost podzemne vode je zraven človeške dejavnosti odvisna tudi od naravnih mehanizmov filtracije vode. [16]

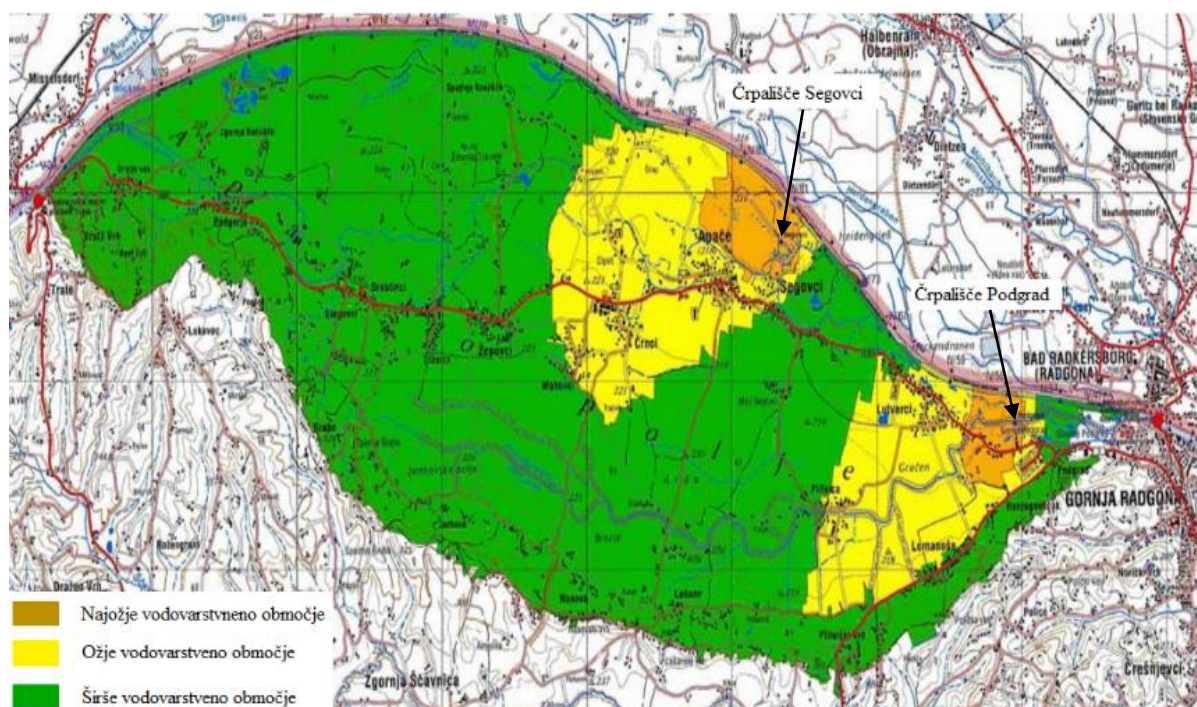
Onesnaženost podzemne vode oziroma njena kakovost je odvisna od transporta padavinske in drugih površinskih voda skozi nenasičeno cono vodonosnika ter od kamninske sestave vodonosnika skupaj s hidravličnimi karakteristikami vodonosnika. Velikost por nenasičene cone, hitrost pretoka, vrste kamnine, fizikalno-kemijske razmere v nenasičeni coni vodonosnika (pH, vsebnost kisika, električna prevodnost ...) vplivajo na kemijsko sestavo podzemne vode, zato je različna v posameznih tipih vodonosnikov. [16]

Na sestanku, na katerem smo bili udeleženi kot sodelujoči študentje na projektu VRPAP – Vodonosnika Vrbanski plato in Apaško polje, orodja za trajnostno zagotavljanje vodnih virov,

v okviru projektov »Po kreativni poti do praktičnega znanja«, je župan Občine Apače obrazložil problematiko oskrbe s pitno vodo v Občini Apače, ki jo povzemamo v nadaljevanju.

Vodonosnik Apaškega polja se geografsko razteza med reko Muro in hribom, ki obdajata Apaško dolino od severozahoda do jugovzhoda Apaškega polja. Tako reka Mura na eni strani in hrib na drugi strani vodonosniku predstavljata neprepustno mejo, hkrati pa napajata sam vodonosnik na Apaškem polju. Površje nad vodonosnikom, ki se nahaja med Konjiščem in Gornjo Radgono, enakomerno pada v smeri toka reke Mure.

V Apaški dolini se ljudje v veliki večini ukvarjajo z kmetijstvom, posledično pa so v vodi vodonosnika prisotni pesticidi, nitrati in druge snovi za zatiranje škodljivcev in plevela ter gnojenje pridelka. V magistrskem delu smo se osredotočili na problematiko nitrata v vodi, tako smo v nadaljevanju pod naslovom »Kakovost podzemne vode v vodnem telesu Murska kotlina« predstavili izmerjene vrednosti nitrata v podzemni vodi.



Slika 1.1 Apaška dolina in vodovarstvena območja [25]

S pomočjo računalniškega modeliranja toka padavinske vode in onesnaževala skozi nenasičeno sredino vodonosnika smo želeli ugotoviti vpliv gnojenja kmetijskih površin na kakovost podzemne vode na omenjenem vodonosniku. Z računalniškim programom HYDRUS 1D smo izdelali dva računalniška modela, enega za črpališče v Segovcih ob Muri ter drugega za črpališče v Podgradu.

Za onesnaževalo, ki potuje skozi nenasičeno cono vodonosnika, smo uporabili gnojilo urea, ki razpade vse do nitrata. Predpostavili smo, da se gnojilo za gnojenje prsti pred sajenjem

pridelka uporabi 2-krat in za dognojevanje 2-krat. Pri tem smo skušali ugotoviti razliko v obsegu onesnaženja podzemne vode, če uporabnik gnojila upošteva priporočene vrednosti uporabe gnojila za gnojenje in dognojevanje koruze in če uporabnik gnojila upošteva uredbo o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Apaškega polja.

2 PREGLED ZAKONODAJE

2.1 UREDBA o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Apaškega polja

Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Apaškega polja določa vodovarstveno območje za vodno telo vodonosnika Apaškega polja in vodovarstveni režim. Vodno telo vodonosnika Apaškega polja se nahaja na območju občin Apače in Gornja Radgona. Vodonosnik se uporablja za oskrbo prebivalcev s pitno vodo. [23]

V magistrskem delu smo obravnavali potovanje onesnaževala oziroma razpadajočega gnojila skozi nenasičeno sredico vodonosnika, tako smo se osredotočili na člene uredbe, ki se navezujejo na kmetijska zemljišča. Nam pomembni členi te uredbe so: 14.a člen, 14.b člen, 14.c člen, 15. člen, 15.a člen in 15.b člen.

14.a člen se navezuje na notranje vodovarstveno območje, kjer se nahajajo kmetijske površine in prepoveduje (iz Uredbe o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Apaškega polja, 2013, 14.a člen):

- »gnojenje brez gnojilnega načrta,
- gnojenje z ostanki greznic, malih komunalnih čistilnih naprav, komunalnih ali skupnih čistilnih naprav,
- gnojenje z blatom, ki nastaja na kmetijskem gospodarstvu in je mešanica komunalne odpadne vode, gnojnice in gnojevke, ne glede na čas njegovega skladiščenja ...
- uporabo komposta in pregnitega blata 2. razreda okoljske kakovosti, določenega v skladu s predpisom, ki ureja obdelavo biološko razgradljivih odpadkov,
- uporabo blata, določenega v skladu s predpisom, ki ureja uporabo blata iz komunalnih čistilnih naprav v kmetijstvu.«

14.b člen iste uredbe govori o najožjih vodovarstvenih območjih, kjer za kmetijska zemljišča prepoveduje tudi (iz Uredbe o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Apaškega polja, 2013, 14.b člen):

- »gnojenje z gnojnico in gnojevko,
- preoravanje trajnega travinja, razen travinja (trave, detelje, deteljno-travne mešanice in travno-deteljne mešanice), ki je vključeno v kolobar,
- uporaba mineralnih gnojil, ki vsebujejo dušik od spravila pridelka do 1. marca,

- uporabo komposta in pregnitega blata 1. razreda kakovosti, določenega v skladu s predpisom, ki ureja obdelavo biološko razgradljivih odpadkov,
- namakanje z vodo, ki so ji dodana rastlinska hranila, razen če gre za pridelovanje rastlin pod zaščitno folijo.«

14.b člen te uredbe navaja, da na najožjih delih vodovarstvenega območja letni vnos dušika iz uležanega hlevskega gnoja na enoto rabe kmetijskega zemljišča ne sme presegati 140 kg N/ha. Ravno tako določuje uporabo mineralnih gnojil, ki vsebujejo dušik in se na najožjih vodovarstvenih območjih lahko uporabljajo zunaj časovnih prepovedi, če so upoštevane naslednje točke [23]:

- največja dovoljena količina dušika za okopavine pri začetnem gnojenju pred setvijo ne sme presegati 30 kg N/ha,
- za dognojevanje okopavin ne sme največji odmerek dušika presegati 80 kg N/ha,
- enkraten vnos dušika z dognojevanjem za ozimine spomladi ne sme presegati 60 kg N/ha, medtem ko je vnos dušika v tla z mineralnimi gnojili jeseni prepovedan,
- največja dovoljena količina dušika za trajno travinje in travinje v okviru poljedelskega kolobarja ne sme presegati 50 kg N/ha na vsako košnjo,
- enkraten vnos dušika z dognojevanjem za trajne nasade ne sme presegati 60 kg N/ha,
- največja dovoljena količina dušika za zelenjadnice pri začetnem gnojenju ne sme presegati 40 kg N/ha, medtem ko enkraten vnos dušika za dognojevanje ne sme presegati 60 kg N/ha.

Ravno tako morajo biti kmetijska zemljišča na najožjih vodovarstvenih območjih celo leto pokrita z zeleno odejo. 14.b člen te uredbe prav tako navaja določila za izvajanje paše živine na kmetijskih površinah na najožjih vodovarstvenih območjih. Pri paši živine na ograjenih pašnih površinah se mora upoštevati slednje [23]:

- dokrmeljevanje živali ni dovoljeno,
- namestitev solnika in napajanje živali morata biti urejena na način, da se premeščata po pašni površini,
- v primeru uničenja pašne površine zaradi gaženja je treba pašo prekiniti.

14.c člen uredbe o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Apaškega polja določuje uporabo mineralnih gnojil, ki vsebujejo dušik na kmetijskih zemljiščih, ki se nahajajo na ožjih in širših vodovarstvenih območjih. Te se morajo uporabljati tako, da enkraten vnos

dušika pri začetnem gnojenju ne presega 60 kg N/ha, pri dognojevanju pa ne presega 80 kg N/ha. [23]

15. člen, 15.a člen in 15.b člen te uredbe govorijo o uporabi fitofarmaceutskih sredstev za zatiranje škodljivih organizmov na kmetijskih zemljiščih. Seznam fitofarmaceutskih sredstev, ki jih je dovoljeno uporabljati, izda ministrstvo za kmetijstvo skupaj z ministrstvom, pristojnim za zdravje. [23]

2.2 Pregled pravilnika o pitni vodi

Ker se vodni črpališči Podgrad in Segovci ob Muri uporabljata za napajanje sistema za oskrbo s pitno vodo Pomurja, je smiselno pregledati pravilnik o pitni vodi.

V drugem členu pravilnika o pitni vodi je definiran pojem pitna voda. Pitna voda je voda, ki je v svojem prvotnem stanju ali po predhodni obdelavi namenjena pitju, pripravi hrane ali drugim gospodinjanskim namenom. To velja ne glede na poreklo vode, ki je lahko iz vodovodnega omrežnega sistema za oskrbo s pitno vodo, cistern ali predhodno pakirana voda. Pitna voda je prav tako voda, ki se uporablja za proizvodnjo in promet z živili. [17]

3. člen pravilnika o pitni vodi predpisuje, kdaj je voda zdravstveno ustrezna [17]:

- voda je zdravstveno ustrezna, kadar ne vsebuje mikroorganizmov, zajedavcev ter njihovih razvojnih oblik v količinah, ki so nevarne za zdravje ljudi,
- voda je zdravstveno ustrezna, kadar koncentracija posameznih snovi ali skupaj z drugimi snovmi ne predstavlja nevarnosti za zdravje ljudi in
- voda je zdravstveno ustrezna, kadar je v skladu z zahtevami parametrov in mejnimi vrednostmi parametrov (mikrobiološkimi in kemijskimi parametri), ki jih najdemo v prilogi I tega pravilnika.

V spodnjih dveh tabelah (tabela 2.1 in tabela 2.2) so podane zahteve mikrobioloških in nekaj kemijskih parametrov. Za potrebe magistrskega dela so nam pomembni predvsem nitrati in nitriti.

Tabela 2.1 Mikrobiološki parametri in mejne vrednosti parametrov [17]

Parameter	Mejna vrednost parametra
Escherichia coli (E. coli)	0/250 ml
Enterokoki	0/250 ml
Pseudomonas aeruginosa	0/250 ml
Število kolonij 22 °C	100/ml
Število kolonij 37 °C	20/ml

Tabela 2.2 Nekateri kemijski parametri in mejne vrednosti le-teh [17]

Parameter	Mejna vrednost parametra	Enota
Arzen	10	µg/l
Baker	2,0	mg/l
Benzen	1,0	µg/l
1,2 dikloroeten	3,0	µg/l
Kadmij	5,0	µg/l
Nitrat	50 ¹	mg/l
Nitrit	0,50 ¹	mg/l
Selen	10	µg/l

2.3 Kakovost podzemne vode v vodnem telesu Murska kotlina

Črpališči Podgrad in Segovci ob Muri črpata podzemno vodo iz vodonosnika Apaškega polja, ta pa je del vodnega telesa Muske kotline. Kakovost podzemnih voda v tem delu Slovenije je ena izmed najnižjih kakovosti podzemnih voda. Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), ki izvaja monitoring in spremlja kakovost podzemnih voda v Sloveniji, je v letih od 2007 do 2013 vodno telo Muska kotlina zmeraj ocenila kot slabo. [12]

Pri oceni kakovosti podzemnih vodnih teles se ocenjuje kemijsko stanje vodnega telesa. Sem sodi tudi obremenjenost z nitrati in pesticidi, prvi se množično uporabljajo na kmetijskih površinah za gnojenje in dognojevanje, medtem ko se pesticidi uporabljajo predvsem za zatiranje raznih škodljivcev.

¹ Pogoj mejne vrednosti je, da velja $[\text{NO}_3]/50 + [\text{NO}_2]/3 \leq 1$, pri čemer so vrednosti za nitrat in nitrit izražene v mg/l. Za nitrato mora biti dosežena vrednost 0,10 mg/l v vodi na izstopu iz naprave za pripravo pitne vode.

Tabela 2.3 Standard kakovosti za oceno kemijskega stanja podzemne vode [12]

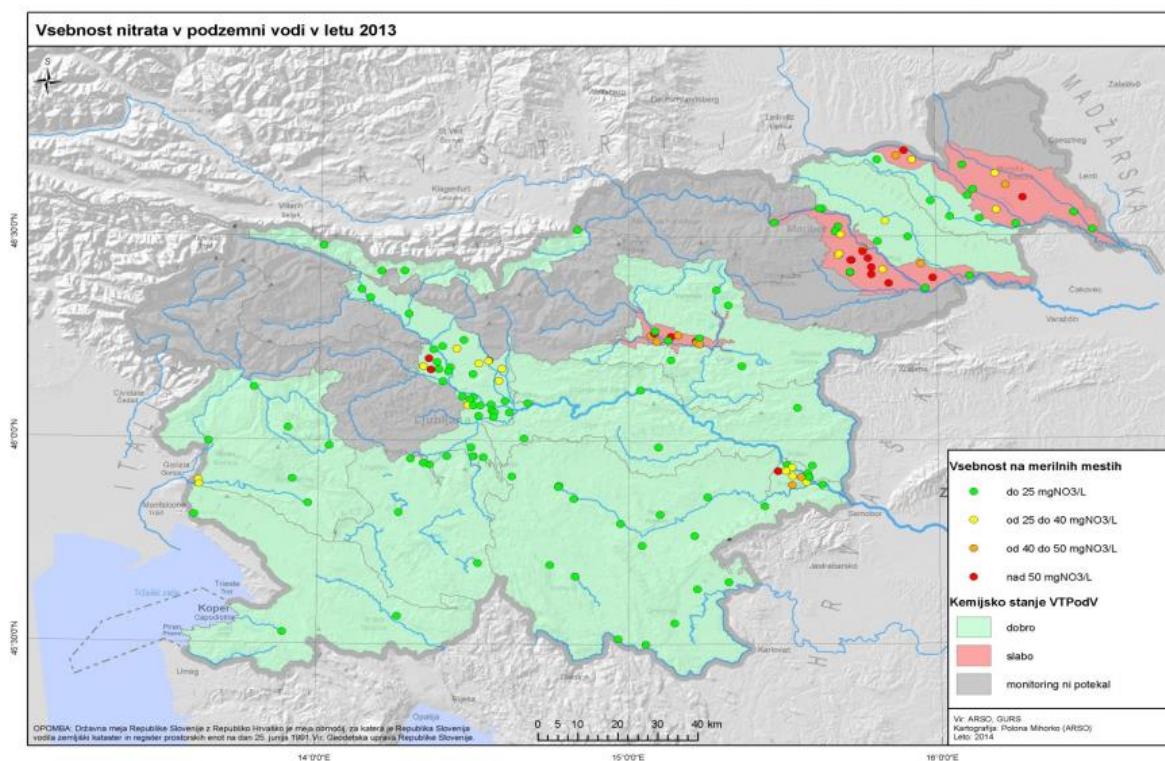
Parameter	Standard kakovosti	Enota
Nitrat	50	mg NO ₃ ⁻ /l
Posamezni pesticidi in njegovi relativni razgradni produkti	0,1	µg/l
Vsota vseh izmerjenih pesticidov in njihovih relativnih razgradnih produktov	0,5	µg/l

Kemijsko stanje vodnega telesa v Murski kotlini je bilo za leto 2013 neustrezno. Prav tako so bile prekoračene vrednosti nitrata v podzemni vodi (nad 50 mg NO₃⁻/l), kar je razvidno iz slike 2.1. Prekoračena vrednost nitrata je bila tudi na območju Apaškega polja, ki je predmet magistrskega dela [12]. Iz povprečnih vrednosti nitrata, ki jih prikazuje tabela 2.4, je razvidno, da vrednost nitrata v nekaterih obdobjih od leta 2000 do 2013 presega predpisano vrednost. Povprečna vrednost za to obdobje pa je nižja kot predpisana vrednost 50 mg NO₃⁻/l. [19]

Tabela 2.4 Povprečne vrednosti nitrata za Apače v obdobju 2000–2013 [19]

Leto	Povprečna vrednost nitrata [NO ₃ ⁻ /l]
2000	46,2
2001	51,7
2002	42,0
2003	65,9
2004	70,8
2005	33,5
2006	66,5
2007	49,5
2008	50,0
2009	58,0
2010	29,5
2011	39,0
2012	30,0
2013	44,8

Agencija Republike Slovenije za okolje izvaja letne meritve na posameznih merilnih mestih vodonosnikov po vsej državi. Izmerjeni vrednosti nitrata v vodonosniku Apače na merilnem mestu Segovci ob Muri sta bili za lansko leto narejeni 4. 6. 2014 in 7. 10. 2014. Vrednost nitrata prve meritve je znašala 84 mg NO₃⁻/l, druge pa 39 mg NO₃⁻/l [15].

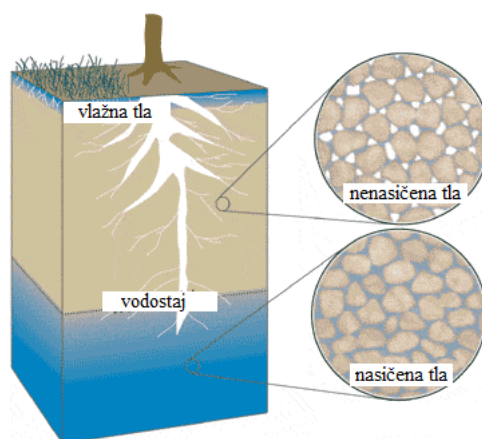


Slika 2.1 Vsebnost nitrata v podzemni vodi v letu 2013 [12]

3 TEORETIČNE OSNOVE

3.1 Nenasičen del Zemlje

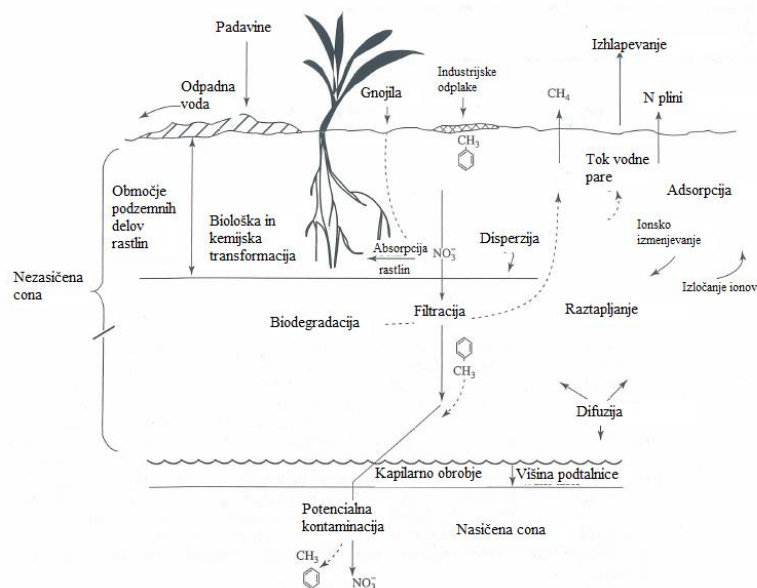
Nenasičena cona je območje, ki se razteza od površine Zemlje do kapilarnega obrobja. V območju nenasičene cone vlada nižji tlak od atmosferskega in nižja vlažnost od nasičenosti. Pore v nenasičeni coni lahko zraven vode vsebujejo tudi zrak in druge pline. [11]



Slika 3.1 Nenasičena in nasičena plast Zemlje [2]

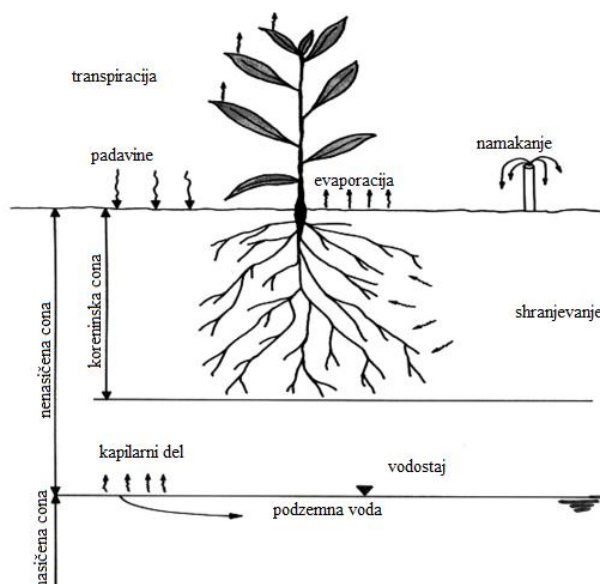
Nenasičena cona je izjemno pomembna s stališča skladiščenja vode, rastlinskih hranil in drugih snovi za rastline, torej igra pomembno vlogo v biosferi. S hidrološkimi raziskavami je bilo že v preteklosti ugotovljeno, da ta plast Zemlje nadzoruje prenos vode iz površine Zemlje do podzemnih voda, kakor tudi od podzemnih voda nazaj na površino. Tako je kontrolni dejavnik za količino vode, ki napolni vodonosnik. Pogosto nenasičeno cono primerjamo s filtrom, ki odstranjuje nezaželene snovi, preden imajo le-te vpliv na vodonosnik podzemne vode. Sicer trditev drži, vendar se je treba zavedati, da so procesi transporta vode med površinskimi in podzemnimi vodami zelo dobro učinkoviti v primerjavi s procesi odstranjevanja onesnaževala. [22]

Nenasičena cona je ključnega pomena za človeške aktivnosti, kot so poljedelstvo, gnojenje rastlin, odlaganje odpadkov in gradnja stavb. V nenasičeni coni zraven obstajajo različnih transportnih sistemov obstajajo različne interakcije, kot so kemijske reakcije, termične interakcije in biološka aktivnost. Kemijske reakcije so vključene tako pri naravnih kakor tudi pri umetnih snoveh. Biološka aktivnost pa obstaja kot aktivnost rastlinskih korenin, črvov živih mikroorganizmov in drugih organizmov. [22]



Slika 3.2 Poenostavljen prikaz hidroloških plasti in procesov v nenasičenem delu Zemlje [11]

Koreninska plast nenasičene cone vsebuje velike populacije bakterij in drugih mikrobov, ki se zadržujejo v bližini korenin rastlin in delajo koreninsko plast zelo dinamično. Običajno je koreninska plast debeline približno 1 m. Debelina nenasičene plasti Zemlje je lahko zelo globoka ali zelo plitva, odvisno od geografske lokacije. Prav tako pa je debelina nenasičene cone odvisna od sestave oziroma od tega, kolikšen del koreninske plasti vsebuje nenasičena cona (slika 3.3). [8]



Slika 3.3 Shematski prikaz različnih hidroloških plasti in vodnih tokov [6]

Kot že prikazuje Slika 3.3, potekajo v tleh vodni tokovi. Tla so sestavljena iz različnih snovi, ki so lahko v različnih agregatnih stanjih [18]:

- snovi v trdnem stanju, kot so mineralni in organski delci,
- snovi v plinastem stanju – zrak v tleh in
- snovi v tekočem stanju oziroma talna raztopina – voda v tleh in v njej raztopljene mineralne in plinaste snovi.

Med posameznimi minerali in organskimi delci, ki jih lahko poimenujemo tudi skupki ali agregati, se nahajajo pore. Pore so prazni volumni med posameznimi agregati in jih zapolnjuje zrak ali talna raztopina. Obstajata dosegljiv volumen por – to je tisti volumen, ki ga lahko zrak in voda zapolnita, ter blokiran volumen por – to je tisti volumen, ki se lahko zapolni z vodo in se izsuši pod pogojem, da se pri tem uničijo agregati, ki tla sestavljajo. [18]

Brigs je definiral vodo v tleh tako, da jo je ločil na to, kako močno je vezana na talne delce. Tako obstaja [18]:

- higroskopna voda: je voda, ki je v obliki vodnih hlapov adsorbirana na površini talnih delcev pod vplivom privlačnih sil na površini teh delcev;
- kapilarna voda: je voda, ki pod vplivom površinske napetosti obdaja talne delce kot prevleka, torej se zadržuje med njimi in se nabira v kapilarah;
- gravitacijska voda: je voda, ki se v zgornjih plasteh zadržuje le začasno in pod vplivom teže odteče v podtalnico.

Vodne tokove v tleh omogočajo pore in rastline. Tako prihaja do izhlapevanja oziroma evaporacije in transpiracije, kar se z eno besedo imenuje evapotranspiracija. [18]

Izhlapevanje je prehod vode v obliki vodne pare iz Zemlje ali vodne površine v atmosfero. Izhlapevanje oziroma evaporacija je odvisna od številnih dejavnikov, kot so [18]:

- temperatura zraka,
- relativna vlaga,
- temperatura površine,
- vetrovnih razmer,
- sončnega obsevanja,
- razpoložljive vode.

Transpiracija pa je tok vode, ki poteka v obliki vodne pare skozi listne reže v atmosfero. Odvisna je od enakih dejavnikov kot evaporacija, prav tako pa tudi od lastnosti rastlin. [18]

Kot smo že omenili, nenasičen del Zemlje vsebuje tudi zrak v tleh. Sestava zraka v tleh ni konstantna, odvisna je od kemijskih in bioloških procesov v tleh. V grobem je zrak v tleh sestavljen iz [18]:

- dušika: 78–87 volumskih %,
- kisika: 10–20 volumskih % in
- CO₂: 0,01–15 volumskih %.

Kemijski in biološki procesi v tleh, ki vplivajo na sestavo zraka v tleh, so odvisni od [18]:

- teksture in strukture tal,
- volumna por, od katerega je odvisno, kako se meša in giblje zrak v tleh,
- temperature, kjer so procesi v tleh aktivnejši pri višjih temperaturah, s čimer se sprošča več CO₂ in je posledično manj kisika,
- vodnosti tal in
- biološke aktivnosti tal oziroma porabe kisika in dušika bakterij.

3.2 Dušik v tleh

V magistrski nalogi smo obravnavali tok vode in onesnaževala skozi nenasičeno sredino vodonosnika. Kot onesnaževalo smo obravnavali razpadanje gnojila v nitrat (NO₃⁻) v podzemni vodi, ki je posledica gnojenja pridelka na kmetijskih površinah. Obravnavano področje je bila Apaška dolina, kjer se ljudje v veliki večini ukvarjajo s kmetijstvom. Za povečanje svojega pridelka kmetje uporabljajo razna gnojila, med njimi tudi dušikova gnojila. Najpogosteje uporabljeni dušikovi gnojili sta KAN in urea [1].

Dušik spada med makrohranila in je eno od glavnih hranil, ki ga porabljajo rastline za svojo rast. Rastline dušik, potreben za njihovo rast, črpajo iz ozračja s pomočjo rež na listih in iz tal s pomočjo korenin, kjer je prav tako naravno prisoten. Cel sistem, po katerem se dušik giblje v naravi, je poznan kot dušikov cikel. Kmetje gnojila tako uporabljajo za učinkovitejšo rast rastlin, posledično torej za povečanje pridelka. Čezmerna uporaba dušikovega gnojila pušča posledice tako na zmanjšanju kakovosti pridelka, kakor tudi pri obremenjevanju okolja [24]. Pri obravnavanju dušikovega gnojila je treba poznati, da je izredno dobro mobilno in se pri čezmerni uporabi spere s pomočjo padavin v globlje plasti tal vse do podtalnice, del gnojila pa se sprosti v zrak [24].

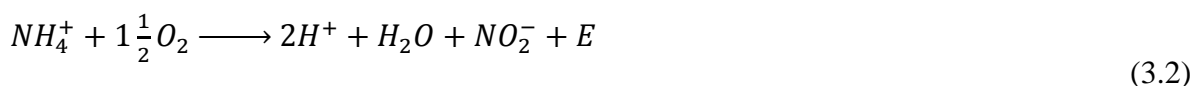
Dušik, vezan v atmosferi, rastline pri procesu sinteze proteinov in aminokislin spremenijo v obliko, v kateri je na voljo mikroorganizmom in rastlinam v tleh. Atmosfersko vezan dušik se torej oksidira v NO_3^- , medtem ko ga preostali organizmi v tleh znova predelajo nazaj v plinasto stanje in je znova sposoben prestopiti iz tal v atmosfero. Rastline in mikroorganizmi v tleh za svojo rast porabljajo nitratni ion (NO_3^-) in v manjši meri tudi amonijev ion (NH_4^+). Dušikov cikel se razširi, če se spremlja biokemijski proces spreminjanja organskega dušika v neorgansko obliko. Pri gnojenju z dušikom se na površino zemlje nanaša organska snov – gnojilo, ki se raztopi v amonijev nitrat. Amonij oksidira s pomočjo bakterij v nitrit, kar se imenuje nitrifikacija, in nadalje v nitrat. Del nitrata porabijo rastline in mikroorganizmi v tleh, drug del se z denitrifikacijo spremeni v plinasti dušik in dušikov oksid. Preostali del nitrata se spere v podtalnico. Podrobnejši biokemijski proces je prikazan v naslednjih enačbah. Bakterije med oksidacijskim postopkom amonija in nitrita proizvajajo tudi energijo. Prav tako se pri postopku denitrifikacije sprošča energija, ki je nastala pri delovanju bakterij. Sproščena energija je v spodnjih enačbah označena z E , vendar se je treba zavedati, da je tovrstna sproščena energija majhna. [9]

1.) mineralizacija

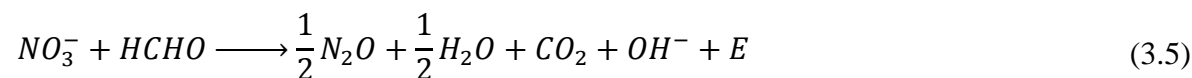
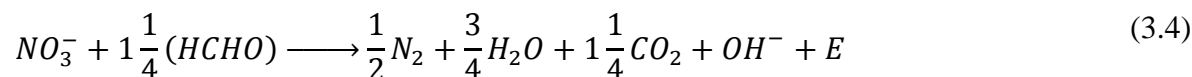
a. amonifikacija



b. nitrifikacija



2.) denitrifikacija



3.2.1 Izbira gnojila

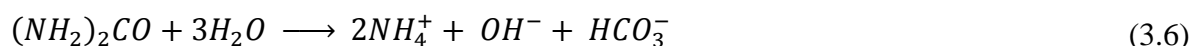
V magistrski nalogi smo izbirali med dvema v Sloveniji najbolj uporabljenima dušikovima gnojiloma, in sicer med gnojiloma KAN in urea.

KAN ali kalcijev amonijev nitrat je v Sloveniji najpogosteje uporabljeno dušikovo gnojilo. KAN je mešanica apnenca ali dolomita z amonijevim nitratom [21]. Amonijev nitrat je sol, ki jo pridelujejo s kemijskim postopkom, kjer združijo amonijak in dušikovo kislino [1].

Gnojilo KAN deluje postopoma. V ta namen vsebuje dušik v dveh oblikah. Gnojilo vsebuje obe obliki dušika (14 %), in sicer hitro delujočo obliko nitrat, ki se ob prisotnosti vlage hitro raztopi in je rastlinam takoj dostopen. Počasi delujoči dušik je shranjen v amonijevem dušiku, sicer dostopnem rastlinam, vendar v izjemno majhnih koncentracijah. Amonijev dušik se mora oksidirati v nitrat, kar se imenuje proces nitrifikacije, ki ga izvedejo mikroorganizmi, prisotni v tleh. [14]

Pogosto uporabljeno gnojilo je prav tako sečnina urea, ki vsebuje 46 % dušika. Delovanje gnojila urea je v primerjavi z gnojilom KAN bistveno počasnejše. Dušik, ki vsebuje ureo, ni v trenutku dostopen rastlinam, ampak šele takrat, ko ga mikroorganizmi v tleh predelajo v nitrat [21]. Težave pri uporabi gnojila urea nastanejo takrat, če močan dež spere gnojilo v podtalnico. Tako je po nepotrebnem obremenjeno okolje, prav tako pa gnojilo ne odigra svoje funkcije.

Gnojilo urea uporabnik plitvo vnese v zemljo, kjer ga voda (vlaga v tleh in padavine) raztopi. Poteče tako imenovana kemijska reakcija hidroliza, prikazana v spodnji enačbi [20]:



Vidno je, da iz gnojila nastaja amonijev ion (amonifikacija), ki je pozitivno nabit. Gibanje pozitivno nabitih ionov v tleh je počasno, saj se absorbirajo na negativno nabite delce zemlje [14]. Raztapljanje gnojila urea oziroma hidrolizo predstavlja koeficient razpada prvega reda μ_w in znaša $0,38 \text{ d}^{-1}$ [4]. Kot smo že omenili, sledi biokemijski postopek nitrifikacije, ki ga izvedejo bakterije v tleh in poteka v dveh delih [20]:



Kot je prikazano v enačbi (3.7), sta nitrit in nitrat negativno nabita iona in sta zelo dobro mobilna v tleh v primerjavi z amonijem [14]. Koeficient razpada amonija oziroma nastanka nitrata je prav tako opisan s koeficientom razpada prvega reda in znaša $0,12 \text{ d}^{-1}$. Zadnja biokemijska reakcija je v primerjavi s prvima bistveno hitrejša, tako je koeficient razpada prvega reda enak $2,4 \text{ d}^{-1}$. [7]

4 FIZIKALNI OPIS TOKA FLUIDA V NENASIČENI CONI

4.1 Osnove toka tekočine skozi nenasičeno cono

Tok tekočine skozi nenasičeno cono vodonosnika je odvisen od pozitivnega hidravličnega gradienta. Pozitiven hidravlični gradient je kombinacija tlačnega in gravitacijskega potenciala tekočine. Tekočina zmeraj teče od višjega proti nižjemu hidravličnemu gradientu. Pore v nasičenem delu zemlje so popolnoma zapolnjene, medtem ko v nenasičenem delu zemlje pore niso popolnoma zapolnjene s tekočino in so posledično prostori por bistveno manjši kot v primeru nasičene prsti. [8]

Pri obravnavanju toka tekočine skozi nenasičen medij je najbolj pomemben parameter vsebnost vode ali vlažnost. Vodo, vezano v nenasičenem delu zemlje, zadržujejo sile, katerih učinek je izražen v stanju energije ali tlaka vode. V nenasičeni coni imajo pomemben vpliv številni različni tlaki. Za obravnavanje toka tekočine skozi nenasičeno sredino pa je najpomembnejši kapilarni tlak ali v nekaterih literaturah metrični tlak, ki izhaja iz interakcije vode s togo matrico. Metrični tlak ali metrični potencial je srednji tlak vode v pori glede na tlak zraka in vpliva na hitrost transportnega procesa v nenasičeni coni. V nenasičeni coni zemlje ali katerem drugem nenasičenem mediju ima voda nižji tlak, kot je tlak zraka, posledično je kapilarni tlak negativen. [22]

Vsebnost vode in kapilarni tlak sta v medsebojnem odnosu. Višja, kot je vsebnost vode v togi matrici, višji je kapilarni tlak. Kapilarni tlak se približa ničli ali je nič, kadar je visoka vsebnost vode v matrici oziroma kadar je zemlja skoraj nasičena ali nasičena. Z zniževanjem vsebnosti vode v matrici se znižuje tudi kapilarni tlak, vendar je zniževanje nelinearno. Razmerje med kapilarnim tlakom in vsebnostjo vode je podano s krivuljo zadrževanja, ki je običajno eksperimentalno ugotovljena. Krivulja zadrževanja je značilna za vse porozne snovi in je odvisna od narave por, ki se nahajajo v poroznem mediju. Razmerje kapilarnega tlaka in vode ima vpliv na pretok vode in drugih snovi skozi nenasičeno cono. Prav tako to razmerje nadzoruje črpanje vode iz tal, ki ga povzročajo rastline s pomočjo svojih korenin. [22]

Kakšen upor predstavlja določen nenasičen porozen medij tekočini glede na dano gonilno silo, podaja parameter nenasičena hidravlična prevodnost. Nenasičena hidravlična prevodnost je ena od najpomembnejših značilnosti poroznega medija. Prav tako je zelo pomembna za pretok vode skozi nenasičen porozni medij in je v odvisnosti z vsebnostjo vode v nenasičenem

poroznem mediju. Nenasičena hidravlična prevodnost in vsebnost vode v nenasičenem poroznem mediju imata nelinearno odvisnost. [22]

Nenasičena hidravlična prevodnost se hitro zmanjšuje z zmanjševanjem vsebnosti vode v nenasičenem poroznem mediju. Na tok vode v nenasičeni coni vpliva tudi zmanjševanje pretočnega kanala (pore), ko vsebnost vode upada. Zraven tega, da se pretočni kanal zoži, postane smer toka tekočine skozi nenasičeno cono bolj zavrit. [8]

Za tok vode skozi nasičen medij se uporablja Darcyjev zakon, medtem ko se za tok vode skozi nenasičen medij uporablja Darcy-Buckinghamski model. Edgard Buckingham je avtor nenasičene hidravlične prevodnosti in kapilarnega (metričnega) tlaka. Za uporabo Darcyjevega zakona za tok vode skozi nenasičen medij sta bistvenega pomena kapilarni tlak in hidravlična prevodnost. [22]

4.2 Vodilne enačbe toka vode

Enodimenzionalno ravnotežno enačbo toka vode v delno nasičenem trdnem poroznem mediju opisuje Richardsonova enačba (4.1). Ta enačba predpostavlja, da zrak nima pomembnega vpliva v toku vode, prav tako ne toplotni gradienti. [7]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (4.1)$$

Kot α opisuje smer toka vode, in sicer za primer $\alpha = 0^\circ$ je tok vode vertikalni, v primeru $\alpha = 90^\circ$ je tok vode horizontalni. V ostalih primerih je tok vode poševen ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$). Tlak v enačbi (4.1) se upošteva kot tlačna višina, h . θ predstavlja nasičenje v tleh, t predstavlja v enačbi čas, x koordinato in S člen ponora vode. Pomemben parameter je nenasičena hidravlična prevodnost K , ki je funkcija relativne hidravlične prevodnosti K_r in nasičene hidravlične prevodnosti K_s [7]:

$$K(h, x) = K_s(x)K_r(h, x) \quad (4.2)$$

Enačba (4.1) obravnava le tok vode v tekočem agregatnem stanju in zanemara tok plinaste faze v skupni masni bilanci vode. Pri obravnavanju toka vode skozi nenasičeno cono zemlje je treba upoštevati plinasto fazo toka, saj je v primeru razmeroma suhih tal pomemben del celotnega toka vode. Takšno gibanje vode v plinastem in tekočem agregatnem stanju opisuje enačba (4.3) [7]:

$$\frac{\partial \theta_T(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(K + K_{vh}) \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) + (K_{LT} + K_{vT}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - S(h) \quad (4.3)$$

θ_T je skupna volumetrična vsebnost vode v matrici in je vsota volumetrične vsebnosti kapljevite vode (θ) in volumetrične vsebnosti plinaste vode (θ_v). Skupen pretok vode v enačbi (4.3) je podan kot vsota gravitacijskih tokov (le toka vode), izotermnih tokov in toplotnih tokov vode in pare. V enačbi (4.3) so še parametri T – temperatura, K – izotermna hidravlična prevodnost tal za tekočo fazo, K_{LT} predstavlja termalno hidravlično prevodnost tal za tekočo fazo, K_{vh} predstavlja izotermno hidravlično prevodnost vodne pare in K_{vT} predstavlja termalno hidravlično prevodnost tal za vodno paro. [7]

4.3 Nenasičene hidrološke lastnosti tal

Nenasičene lastnosti tal, kot sta nasičenost (θ) in nenasičena hidravlična prevodnost (K), sta v splošnem nelinearni funkciji tlaka. Program HYDRUS 1D, s katerim so bili narejeni računalniški modeli toka tekočine in onesnaževala skozi nenasičeno cono vodonosnika, dovoljuje uporabo petih različnih analitskih modelov hidravličnih lastnosti. Ti modeli povezujejo nasičenost (θ) in nenasičeno hidravlično prevodnost (K) s tlakom in se imenujejo po avtorjih: Brooks in Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Vogel in Cislérova, 1996 in Durner, 1994. [7]

Pri izdelavi računalniških modelov smo uporabili van Genuchtejev (1980) model, ki je uporabljen za statistično porazdelitev velikosti por, in Mualemolov model (1976). Modeli, kot je van Genuchtejev (1980), podajajo funkcijo za nenasičeno hidravlično prevodnost, kar pomeni, da podaja hidravlični parameter za zadrževanje vode v tleh. Izraza za nasičenost in nenasičeno hidravlično prevodnost, ki ju je definirala van Genuchten sta podana v enačbah (4.4) in (4.5). [7]

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$K(h) = K_s S_e^1 \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (4.5)$$

kjer

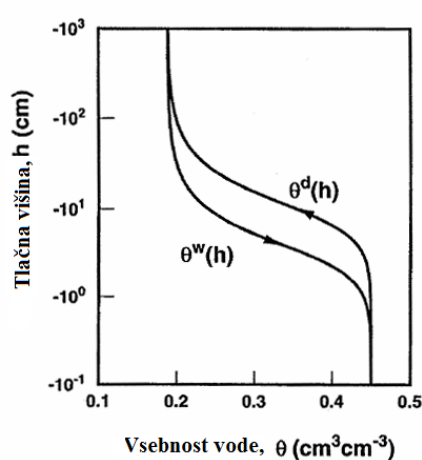
$$m = l - l/n, \quad n > l \quad (4.6)$$

Parameter povezljivosti por, l , ki se skriva v funkciji hidravlične prevodnosti, je bil ocenjen na približno 0,5 za večino materialov tal po Mualemolu (1976). [7]

4.3.1 Histereza pri hidravličnih lastnostih tal

Za večino aplikacij modelov nenasičenega toka se prevzema ne-histerezna funkcija nasičenja (θ) in funkcije nenasičene hidravlične prevodnosti (K), ki karakterizirajo hidravlične lastnosti določene točke v tleh. Takšna poenostavitev se lahko sprejme za mnoge primere simulacij toka. Za primere, ki zahtevajo bolj realen opis hidravličnih lastnosti v tleh, je treba uporabiti modele s histerezo funkcijo nasičenja (θ) in funkcije hidravlične prevodnosti (K). [7]

HYDRUS vsebuje histerezo, ki uporablja empirični model, katerega avtor je Scott et al. (1983). Slika 4.1 prikazuje uporabo modela s histerezo funkcijo nasičenja in nenasičene hidravlične prevodnosti za primer krivulje zadrževanja vode v tleh. [7]



Slika 4.1 Prikaz zadrževanje vode ob upoštevanju histereze. Krivulja $\theta^d(h)$ prikazuje mejo suhe krivulje in $\theta^w(h)$ prikazuje mejo mokre krivulje. [7]

4.4 Začetni in robni pogoji

Da je Richardsonova enačba (4.1), ki govori o toku vode v poroznem mediju, rešljiva, je treba poznati začetno stanje porazdelitve tlaka znotraj toka. [7]

$$h(x, t) = h_i(x) \quad t = t_0 \quad (4.7)$$

kjer je h_i predpisana funkcija x in t_0 je čas, ko se začne simulacija. [7]

4.4.1 Neodvisni robni pogoj

Eden izmed robnih pogojev bi naj bil predpisan na površini tal, kjer je $x = L$ ali pa na dnu kolone pri $x = 0$. Pri tem se lahko določi stanje tlaka (kot tlačna višina) ali pretok vode na robu sistema. [7]

$$h(x, t) = h_0(t) \quad \text{pri } x = 0 \text{ ali } x = L \quad (4.8)$$

$$-K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) = q_0(t) \quad \text{pri } x = 0 \text{ ali } x = L$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad \text{pri } x = 0$$

4.4.2 Odvisni robni pogoj

Zraven neodvisnih robnih pogojev, predstavljenih z enačbo (4.8), so prav tako obravnavani odvisni robni pogoji, ki jih ni mogoče vnaprej definirati. Takšni robni pogoji so na vrhu sistema, kjer so definirani atmosferski vplivi (sončno obsevanje, hitrost vetra, temperatura, padavine ...). V magistrski nalogi smo obravnavali le padavine. [7]

Potencialni tok vode skozi zgornjo mejo sistema je pod vplivom zunanjih pogojev oziroma atmosferskih lastnosti. Dejanski tok vode skozi mejo sistema je prav tako odvisen od prevladujočih razmer (nasičenosti tal) blizu površine. Rešitev na enačbo (4.1) je možna, če se predpiše absolutna vrednost površinskega toka s spodnjima pogojevma [7]:

$$\left| -K \frac{\partial h}{\partial x} - K \right| \leq E \quad \text{pri } x = L \quad (4.9)$$

in

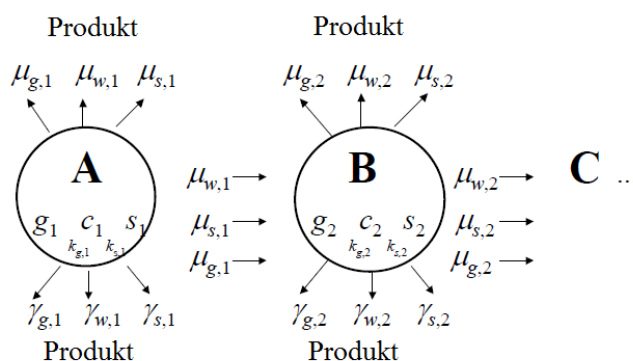
$$h_A \leq h \leq h_S \quad \text{pri } x = L \quad (4.10)$$

Pri tem je E najvišja stopnja evaporacije, ki je predpisana z atmosferskimi lastnostmi. h_A in h_S sta minimalni in maksimalni tlačni višini na površini tal, ki sta določeni s prevladujočim stanjem tal. Vrednost h_A določa ravnotežni pogoj med vsebnostjo vode v tleh in vsebnostjo vodne pare v zraku. Vrednost h_S je običajno nastavljena na vrednost 0, če je pozitivna, predstavlja majhen sloj vode na površju po močnem deževju, preden voda ponikne v tla. [7]

4.5 Transport topljenca in verižni razpad topljenca, reakcije prvega reda

Program HYDRUS predpostavlja, da lahko topljenec obstaja v vseh treh agregatnih stanjih in da lahko proces razpada ali proizvodnje topljenca poteka v vsakem agregatnem stanju različno. Interakcija med trdno in tekočo fazo je opisana z nelinearno, ne ravnotežno enačbo, medtem ko je interakcija med tekočo in plinasto fazo opisana kot linearna in trenutna. Program HYDRUS predpostavlja, da se topljenec transportira s procesoma konvekcije in difuzije v tekočem agregatnem stanju, prav tako pa tudi z difuzijskim širjenjem topljenca v plinastem agregatnem stanju. [7]

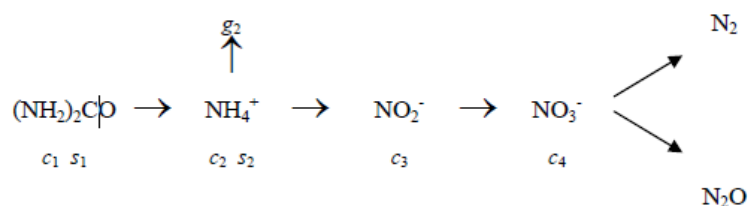
Na sliki 4.2 je prikazana splošna veriga razpada reakcije prvega reda za tri topljenca (A, B in C). [7]



Slika 4.2 Veriga razpada topljenca [7]

c , s in g predstavljajo koncentracije topljenca v tekočem, trdnem in plinastem agregatnem stanju, indeksi s , w in g pomenijo agregatno stanje (trdno, tekoče in plinasto), γ pomeni reakcijo nultega reda in μ pomeni reakcijo prvega reda. [7]

Med tipične primere zaporednega razpada topljenca reakcije prvega reda spada tudi razpad urea – nitrifikacija (slika 4.3). [7]



Slika 4.3 Razpad urea in nitrifikacija [7]

HYDRUS je trenutno sposoben obravnavati deset topljencev, ki so lahko združeni v enosmerno verigo ali pa se premikajo neodvisno drug od drugega. Enačbi (4.11) in (4.12) prikazujeta verigo razpada topljenca 1 v nadaljnje k -te topljence. Enačbi sta parcialni diferencialni enačbi, ki veljata za enodimenzionalni neravnovesni primer kemijskega transporta topljencev, ki vsebuje verigo zaporednega razpada prvega reda med pretokom vode v spremenljivo nasičenem poroznem mediju [7]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \theta c_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho s_1}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_v g_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_1^w \frac{\partial c_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_v D_1^g \frac{\partial g_1}{\partial x} \right) - \frac{\partial q c_1}{\partial x} - r_{a,1} - \\
 (\mu_{w,1} + \mu'_{w,1}) \theta c_1 - (\mu_{s,1} + \mu'_{s,1}) \rho s_1 - (\mu_{g,1} + \mu'_{g,1}) \alpha_v g_1 + \gamma_{w,1} \theta + \\
 \gamma_{s,1} \rho + \gamma_{g,1} \alpha_v &
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \theta c_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho s_k}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_v g_k}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_k^w \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_v D_k^g \frac{\partial g_k}{\partial x} \right) - \frac{\partial q c_k}{\partial x} - \\
 (\mu_{w,k} + \mu'_{w,k}) \theta c_k - (\mu_{s,k} + \mu'_{s,k}) \rho s_k - (\mu_{g,k} + \mu'_{g,k}) \alpha_v g_k + \\
 \mu'_{w,k-1} \theta c_{k-1} + \mu'_{s,k-1} \rho s_{k-1} + \mu'_{g,k-1} \alpha_v g_{k-1} + \gamma_{w,k} \theta + \gamma_{s,k} \rho + \gamma_{g,k} \alpha_v - \\
 r_{a,k} \quad k \in (2, n_s) &
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Pomembno je poznati, da so v enačbah (4.11) in (4.12) μ_w , μ_s in μ_g konstante prvega reda za nastajanje topljenca v tekočem, trdnem in plinastem agregatnem stanju, μ_w' , μ_s' in μ_g' konstante prvega reda za primere razpada topljenec v drugo snov v individualni verigi. [7]

Program HYDRUS predstavlja neravnovesno interakcijo med koncentracijo topljenca in adsorbata ter ravnovesno interakcijo med koncentracijo topljenca in koncentracijo topljenca v plinasti fazi v tleh. Adsorpcijska izoterma povezuje koncentracijo adsorbata (s_k) in koncentracijo topljenca v tekočini (c_k) in je opisana s posplošeno enačbo (4.13) [7]

$$s_k = \frac{k_{s,k} c_k^{\beta_k}}{1 + \eta_k c_k^{\beta_k}} \quad k \in (1, n_s) \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial s_k}{\partial t} = \frac{k_{s,k} \beta_k c_k^{\beta_k - 1}}{(1 + \eta_k c_k^{\beta_k})^2} + \frac{c_k^{\beta_k}}{1 + \eta_k c_k^{\beta_k}} \frac{\partial k_{s,k}}{\partial t} - \frac{k_{s,k} c_k^{2\beta_k}}{(1 + \eta_k c_k^{\beta_k})^2} \frac{\partial \eta_k}{\partial t} + \frac{k_{s,k} c_k^{\beta_k} \ln c_k}{(1 + \eta_k c_k^{\beta_k})^2} \frac{\partial \beta_k}{\partial t} \quad (4.14)$$

kjer so koeficienti $k_{s,k}$, β_k in η_k empirično določeni. Enačba (4.14) se lahko v posebnih primerih spremeni v Freundlichovo enačbo, Langmuirovo enačbo ali v enačbo linearne adsorpcije. Kadar je v enačbi (4.14) $\beta_k=1$, postane enačba Langmuirова enačba, kadar je $\eta_k=0$, postane enačba (4.14) Freundlichova enačba in kadar sta tako $\beta_k=1$ in $\eta_k=0$ obstaja linearna adsorpcijska izoterma. V primeru, da je transport topljenca brez adsorpcije, mora biti izpolnjen pogoj $k_{s,k}=0$. Prav tako je v enačbi (4.14) predpostavljeno, da so koeficienti $k_{s,k}$, β_k in η_k neodvisni od koncentracije, zato se lahko kot funkcija časa spreminjajo v odvisnosti od temperature. Koncentracija topljenca v plinu (g_k) je s koncentracijo topljenca v tekočini (c_k) linearno odvisna in izražena kot: [7]

$$g_k = k_{g,k} c_k \quad k \in (1, n_s) \quad (4.15)$$

in $k_{g,k}$ je empirično določena konstanta enako kot ($K_H R_u T^A$). K_H predstavlja Henryovo konstanto, R_u je splošna plinska konstanta in T^A je absolutna temperatura. [7]

4.5.1 Robni pogoji

Na površini kolone (na vrhu ali na dnu) se lahko uporabita dva tipa robnih pogojev, in sicer Dirichletov robni pogoj ali Cauchyov robni pogoj, ki je bil uporabljen v magistrskem delu. Dirichletov robni pogoj predpisuje koncentracijo na robu sistema [7]:

$$c(x, t) = c_0(x, t) \quad \text{za } x = 0 \text{ ali } x = L \quad (4.16)$$

Cauchyov robni pogoj predpisuje koncentracijski tok na robu sistema [7]:

$$-\theta D \frac{\partial c}{\partial x} + qc = q_0 c_0 \quad \text{za } x = 0 \text{ ali } x = L \quad (4.17)$$

pri tem je q_0 predpisan tok tekočine na vhodu v sistem in c_0 koncentracija topljenca v predpisani tekočini na vhodu sistema. V primeru, kadar je rob sistema neprepusten ali kadar je tok vode usmerjen izven območja, se enačba (4.17) spremeni v (Neumannov robni pogoj) [7]:

$$\theta D \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad \text{za } x = 0 \text{ ali } x = L \quad (4.18)$$

4.5.2 Učinek disperzijskega koeficienta

Disperzijski koeficient v tekoči fazi (D^w) je podan kot [7]:

$$\theta D^w = D_L |q| + \theta D_w \tau_w \quad (4.19)$$

D_w v enačbi (4.19) predstavlja koeficient molekularne difuzije vode in τ_w je faktor zakrivljenosti za tekočo fazo, q je absolutna vrednost Darcyjeve hitrosti in D_L je longitudinalna disperzivnost. Ob upoštevanju difuzije v plinasti fazi je učinek disperzije v togi porozni matrici zemlje za enodimenzionalen transport enak enačbi (4.20). [7]

$$\theta D = D_L |q| + \theta D_w \tau_w + \alpha_v D_g k_g \tau_g \quad (4.20)$$

pri tem D_g predstavlja koeficient molekularne difuzije plina in τ_g je faktor zakrivljenosti za plinasto fazo. [7]

Faktorja zakrivljenosti obeh faz sta v programu HYDRUS ocenjena in podana kot funkciji vsebnosti vode in zraka po zvezi Millingtona in Quirka [7]:

$$\tau_w = \frac{\theta^{7/3}}{\theta_s^2} \quad \tau_g = \frac{\alpha_v^{7/3}}{\theta_s^2} \quad (4.21)$$

4.6 Numerična rešitev enačbe spremenljivo nasičenega toka

Profil tal se najprej diskretizira v $N-1$ sosednjih elementov. Na koncih elementov se nahajajo vozlišča in N predstavlja število vozlišč. Enaka diskretizacija se uporablja za pretok vode in transport topljenca. Program HYDRUS predpostavlja, da je navpična koordinata x pozitivno usmerjena navzgor. [7]

Richardsonova enačba (4.1) in enačba (4.3) imata podobno numerično rešitev, kjer je uporabljena metoda linearne sheme točkovnih mas končnih elementov. Končna numerična rešitev je podana z enačbo (4.22) [7]:

$$\frac{\theta_i^{j+1,k+1} - \theta_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left(K_{i+1/2}^{j+1,k} \frac{h_{i+1}^{j+1,k+1} - h_i^{j+1,k+1}}{\Delta x_i} - K_{i-1/2}^{j+1,k} \frac{h_i^{j+1,k+1} - h_{i-1}^{j+1,k+1}}{\Delta x_{i-1}} \right) + \frac{K_{i+1/2}^{j+1,k} - K_{i-1/2}^{j+1,k}}{\Delta x} \cos \alpha - S_i^j \quad (4.22)$$

V enačbi indeksi $i-1$, i in $i+1$ pokažejo položaj v mreži končnih razlik, indeksa k in $k+1$ označujeta prejšnjo in sedanjo stopnjo ponovitve ter indeksa j in $j+1$ označujeta stanje časa v zaporedju. Enačba (4.22) temelji na implicitni diskretizaciji časovnega odvoda in bo rešena s Picardovo ponavljajočo se shemo rešitev. [7]

Da lahko rešimo sistem enačb, je treba na meje sistema predpisati robne pogoje. Na spodnji rob sistema smo predpisali robni pogoj, definiran s tlačno višino (Dirichlet). Na zgornji rob sistema pa smo predpisali robni pogoj, definiran z atmosferskimi vplivi (Neuman). Atmosferski robni pogoj se lahko simulira bodisi s predpisano tlačno višino bodisi s predpisanim tokom, odvisno od tega, ali je enačba (4.9) izpolnjena. Če enačba (4.9) ni izpolnjena, je na mejnem vozlišču n predpisana tlačna višina. Če je na katerem od vozlišč na meji v času trajanja simulacije izračunan tok, ki presega specifičen potencialen tok, bo vozlišču dodeljen potencialen tok. V tem primeru je na mejnem vozlišču predpisan tok. [7]

Če se obravnava, da je spodnji robni pogoj ploskev, skozi katero pronica voda in če je skozi vsako iteracijo spodnji del profila tal nasičen, potem se na zadnjem vozlišču predpiše Dirichletov robni pogoj, in sicer tlačna višina $h = 0$. [7]

4.6.1 Numerična rešitev enačbe transporta topljenca

Za numerično rešitev enačbe transporta topljenca z ustreznimi začetnimi in robnimi pogoji se uporabi Galerkinova metoda končnih elementov. Metoda končnih elementov predpostavlja, da je funkcija $c(x, t)$ odvisna spremenljivka koncentracije, ki jo lahko poenostavimo v $c'(x, t)$. [7]

$$c'(x, t) = \sum_{m=1}^N \Phi_m(x) c_m(t) \quad (4.23)$$

Da lahko približna rešitev $c'(x, t)$ konvergira do pravilne rešitve $c(x, t)$, moramo po Galerkinovi metodi končnih elementov rešiti sistem N časovno odvisnih diferencialnih enačb z N neznanimi vrednostmi $c_n(t)$. [7]

5 RAZISKOVALNI DEL MAGISTRSKE NALOGE

Raziskovalni del magistrske naloge smo opravili z računalniškim programom HYDRUS 1D, ki se uporablja za simulacijo gibanja vode in prenosa toplote ter topljenca v enodimenzionalnem spremenljivo nasičenem mediju. Računalniški paket je sestavljen iz fizikalno-numeričnega dela, ki ga vsebuje program HYDRUS in grafični vmesnik HYDRUS 1D. Program HYDRUS daje numerični rešitvi za Richardsonovo enačbo spremenljivo nasičenega toka vode in konveksijsko-disperzijsko enačbo prenosa toplote in topljenca. Enačba toka vode vsebuje člen, s katerim se lahko upošteva odvzeti delež vode iz matrice tal, ki jo rastline skozi korenine posrkajo vase. Prav tako enačba toka vode dopušča možnost obravnave dvojne poroznosti in dvojne prepustnosti. [7]

Transportna enačba topljenca vsebuje člena za konveksijski in disperzijski transport topljenca v tekoči fazi in člen za difuzijski transport topljenca v plinasti fazi. V transportni enačbi topljenca so prav tako vključena določila za nelinearne neravnovesne reakcije med trdno in tekočo fazo ter linearna ravnotežna določila med tekočo in plinasto fazo. Enačba transporta topljenca prav tako obravnava dva tipa reakcij razpada prvega reda. V prvem tipu reakcije razpada prvega reda topljenec razpada v neodvisne druge topljence, v drugem tipu pa je razpad topljenca vključen v verigo. Transportna enačba topljenca alternativno vsebuje tudi določbe za kinetično pritrđitev in ločitev topljenca od trde faze, tako je možno simulirati tudi transport virusov, koloidov in bakterij. [7]

Programski paket HYDRUS vsebuje tudi module za simuliranje transporta CO₂ v tleh. Transport CO₂ poteka s konvekcijo in difuzijo v tekoči fazi in z difuzijo v plinasti fazi. Prav tako je mogoče s tem programskim paketom simulirati transport glavnih ionov (Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻ in NO₃⁻). [7]

5.1 Obravnavano območje modela

Za izdelavo računalniškega modela smo se morali prostorsko omejiti. Obravnavali smo tok padavinskih voda in dušikovih spojin, ki so posledica razpada urea skozi nenasičen del prsti na področju Apaškega polja. Ker večina padavinske vode in onesnaževala v nenasičenem delu zemlje odteče navpično navzdol v vodonosnik, smo obravnavali le navpično kolono. Struktura tal na Apaškem polju se nekoliko spreminja, tako smo izdelali dva računalniška modela v neposredni bližini črpališč, ki ležita na Apaškem polju.

Črpališči na Apaškem polju sta črpališče pri Podgradu in črpališče Segovci ob Muri. Geološke meritve tik ob črpališčih v Podgradu in Segovcih ob Muri smo pridobili kot skupina študentov od podjetja IEI – Institut za ekološki inženiring, d. o. o.

Obravnavana kolona je široka 1 m in predstavlja le točko, gledano s celotnega Apaškega polja. Globina računalniškega modela je od vrha tal in vse do vodonosnika. Pri tem smo zanemarili kapilarni del, ki še spada k nasičenemu delu zemlje. Osnovni podatki vrtin:

- Vrtina PPG-6/11 [11]:
 - kraj vrtine: Podgrad
 - nadmorska višina vrtine: 209,5 m
 - globina vrtine: 3,46 m
 - koordinate vrtine: X = 171519,9 Y = 573959,0



Slika 5.1 Prikaz lokacije vrtine – Podgrad [3]

- Vrtina PS-5/11 [11]:
 - kraj vrtine: Segovci ob Muri
 - nadmorska višina vrtine: 216,5 m
 - globina vrtine: 3,59 m
 - koordinate vrtine: X = 173914,1 Y = 570195,1



Slika 5.2 Prikaz lokacije vrtine – Segovci ob Muri [3]

5.1.1 Sestava tal na obravnavanih območjih

Kot je znano, so v tem predelu Slovenije tla v veliki meri peščena, prav to velja tudi za Apaško dolino. Podrobnejši opis strukture tal smo kot skupina študentov pridobili od podjetja IEI – Institut za ekološki inženiring, d. o. o., in sicer za vrtino v Podgradu in za Segovce ob Muri. Za obe vrtini smo za potrebe magistrskega dela morali poenostaviti strukturo tal.

Upoštevana struktura tal za vrtino v Podgradu:

Tabela 5.1 Struktura tal Podgrad [11]

	globina [cm]
humus	0,00–0,15
melj	0,15–0,60
meljast pesek	0,60–0,90
glina	0,90–1,00
peščen prod	1,00–3,46

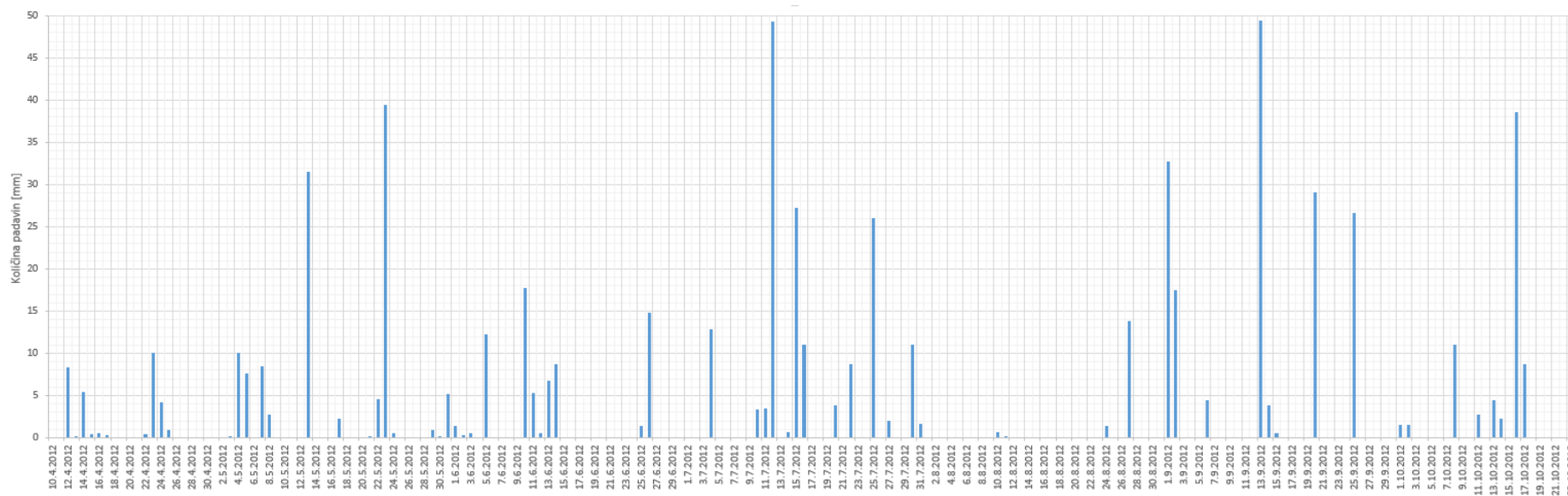
Upoštevana struktura tal za vrtino v Segovcih ob Muri:

Tabela 5.2 Struktura tal Segovci ob Muri [11]

	globina [cm]
humus	0,00–0,30
meljast pesek	0,30–1,00
pesek s prodniki	1,00–2,10
peščen prod	2,10–3,59

5.1.2 Padavine na obravnavanem območju

Pri izdelavi računalniških modelov smo 200 dni spremljali potovanje dušikovih spojin skozi nenasičen del zemlje. Tako smo tudi obdobje padavin v modele vnesli za 200 dni, in sicer od 10. 4. 2012 do 26. 10. 2012. Podatki dnevnih padavin, ki so bili uporabljeni v magistrski nalogi, so za padavinsko vremensko postajo Podgorje pridobljeni iz spletne strani <http://meteo.arso.gov.si/>. Padavinska vremenska postaja Podgorje leži na severu zahodu Apaške doline na višini 230 m. Grafični prikaz dnevnih padavin za obravnavano obdobje je prikazan na sliki 5.3.



Slika 5.3 Podatki padavin Podgorje za obravnavano obdobje [13]

5.2 Validacija računalniškega modela na primeru

Da naš računalniški model deluje pravilno, smo se prepričali tako, da smo naredili validacijo modela na primeru z znanim končnim rezultatom. Primerljiv primer smo naredili iz datoteke HYDRUS 1D-4.08_pdf, ki simulira transport topljenca z nitrifikacijsko verigo.

V uporabljenem primeru je simuliran enodimenzionalni konveksijsko-difuzijski transport topljenca, ki je vključen v verigo razpada prvega reda. Dana rešitev primera velja za transport topljenca v homogeni, izotropni porozni snovi v stanju dinamičnega ravnovesja za enosmerni podzemni tok vode. [7]

Za obravnavan primer se enačbi (4.11) in (4.12) za transport topljenca nekoliko zmanjšata, zato lahko zapišemo [7]:

$$R_1 \frac{\partial c_1}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_1}{\partial x} - \mu_1 R_1 c_1 \quad (5.24)$$

in

$$R_i \frac{\partial c_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_i}{\partial x} + \mu_{i-1} R_{i-1} c_{i-1} - \mu_i R_i c_i \quad i = 2, 3 \quad (5.25)$$

Pri tem v enačbah μ predstavlja koeficient razpada prvega reda, D je disperzijski koeficient, v je povprečna hitrost vode v porah. Enačbi (5.24) in (5.25) obravnavata 3 topljenca v verigi razpada in se nanašata na specifičen primer verige nitrifikacije [7]:



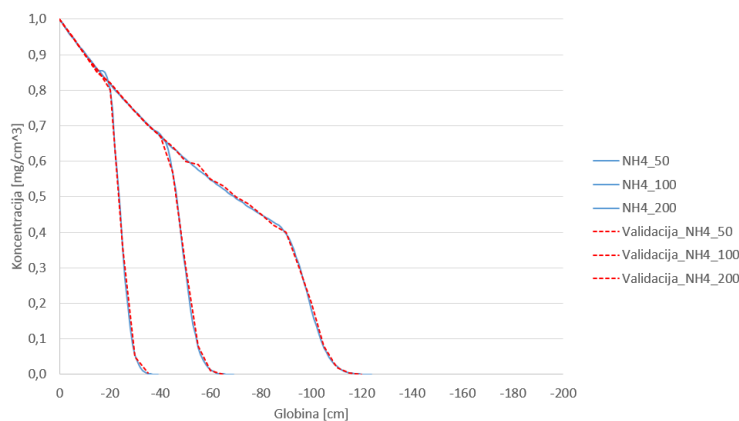
Robna pogoja za tok vode skozi kolono sta nastavljena kot konstantni tlačni višini, za vnos topljenca pa je zgornji robni pogoj nastavljen kot koncentracijski tok in spodnji robni pogoj kot nični koncentracijski gradient. Pomembna podatka sta še faktor zaostanka topljenca R in koeficient razpada prvega reda (μ) za vsak topljenec. Enake podatke smo uporabili pri izdelavi modelov za magistrsko nalogo. [7]

Tabela 5.3 Podatki za topljenca v nitrifikacijski verigi [7]

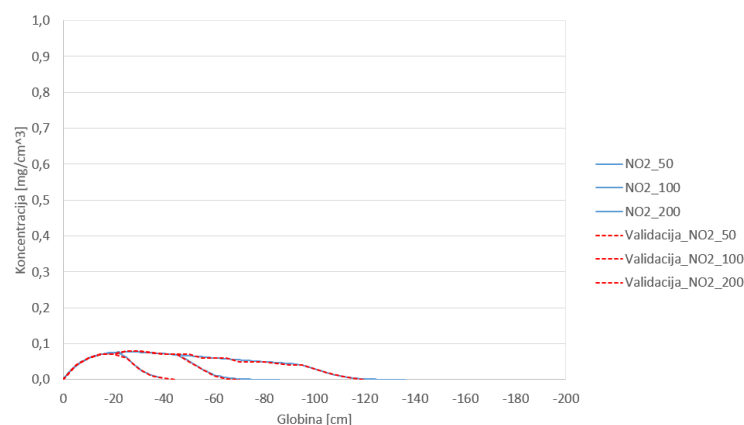
Topljenec	Faktor zaostanka R	Koeficient razpada prvega reda μ [h ⁻¹]
NH ₄ ⁺	R ₁ = 2.0	$\mu_1 = 0.005$
NO ₂ ⁻	R ₂ = 1.0	$\mu_2 = 0.1$
NO ₃ ⁻	R ₃ = 1.0	$\mu_3 = 0.0$

5.2.1 Rezultati validacije

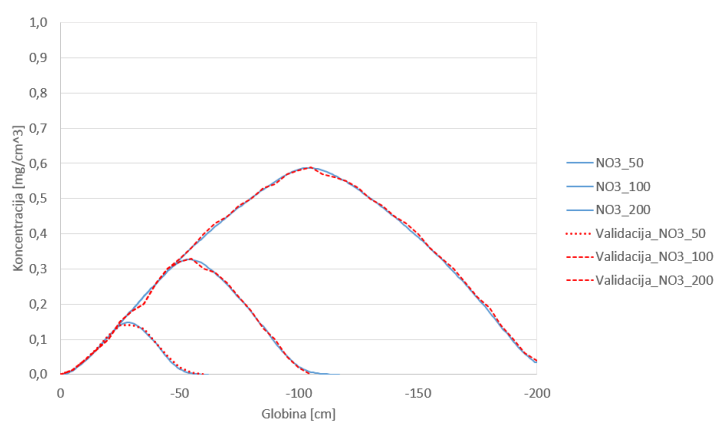
Glede na dane podatke iz datoteke HYDRUS 1D-4.08 smo izdelali primer validacije. Dobljeni rezultati sovpadajo s podanimi rezultati iz danega primera validacije nitrifikacijske verige in so prikazani v spodnjih grafih.



Slika 5.4 Rezultati validacije prvega topljenca v nitrifikacijski verigi



Slika 5.5 Rezultati validacije drugega topljenca v nitrifikacijski verigi



Slika 5.6 Rezultati validacije tretjega topljenca v nitrifikacijski verigi

5.3 Izdelava računalniškega modela

Pri izdelanih modelih smo prav tako kot v primeru validacije simulirali enodimenzionalni konvektivsko-difuzijski transport topljenca, ki je vključen v verigo razpada prvega reda. Topljenec je prav tako transportiran skozi homogeno, izotropno porozno snov v enosmernem toku podzemne vode. Pri izdelanih modelih prav tako velja enačba transporta topljenca (5.24) za prvi topljenec, ki je gnojilo – urea. Ker smo upoštevali razpad gnojila, smo enačbi (5.25) dodali en topljenec (i), torej sledi:

$$R_i \frac{\partial c_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_i}{\partial x} + \mu_{i-1} R_{i-1} c_{i-1} - \mu_i R_i c_i \quad i = 2,3,4 \quad (5.27)$$

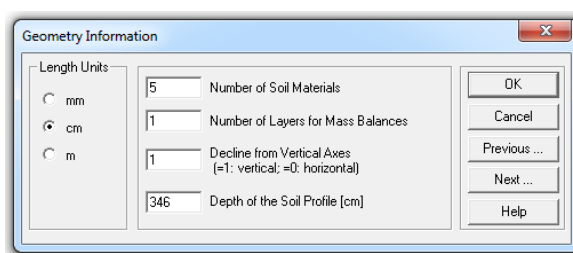
Veriga razpada se tako podaljša in k nitrifikaciji se pridruži tudi razpad gnojila:



V program HYDRUS 1D smo vnesli koeficient razširjenja (K_d), ki ga je možno preračunati iz faktorja zaostanka (R). Koeficient razširjenja za urea znaša $0 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, koeficient razpada prvega reda pa za urea znaša $0,0158 \text{ h}^{-1}$ [4].

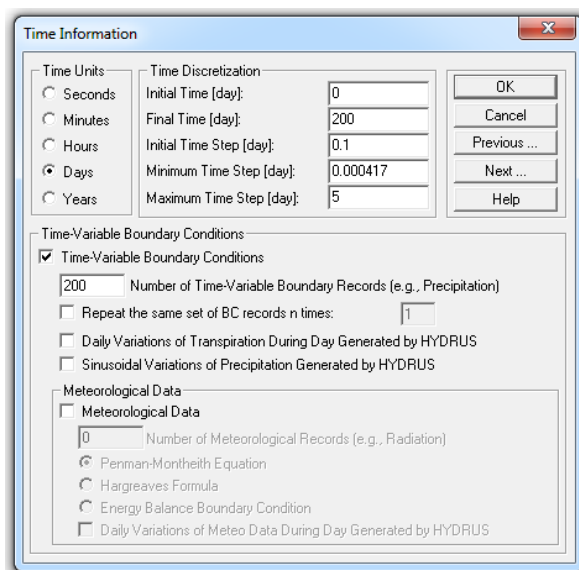
Pri izdelavi modela smo v prvem koraku morali nastaviti glavne procese, ki se izvajajo pri simulaciji transporta topljenca. Tako smo izbrali tok vode in klasični transport topljenca.

V naslednjem koraku smo vnesli v program geometrijske podatke o modelu. Tako smo nastavili število različnih materialov tal in globino profila tal.



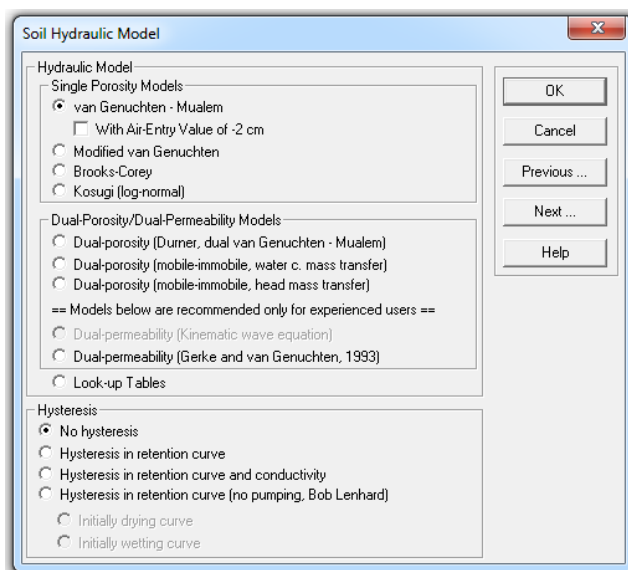
Slika 5.7 Izdelava modela – nastavitve geometrije

V tretjem koraku smo nastavili časovne informacije simulacije. Nastavili smo dolžino simulacije, in sicer na 200 dni, začetni časovni korak ter minimalni in maksimalni časovni korak. Ker smo na zgornjem robnem pogoju predpisali padavine, smo morali prav tako izbrati časovno spremenljiv robni pogoj in nastaviti število zapisov.



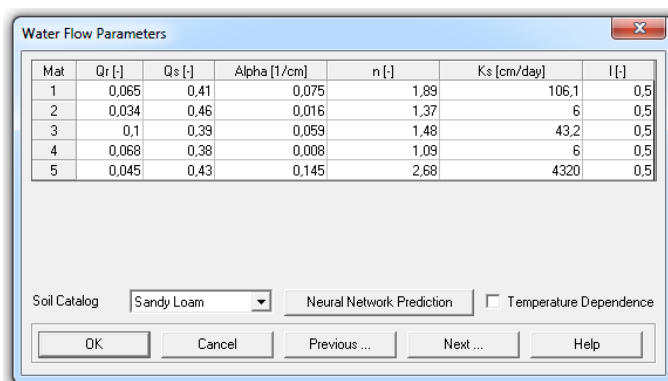
Slika 5.8 Izdelava modela – časovne nastavitve

Kriterije ponovitve (iteration criteria) smo pustili nespremenjene. Sledilo je nastavljanje hidravličnega modela tal, ki se nanaša na zgoraj opisano teorijo iz poglavja 4.3, kjer so opisane nenasičene hidrološke lastnosti tal.



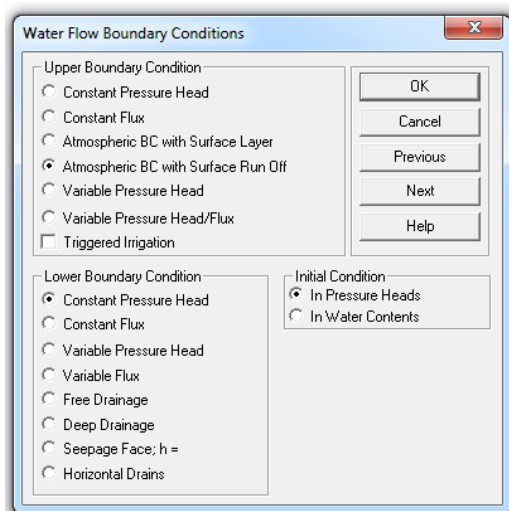
Slika 5.9 Izdelava modela – hidrološki modeli tal

Nato smo nastavili še materiale tal, ki sestavljajo obravnavan profil. Materiale tal smo nastavili iz kataloga, ki ga premore program HYDRUS 1D. Na sliki 5.10 predstavljajo oznake: Q_r vsebnost ostanka vode v tleh (ki jih ni možno izsušiti), Q_s nasičeno vsebnost tal in K_s parameter prevodnosti tal.



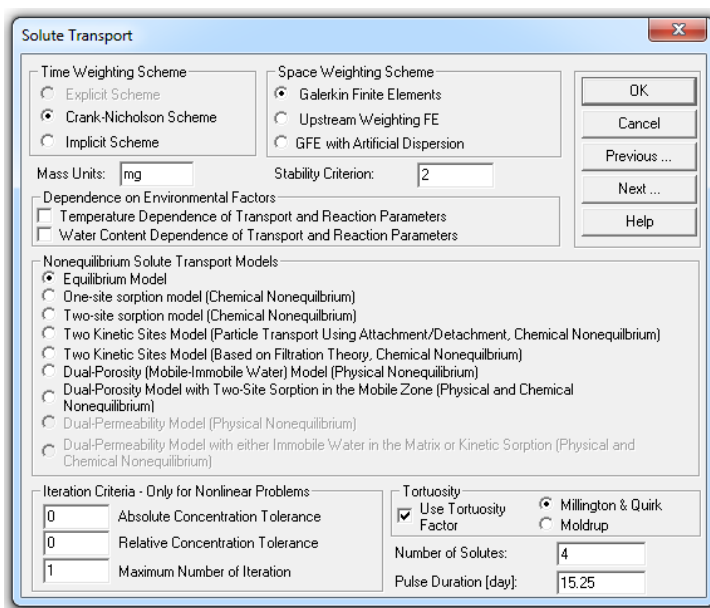
Slika 5.10 Izdelava modela – izbira materialov tal, ki sestavljajo profil

V zadnjem koraku nastavitve lastnosti tal in parametrov toka smo nastavili še robne pogoje za tok vode. Za zgornji robni pogoj smo izbrali atmosferski robni pogoj, za katerega smo v program vnesli podatke padavin. Za spodnji robni pogoj smo izbrali konstantno tlačno višino.



Slika 5.11 Izdelava modela – izbira robnih pogojev za tok vode

Nastaviti je bilo potrebno še lastnosti transporta topljenca. Izbrali smo ravnovesni model transporta topljenca in nastavili, da so v verigi razpada urea v NO_3^- štirje topljenci.



Slika 5.12 Izdelava modela – transport topljenca

V nadaljevanju smo nastavili še parametre transporta topljenca, kjer smo nastavili koeficient molekularne difuzije v vodi. Prav tako je bilo treba nastaviti koeficient razširjenja za vsak topljenec posebej in parameter razpada prvega reda v verižni reakciji.

Mat	SinkSolid1	SinkGas1	SinkWater1	SinkSolid1	SinkGas1
1	0	0	0,12	0,12	0
2	0	0	0,12	0,12	0
3	0	0	0,12	0,12	0
4	0	0	0,12	0,12	0
5	0	0	0,12	0,12	0

Slika 5.13 Izdelava modela – nastavitve koeficientov razpada

Prav tako pa je bilo treba nastaviti robne pogoje za transport topljenca, ki so enaki kot v primeru validacije. Za zgornji robni pogoj smo nastavili koncentracijski tok in za spodnji robni pogoj nični koncentracijski gradient.

Ker smo izbrali časovno spremenljiv robni pogoj (slika 5.8), smo morali tudi za topljenec definirati, kako se zgornji robni pogoj spreminja po času. V drugi stolpec na sliki 5.14 smo vnašali višino padavin. Višino padavin smo vnesli za vsak dan posebej. Čas trajanja celotne simulacije je 200 dni, tako je tudi 200 različnih zapisov robnega pogoja. V stolpcu cTop-1 smo definirali velikost »koncentracijskega toka« gnojila.

	Time [day]	Precip. [cm/day]	Evap. [cm/day]	hCritA [cm]	cTop - 1	cBot - 1	cTop - 2
1	1	0	0	100000	0	0	0
2	2	0	0	100000	0	0	0
3	3	0,83	0	100000	0	0	0
4	4	0,01	0	100000	0	0	0
5	5	0,54	0	100000	1,96	0	0
6	6	0,04	0	100000	0	0	0
7	7	0,06	0	100000	0	0	0
8	8	0,03	0	100000	0	0	0
9	9	0	0	100000	0	0	0
10	10	0	0	100000	0	0	0
11	11	0	0	100000	0	0	0
12	12	0	0	100000	0	0	0
13	13	0,04	0	100000	1,96	0	0
14	14	1	0	100000	0	0	0

Slika 5.14 Izdelava modela – definiranje časovno spremenljivega robnega pogoja

Nastavili smo število vozlišč, ki predstavlja dolžino oziroma globino profila plus 1. Na sliki 5.15 je z globina profila in h je tlak, izražen kot tlačna višina. Nastavili smo še zadnji stolpec »Mat«, kjer smo nastavili materiale po globini.

Tlačno višino h smo v spodnjo preglednico (slika 5.15) vnesli kot začetno stanje. Začetno stanje smo pridobili s predhodno simulacijo, ki je imela enake nastavitve. Pri simulaciji začetnega stanja nismo definirali vtoka koncentracije (c_{Top-1}), simulacija pa je trajala le za 100 dni. Tlačno višino za simulacijo začetnega stanja smo nastavili na $h = -100$ cm. Iz izpisa podatkov simulacije smo nato prekopirali tlačno višino zadnjega časovnega koraka.

	z [cm]	h [cm]	Root [1/cm]	Axz	Bxz	Dxz	Mat
1	0	-48,83	0	1	1	1	1
2	1	-49,2	0	1	1	1	1
3	2	-49,6	0	1	1	1	1
4	3	-50,03	0	1	1	1	1
5	4	-50,5	0	1	1	1	1
6	5	-51,01	0	1	1	1	1
7	6	-51,56	0	1	1	1	1
8	7	-52,17	0	1	1	1	1
9	8	-52,85	0	1	1	1	1
10	9	-53,61	0	1	1	1	1
11	10	-54,47	0	1	1	1	1
12	11	-55,47	0	1	1	1	1
13	12	-56,64	0	1	1	1	1
14	13	-58,08	0	1	1	1	1
15	14	-59,97	0	1	1	1	1

Slika 5.15 Izdelava modela – povzetek profila tal

5.4 Predstavitev scenarijev

Pri izdelavi računalniških modelov smo simulirali več različnih scenarijev, ki so možni v praksi, in primerjali razliko med scenariji glede na dobljene rezultate.

Prva primerjavo smo naredili med rezultati scenarijev, kjer uporabnik gnojila upošteva vodovarstveno uredbo ter pognoji le s predpisano vrednostjo, in kjer uporabnik ne upošteva vodovarstvene uredbe ter pognoji s količino gnojila, ki je priporočena.

Drugo primerjavo smo naredili glede na čas gnojenja, ki je lahko:

- na dan, ko se začne cikel padavin in sledi deževno obdobje,
- na dan, ko se konča cikel padavin in sledi suho obdobje ter
- na dan v ciklu padavin, ko so padavine najbolj intenzivne.

Tako smo za oba profila Podgrad in Segovci ob Muri naredili 6 različnih scenarijev. Kot smo že pisali, smo za gnojilo predpostavili gnojilo urea, s katerim se gnoji koruzo. Prav tako smo predpostavili, da se gnojenje in dognojevanje izvajata v dveh delih.

Tabela 5.4 Predstavitev scenarijev gnojenja

enota	upoštevanje vodovarstvene uredbe	količina dušika	količina gnojila – gnojenje		količina dušika	količina gnojila – dognojevanje	
		kg N/ha	kg urea/ha	mg urea/cm ²	kg N/ha	kg urea/ha	mg urea/cm ²
Podgrad							
scenarij 1	NE	90	196	1,96	80	174	1,74
scenarij 2							
scenarij 3							
scenarij 4	DA	30	65,2	0,652	40	87	0,87
scenarij 5							
scenarij 6							
Segovci ob Muri							
scenarij 1	NE	90	196	1,96	80	174	1,74
scenarij 2							
scenarij 3							
scenarij 4	DA	30	65,2	0,652	40	87	0,87
scenarij 5							
scenarij 6							

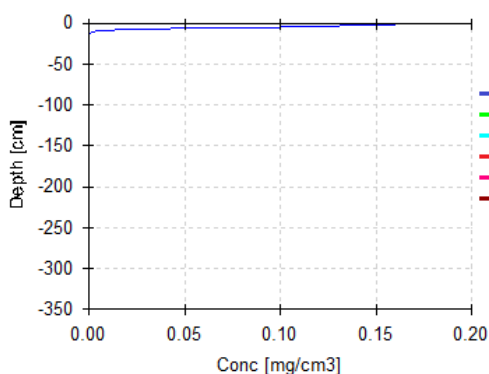
Pri scenariju 1 in scenariju 4 smo nastavili vnos gnojila na 5., 13., 42. ter 62. dan simulacije, ko se začne daljši cikel deževnega obdobja. Pri scenariju 2 in scenariju 5 smo nastavili vnos gnojila na 9., 17., 46. ter 67. dan simulacije, ko se začne cikel suhega vremena. Pri scenariju 3 in scenariju 6 smo nastavili vnos gnojila na 3., 15., 44. ter 64. dan simulacije. Vnosi predstavljajo dneve, ko so padavine najbolj intenzivne.

6 REZULTATI

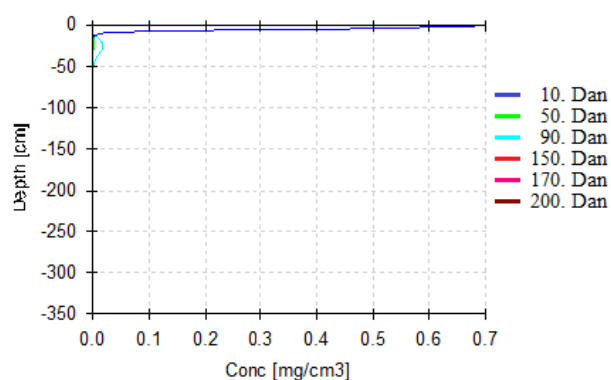
6.1 Rezultati Podgrad

6.1.1 Scenarij 1

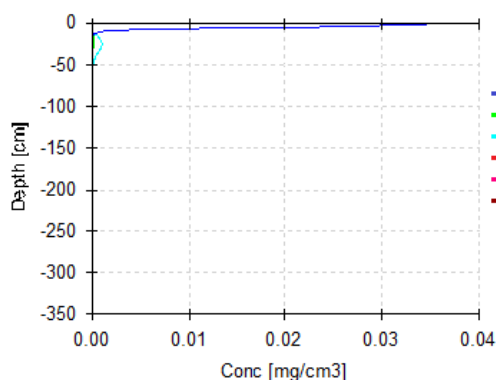
Rezultati scenarija 1 za Podgrad so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi tudi do 4-krat presega zakonsko predpisano vrednost $0,05 \text{ mg/cm}^3$ v pitni vodi. Prav tako je simulacija pokazala, da lahko koncentracijski vrh nitrata pričakujemo po 200. dnevu.



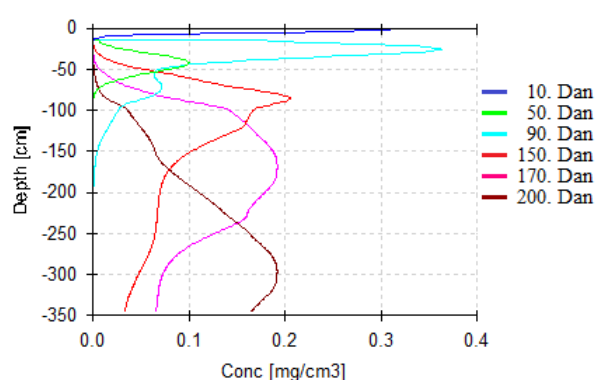
Slika 6.1 Podgrad scenarij 1, urea



Slika 6.2 Podgrad scenarij 1, NH_4^+



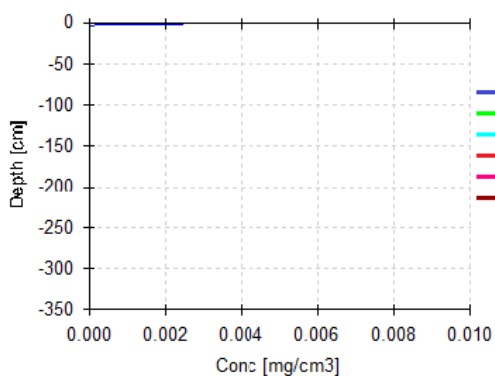
Slika 6.3 Podgrad scenarij 1, NO_2^-



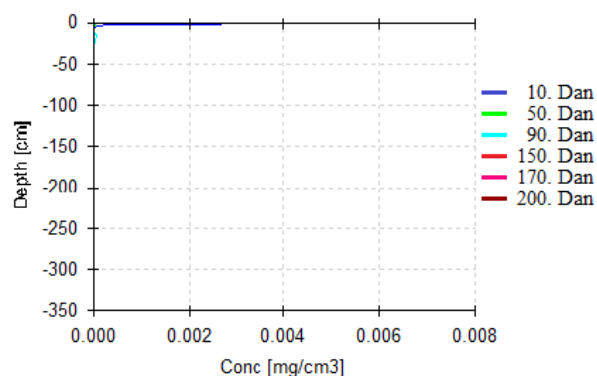
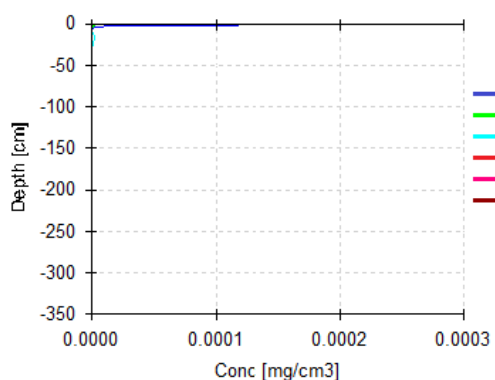
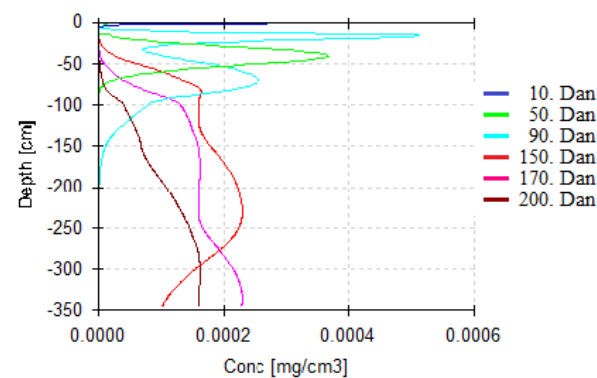
Slika 6.4 Podgrad scenarij 1, NO_3^-

6.1.2 Scenarij 2

Rezultati scenarija 2 za Podgrad so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi ne presega zakonsko predpisane vrednosti $0,05 \text{ mg/cm}^3$ v pitni vodi. Vodonosnik je dosegel koncentracijski vrh približno 170. dan simulacije.

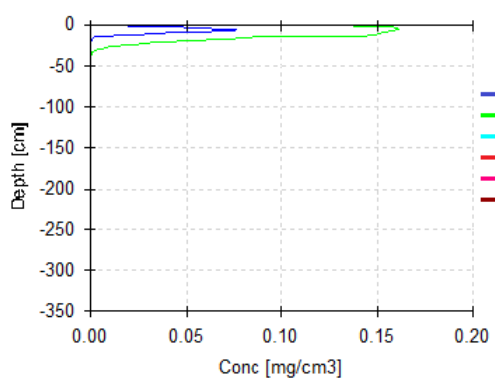


Slika 6.6 Podgrad scenarij 2, urea

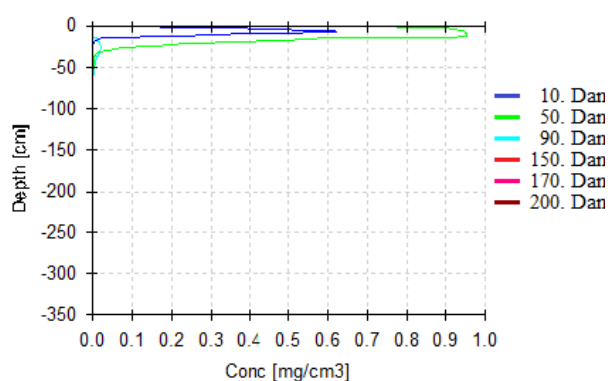
Slika 6.5 Podgrad scenarij 2, NH_4^+ Slika 6.7 Podgrad scenarij 2, NO_2^- Slika 6.8 Podgrad scenarij 2, NO_3^-

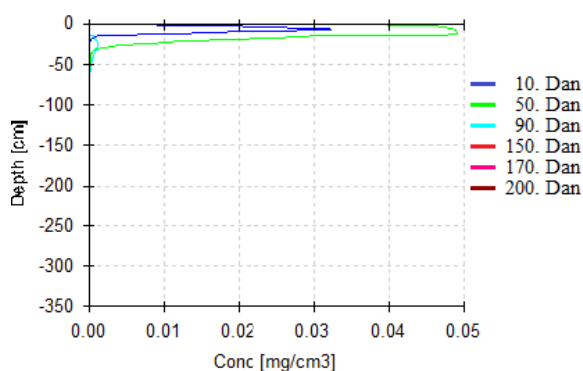
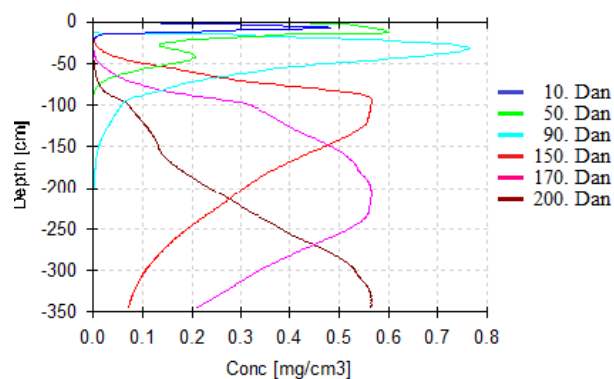
6.1.3 Scenarij 3

Rezultati scenarija 3 za Podgrad so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi presega zakonsko predpisano vrednost $0,05 \text{ mg/cm}^3$ v pitni vodi. Rezultati so razkrili, da koncentracija nitrata v vodi presega predpisano vrednost tudi za več kot 10-krat.



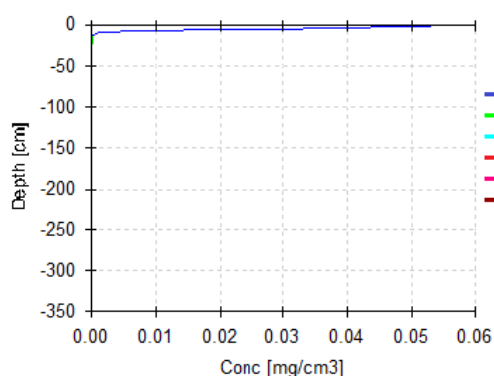
Slika 6.9 Podgrad scenarij 3, urea

Slika 6.10 Podgrad scenarij 3, NH_4^+

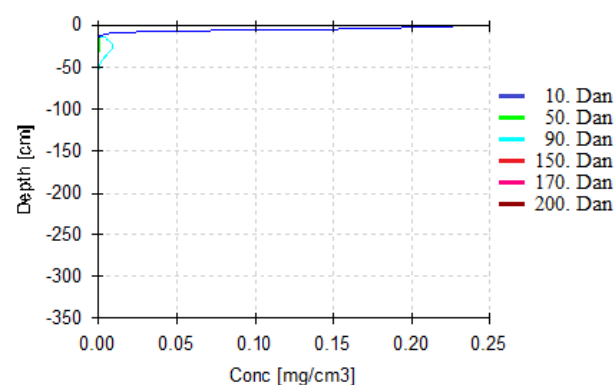
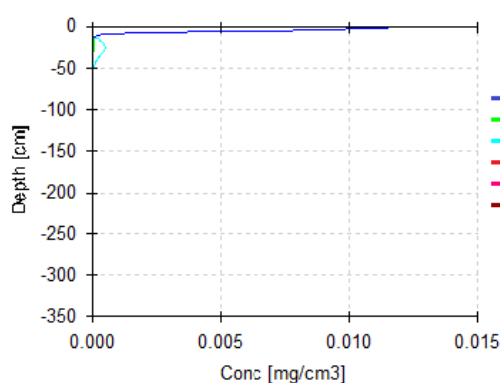
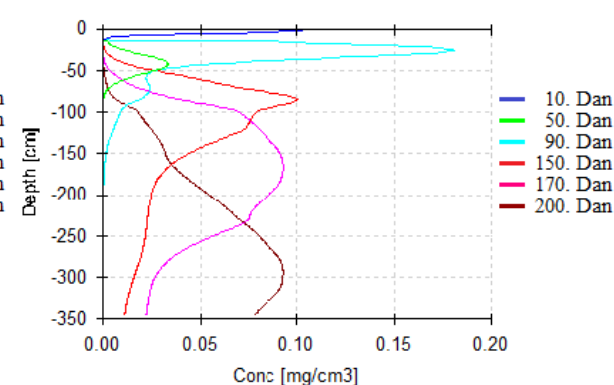
Slika 6.11 Podgrad scenarij 3, NO_2^- Slika 6.12 Podgrad scenarij 3, NO_3^-

6.1.4 Scenarij 4

Rezultati scenarija 4 za Podgrad so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi presega zakonsko predpisano vrednost 0,05 mg/cm³ v pitni vodi. Koncentracijski vrh nitrata je presegal predpisano mejno vrednost za manj kot 2-krat.

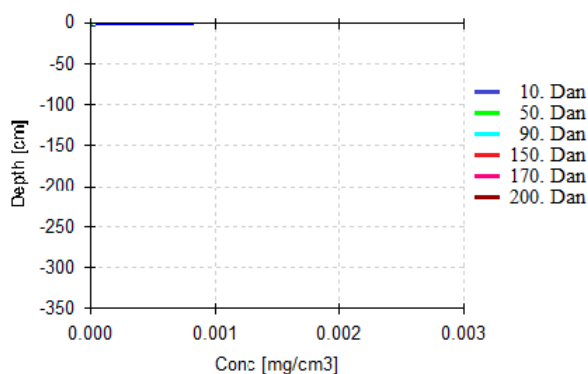


Slika 6.13 Podgrad scenarij 4, urea

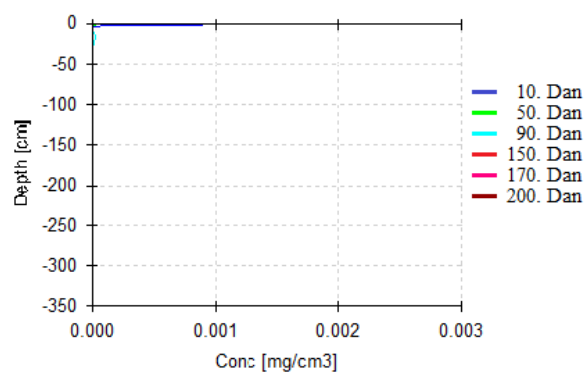
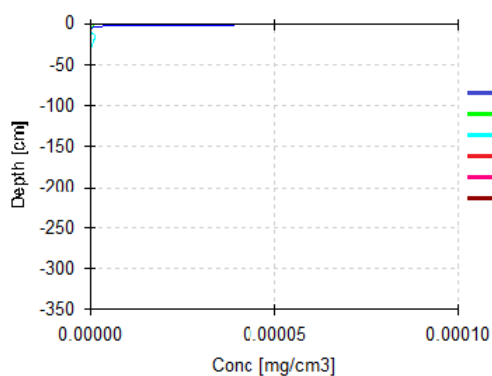
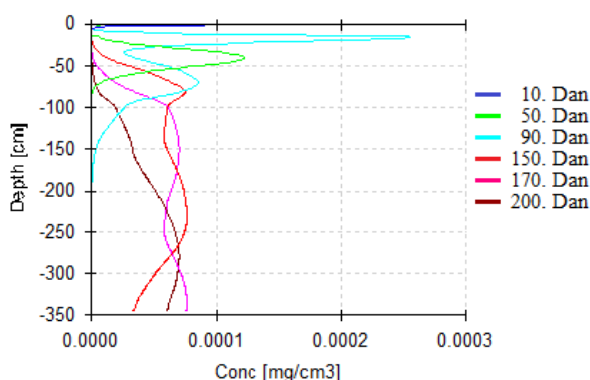
Slika 6.14 Podgrad scenarij 4, NH_4^+ Slika 6.15 Podgrad scenarij 4, NO_2^- Slika 6.16 Podgrad scenarij 4, NO_3^-

6.1.5 Scenarij 5

Rezultati scenarija 5 za Podgrad so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi ne presega zakonsko predpisane vrednosti 0,05 mg/cm³ v pitni vodi.

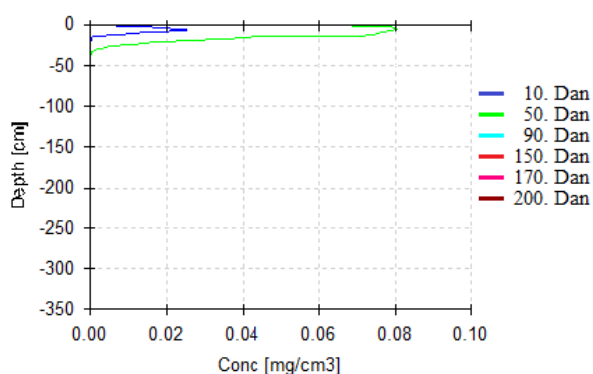


Slika 6.18 Podgrad scenarij 5, urea

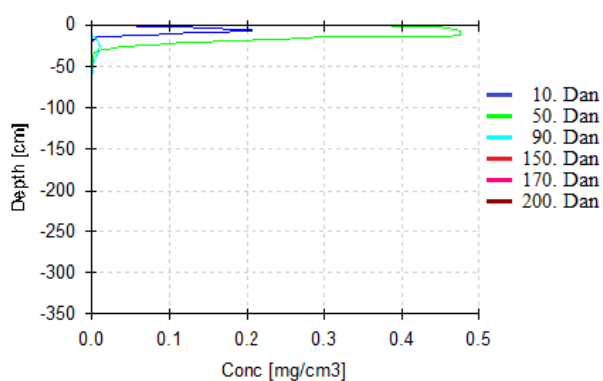
Slika 6.17 Podgrad scenarij 5, NH_4^+ Slika 6.19 Podgrad scenarij 5, NO_2^- Slika 6.20 Podgrad scenarij 5, NO_3^-

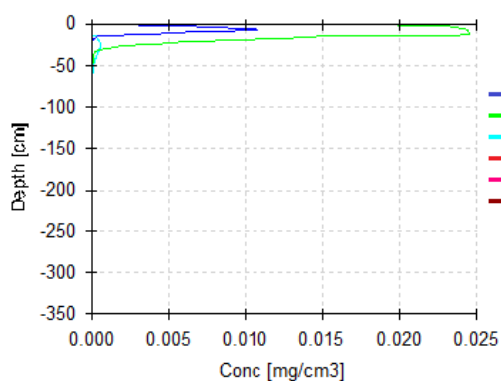
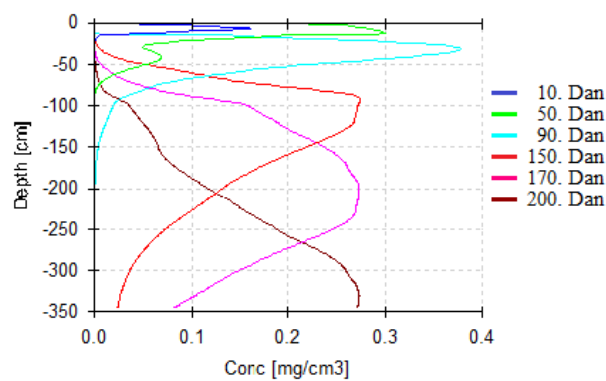
6.1.6 Scenarij 6

Rezultati scenarija 6 za Podgrad so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi presega zakonsko predpisano vrednost 0,05 mg/cm³ v pitni vodi. Koncentracijski vrh nitrata je do vodonosnika prišel v 200. dnevu simulacije in je presegel zakonsko predpisano vrednost za skoraj 3-krat.



Slika 6.21 Podgrad scenarij 6, urea

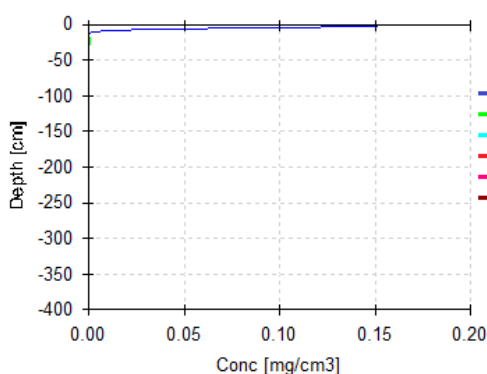
Slika 6.22 Podgrad scenarij 6, NH_4^+

Slika 6.24 Podgrad scenarij 6, NO_2^- Slika 6.23 Podgrad scenarij 6, NO_3^-

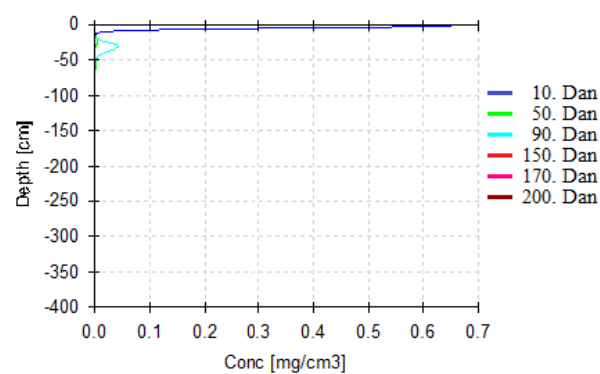
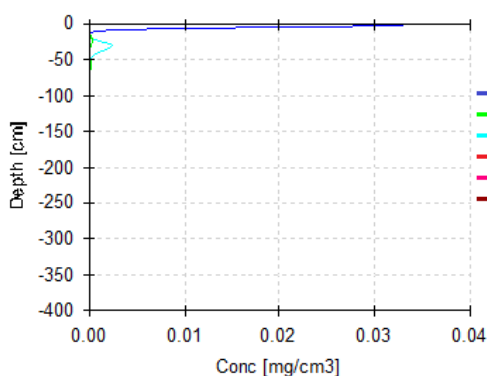
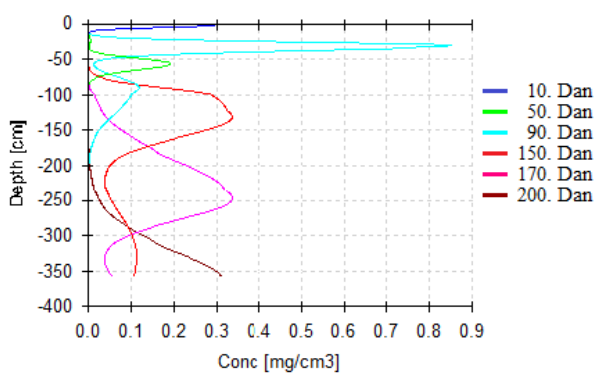
6.2 Rezultati Segovci ob Muri

6.2.1 Scenarij 1

Rezultati scenarija 1 za Segovce ob Muri so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi presega zakonsko predpisano vrednost $0,05 \text{ mg/cm}^3$ v pitni vodi. Rezultati so razkrili, da je koncentracijski vrh nitrata dosegel vodonosnik pred 200. dnevom simulacije in je zakonsko predpisano vrednost presegal za približno 6-krat.

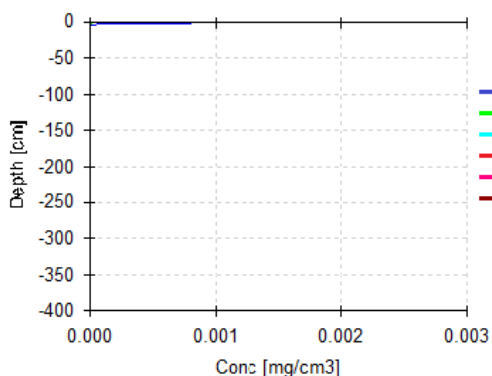


Slika 6.25 Segovci scenarij 1, urea

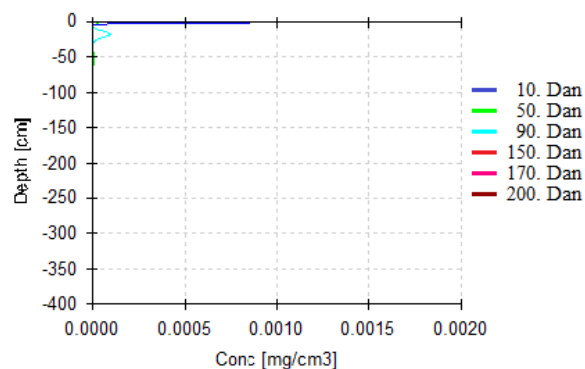
Slika 6.26 Segovci scenarij 1, NH_4^+ Slika 6.27 Segovci scenarij 1, NO_2^- Slika 6.28 Segovci scenarij 1, NO_3^-

6.2.2 Scenarij 2

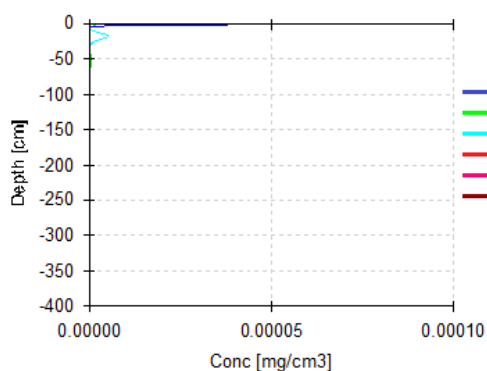
Rezultati scenarija 2 za Segovce ob Muri so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi ne presega zakonsko predpisane vrednosti $0,05 \text{ mg/cm}^3$ v pitni vodi.



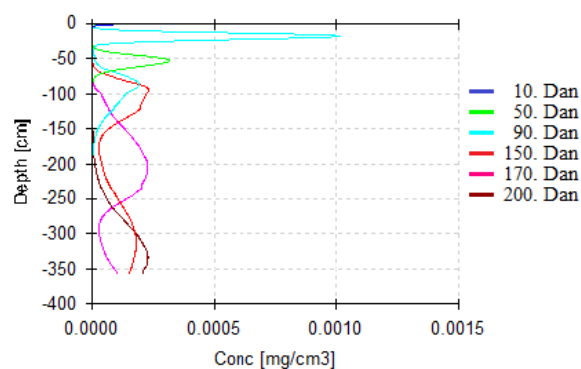
Slika 6.29 Segovci scenarij 2, urea



Slika 6.30 Segovci scenarij 2, NH_4^+



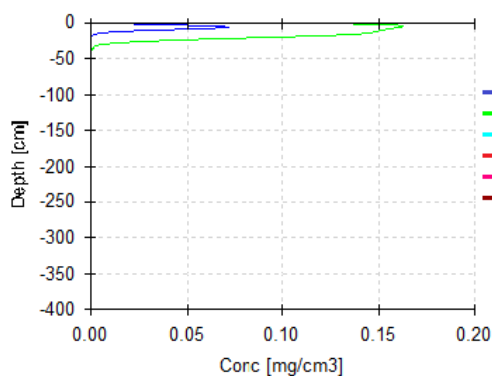
Slika 6.32 Segovci scenarij 2, NO_2^-



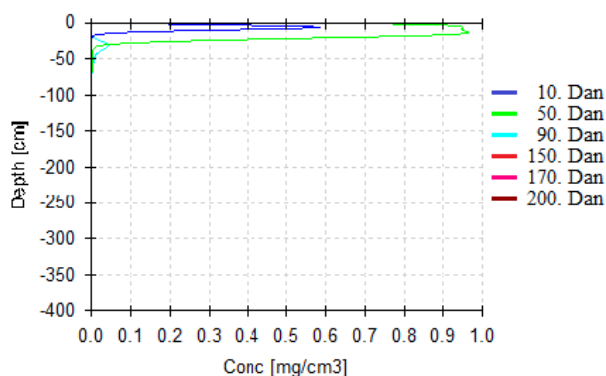
Slika 6.31 Segovci scenarij 2, NO_3^-

6.2.3 Scenarij 3

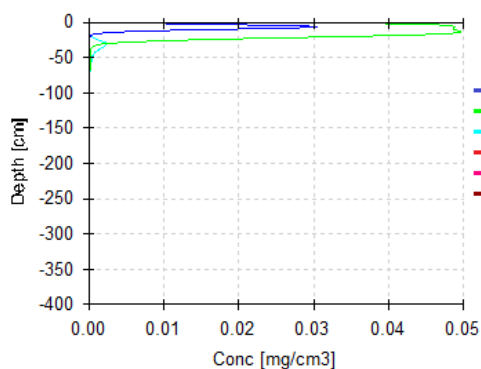
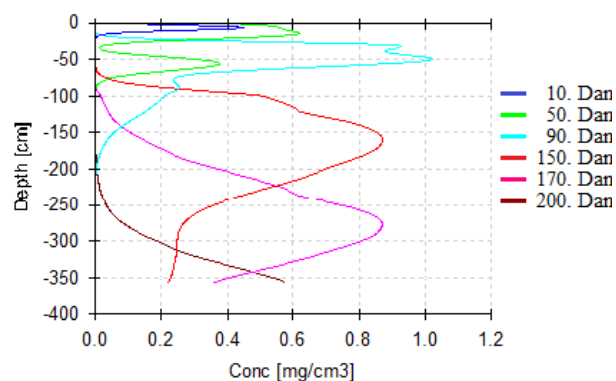
Rezultati scenarija 3 za Segovce ob Muri so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi presega zakonsko predpisano vrednost $0,05 \text{ mg/cm}^3$ v pitni vodi. Vodonosnik je dosegel koncentracijski vrh nitrata pred 200. dnevom simulacije in je za 17-krat presejal zakonsko dovoljeno vrednost.



Slika 6.33 Segovci scenarij 3, urea

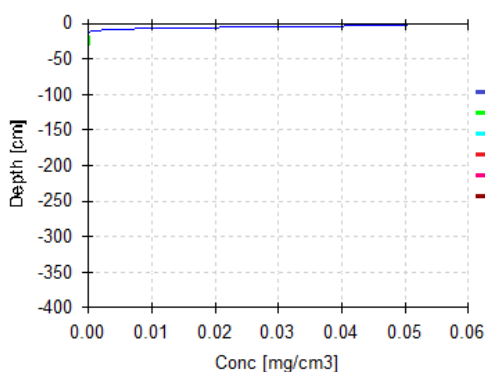


Slika 6.34 Segovci scenarij 3, NH_4^+

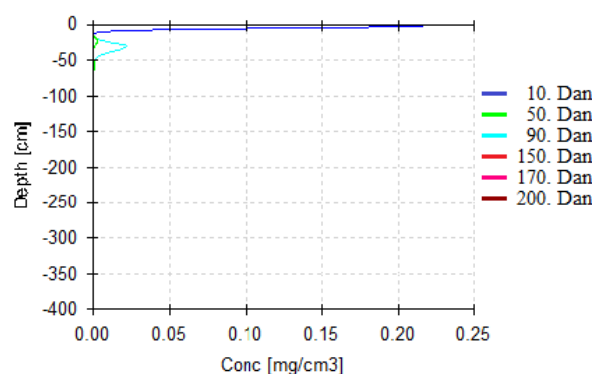
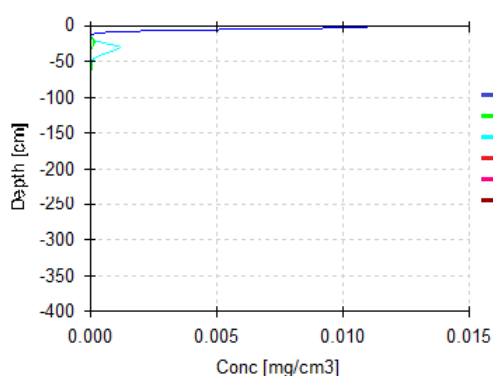
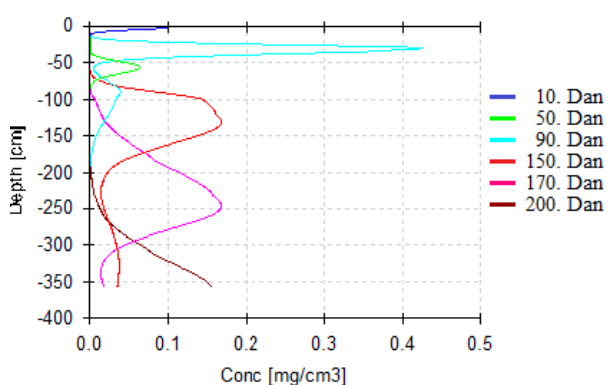
Slika 6.35 Segovci scenarij 3, NO_2^- Slika 6.36 Segovci scenarij 3, NO_3^-

6.2.4 Scenarij 4

Rezultati scenarija 4 za Segovce ob Muri so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi presega zakonsko predpisano vrednost $0,05 \text{ mg/cm}^3$ v pitni vodi. Vodonosnik je dosegel koncentracijski vrh nitrata pred 200. dnevom simulacije in je za 3-krat presegel zakonsko dovoljeno vrednost.

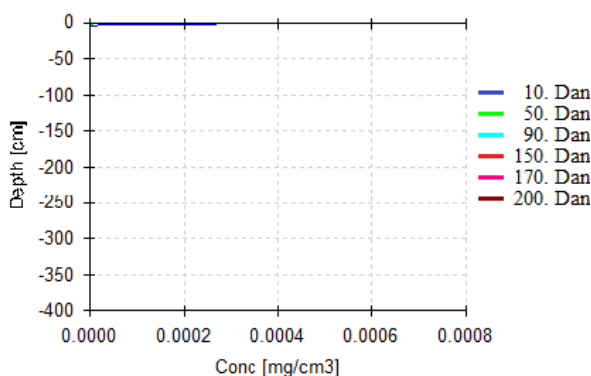


Slika 6.37 Segovci scenarij 4, urea

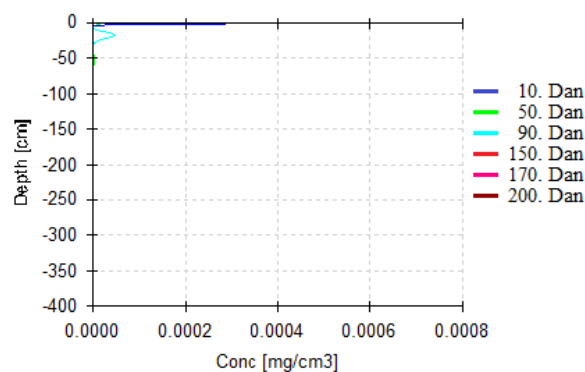
Slika 6.38 Segovci scenarij 4, NH_4^+ Slika 6.40 Segovci scenarij 4, NO_2^- Slika 6.39 Segovci scenarij 4, NO_3^-

6.2.5 Scenarij 5

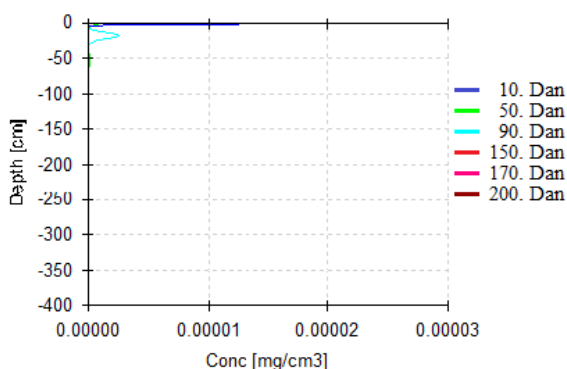
Rezultati scenarija 5 za Segovce ob Muri so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi ne presega zakonsko predpisane vrednosti $0,05 \text{ mg/cm}^3$ v pitni vodi.



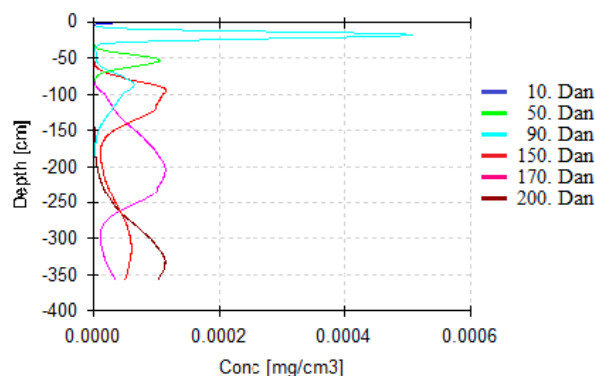
Slika 6.42 Segovci scenarij 5, urea



Slika 6.41 Segovci scenarij 5, NH₄⁺



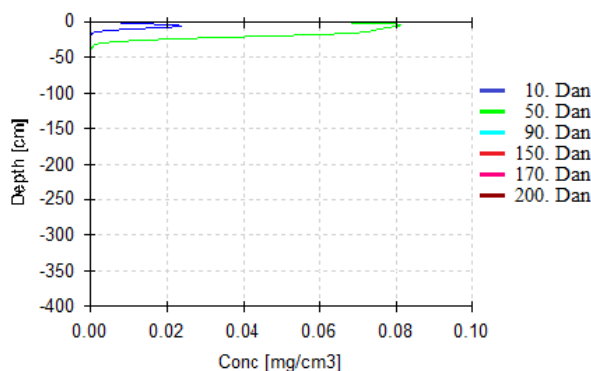
Slika 6.44 Segovci scenarij 5, NO₂⁻



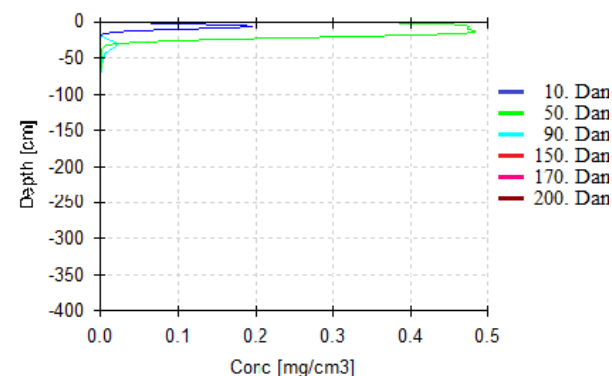
Slika 6.43 Segovci scenarij 5, NO₃⁻

6.2.6 Scenarij 6

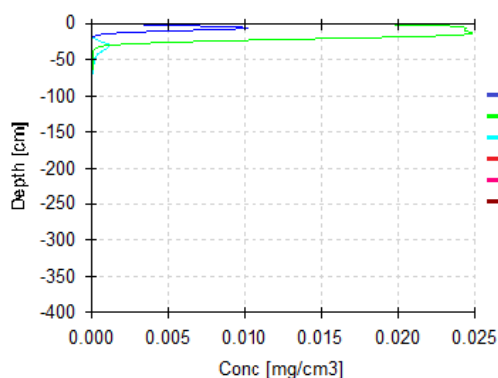
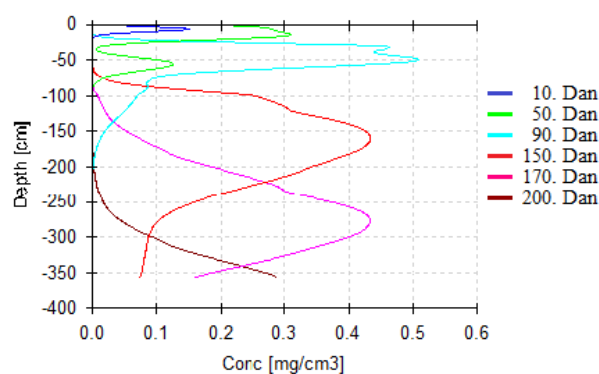
Rezultati scenarija 6 za Segovce ob Muri so pokazali, da koncentracija nitrata v vodi presega zakonsko predpisano vrednost 0,05 mg/cm³ v pitni vodi. Vodonosnik je dosegel koncentracijski vrh nitrata pred 200. dnevom simulacije in je za 8-krat presegel zakonsko dovoljeno vrednost.



Slika 6.45 Segovci scenarij 6, urea



Slika 6.46 Segovci scenarij 6, NH₄⁺

Slika 6.48 Segovci scenarij 6, NO_2^- Slika 6.47 Segovci scenarij 6, NO_3^-

6.3 Primerjava rezultatov

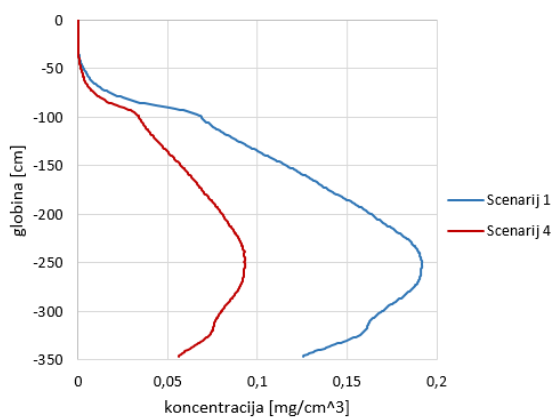
6.3.1 Primerjava rezultatov za Podgrad

Na slikah 6.49, 6.50 in 6.51 smo naredili primerjavo med scenariji, kjer uporabnik gnojila ne upošteva vodovarstvene uredbe (modre krivulje) in scenariji, kjer uporabnik upošteva vodovarstveno uredbo (rdeče krivulje) za profil tal v Podgradu. Scenarije smo časovno združili po obdobjih gnojenja glede na padavine.

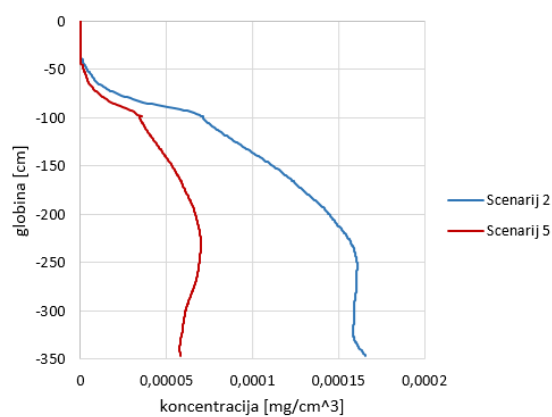
Na sliki 6.49 smo prikazali rezultate dveh scenarijev, kjer smo predpostavili uporabo gnojila v deževnih dneh. Rezultati simulacij so pokazali, da se koncentracijski vrh nitrata v primeru upoštevanja vodovarstvene uredbe zniža za $0,1 \text{ mg/cm}^3$.

Na sliki 6.50 smo prikazali rezultate dveh scenarijev, kjer smo predpostavili uporabo gnojila v suhem vremenskem obdobju. Rezultati simulacij so pokazali, da se koncentracijski vrh nitrata v primeru upoštevanja vodovarstvene uredbe zniža za $0,000091 \text{ mg/cm}^3$.

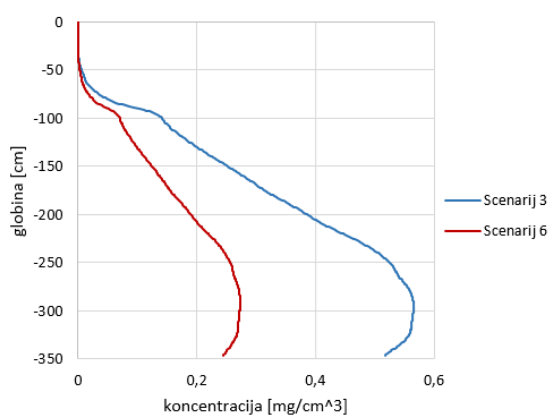
Na sliki 6.51 smo prikazali rezultate dveh scenarijev, kjer smo predpostavili uporabo gnojila v času najintenzivnejših padavin. Rezultati simulacij so pokazali, da se koncentracijski vrh nitrata v primeru upoštevanja vodovarstvene uredbe zniža za $0,29 \text{ mg/cm}^3$.



Slika 6.49 Primerjava rezultatov NO_3^- v 190. dnevni za 1. in 4. scenarij v Podgradu

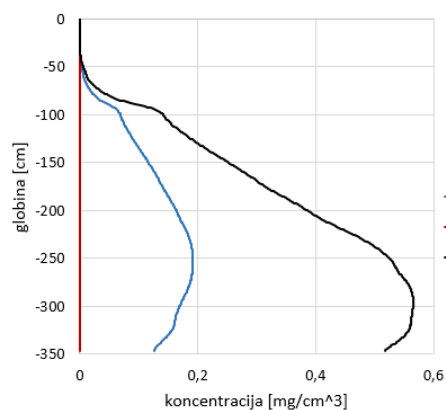


Slika 6.50 Primerjava rezultatov NO_3^- v 190. dnevni za 2. in 5. scenarij v Podgradu

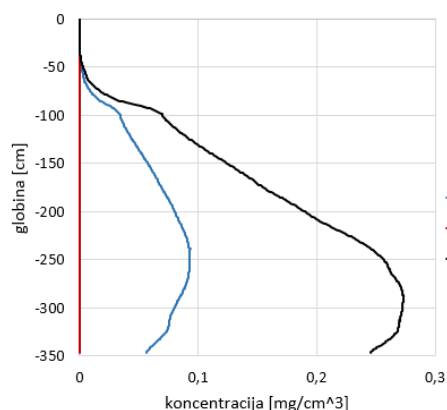


Slika 6.51 Primerjava rezultatov NO_3^- v 190. dnevni za 3. in 6. scenarij v Podgradu

Na sliki 6.52 in sliki 6.53 smo naredili primerjavo rezultatov iz 190. dne simulacije po različnih obdobjih uporabe gnojila glede na padavine za profil tal v Podgradu. Rezultati so pokazali, da v primeru ne upoštevanja vodovarstvene uredbe (slika 6.52) koncentracijski vrh nitrata ni presegel zakonsko predpisane vrednosti nitrata v pitni vodi $0,05 \text{ mg/cm}^3$ le v scenariju 2, kjer smo predpostavili gnojenje v suhem vremenu. Maksimalna vrednost nitrata v scenariju 2 je v 190. dnevni simulacije znašala $0,00016 \text{ mg/cm}^3$. Prav tako so rezultati pokazali, da koncentracijski vrh nitrata v primeru upoštevanja vodovarstvene uredbe (slika 6.53) ni presegel zakonsko predpisane vrednosti le v scenariju 5, kjer smo prav tako predpostavili uporabo gnojila v suhem vremenu. Maksimalna vrednost nitrata v scenariju 5 je v 190. dnevni simulacije znašala $0,00005 \text{ mg/cm}^3$.



Slika 6.52 Primerjava rezultatov NO_3^- za različna obdobja gnojenja v Podgradu za neupoštevanje vodovarstvene uredbe



Slika 6.53 Primerjava rezultatov NO_3^- za različna obdobja gnojenja v Podgradu za upoštevanje vodovarstvene uredbe

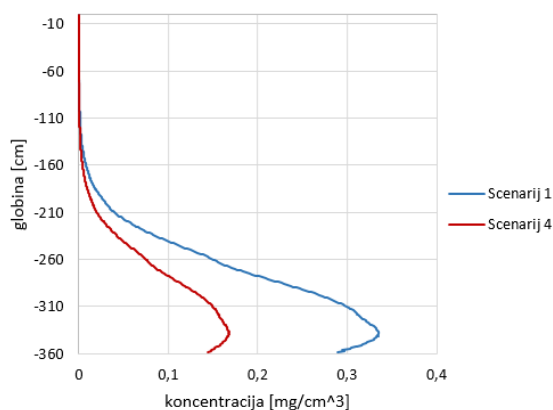
6.3.2 Primerjava rezultatov za Segovce ob Muri

Na slikah 6.54, 6.55 in slika 6.56 smo naredili primerjavo med scenariji, kjer uporabnik gnojila ne upošteva vodovarstvene uredbe (modre krivulje) in scenariji, kjer uporabnik upošteva vodovarstveno uredbo (rdeče krivulje) za profil tal v Segovcih ob Muri. Scenarije smo časovno združili po obdobjih gnojenja glede na padavine.

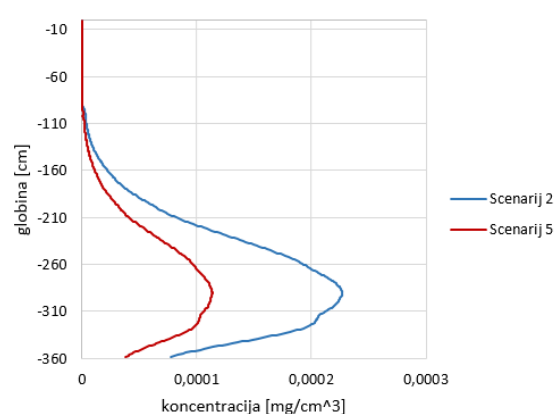
Na sliki 6.54 smo prikazali rezultate dveh scenarijev, kjer smo predpostavili uporabo gnojila v deževnih dneh. Rezultati simulacij so pokazali, da se koncentracijski vrh nitrata v primeru upoštevanja vodovarstvene uredbe zniža za $0,17 \text{ mg/cm}^3$.

Na sliki 6.55 smo prikazali rezultate dveh scenarijev, kjer smo predpostavili uporabo gnojila v suhem vremenskem obdobju. Rezultati simulacij so pokazali, da se koncentracijski vrh nitrata v primeru upoštevanja vodovarstvene uredbe zniža za $0,00011 \text{ mg/cm}^3$.

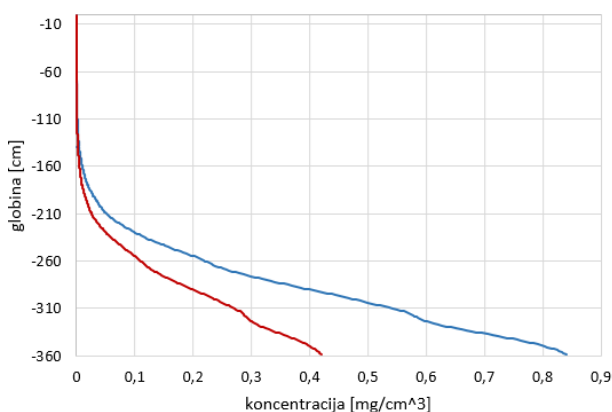
Na sliki 6.56 smo prikazali rezultate dveh scenarijev, kjer smo predpostavili uporabo gnojila v času najintenzivnejših padavin. Rezultati simulacij so pokazali, da se koncentracijski vrh nitrata v primeru upoštevanja vodovarstvene uredbe zniža za $0,42 \text{ mg/cm}^3$.



Slika 6.54 Primerjava rezultatov NO_3^- v 190. dnevu za 1. in 4. scenarij v Segovcih ob Muri

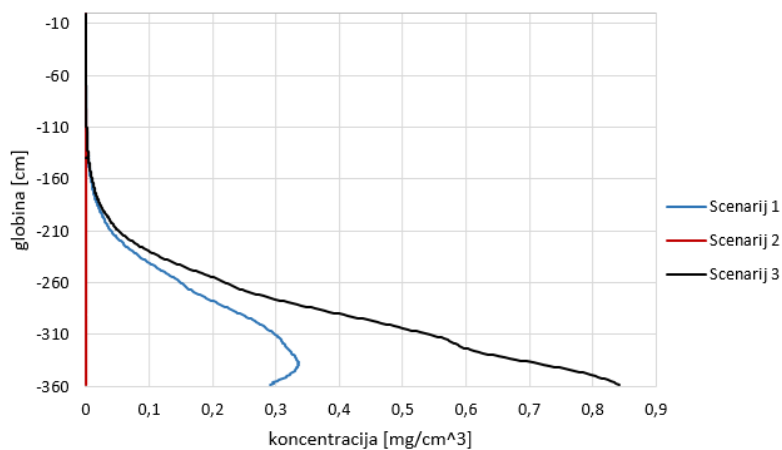


Slika 6.55 Primerjava rezultatov NO_3^- v 190. dnevu za 2. in 5. scenarij v Segovcih ob Muri

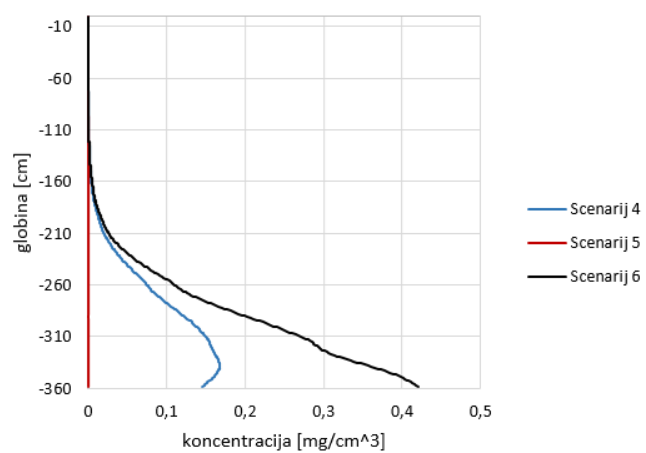


Slika 6.56 Primerjava rezultatov NO_3^- v 190. dnevu za 3. in 6. scenarij v Segovcih ob Muri

Na sliki 6.57 in sliki 6.58 smo naredili primerjavo rezultatov iz 190. dne simulacije po različnih obdobjih uporabe gnojila glede na padavine za profil tal v Segovcih ob Muri. Rezultati so pokazali, da v primeru ne upoštevanja vodovarstvene uredbe (slika 6.57) le v scenariju 2 koncentracijski vrh nitrata ni presegel zakonsko predpisane vrednosti v pitni vodi. Maksimalna vrednost nitrata v scenariju 2 je bila $0,00022 \text{ mg/cm}^3$. Enako stanje so pokazali rezultati v primeru upoštevanja vodovarstvene uredbe. Zakonsko predpisano vrednost nitrata v pitni vodi $0,05 \text{ mg/cm}^3$ ni presegel le scenarij 5.



Slika 6.57 Primerjava rezultatov NO_3^- za različna obdobja gnojenja v Segovcih za neupoštevanje vodovarstvene uredbe



Slika 6.58 Primerjava rezultatov NO_3^- za različna obdobja gnojenja v Segovcih za neupoštevanje vodovarstvene uredbe

7 DISKUSIJA

V podpoglavju 6 so bili prikazani rezultati vseh scenarijev iz simulacij modela Podgrad in modela Segovci ob Muri. Iz grafov, na katerih so prikazane krivulje koncentracij raztopljenega gnojila urea, je razvidno, da se je gnojilo urea v vseh scenarijih raztopilo pred 90. dnevom simulacije. Rezultati so pokazali, da se večja koncentracija gnojila raztopi, če gnojilo uporabljamo v deževnih dneh. Prav tako je iz rezultatov razvidno, da je bilo raztapljanje gnojila počasnejše, če smo predpostavili uporabo gnojila v suhih dneh ter se raztopljeno gnojilo ni spralo v tla.

Rezultati amonija so pokazali, da v vseh scenarijih sledijo dogajanju raztapljanja gnojila urea. Razvidno je, da je amonij nastajal v majhnem zamiku, saj so koncentracije amonija vidne tudi v 90. dnevnu simulacije. Zaradi pozitivnega naboja amonija so rezultati prav tako pokazali, da se ne transportira v globlje predele tal.

Po nitrifikacijski verigi sledi vmesni člen nitrifikacije – nitrit. Čeprav je nitrat dobro mobilen v tleh, so rezultati razkrili, da nitrit ni pronical globlje v tla kot amonij. K temu pripomore hitra biokemijska reakcija, ki spreminja nitrit v nitrat. Nitrit tako ni dolgo obstojen v tleh, zato so bile njegove koncentracije nizke.

Rezultati nitrata v tleh so pokazali, da je v vseh scenarijih najvišja koncentracija nitrata v tleh do globine 50 cm in v času 90. dne simulacije. Vidno je, da prva tretjina profila tal v Podgradu dobro zadržuje pronicanje nitrata. Nitrat je dobro mobilen v tleh in se skupaj z vodo pomika proti vodonosniku. Ker je v profilu tal na globini 1 m glinasta plast, se prevodnost tal v tem delu zmanjša in s tem jer onemogočen hiter odtok v vodi raztopljenega nitrata v vodonosnik. Profil tal iz Segovcev ob Muri ne vsebuje glinaste plasti. Prevodnost tal tako ostaja višja, kar ima negativen vpliv na koncentracijo nitrata v podzemni vodi. Rezultati so prav tako pokazali, da nitrat v peščenem delu tal neovirano pronica v podzemno vodo, saj se koncentracijski vrh bistveno ne zmanjša.

8 SKLEP

V magistrskem delu smo izdelali več simulacij toka padavinske vode in onesnaževala skozi nenasičeno cono vodonosnika na Apaškem polju. Simulacije smo izdelali za dva različna profila tal, in sicer za profil tal iz Podgrada in profil tal iz Segovcev ob Muri. Onesnaževalo je v magistrski nalogi predstavljal nitrat v vodi, ki je zadnji člen verige razpada gnojila urea.

Pregled dobljenih rezultatov je pokazal, da koncentracija nitrata v vodi zakonsko dovoljene vrednosti ne presega le v scenarijih, kjer smo predpostavili uporabo gnojila v suhem vremenu. Kljub upoštevanju vodovarstvene uredbe in »napačni« uporabi gnojila so vrednosti nitrata v vodi znatno višje od zakonsko predpisane vrednosti. Rezultati so prav tako pokazali, da je profil tal v Segovcih ob Muri občutljivejši od profila tal v Podgradu. Profil tal v Podgradu vsebuje tanko plast gline, ki nekoliko zaščiti vodonosnik pred večjim spiranjem nitrata v podzemno vodo.

Glede na dobljene rezultate simulacij in prebrano literaturo lahko za izboljšanje stanja kakovosti pitne vode iz vodonosnika Apaškega polja predlagamo naslednje ukrepe:

- uporabo gnojila le v suhem vremenskem obdobju,
- natančnejšo in zanesljivejšo napoved vremena, po katerem bi se lahko uporabnik gnojila »orientiral«,
- morebitno menjavo zemljišč, s čimer bi pridelovali pridelke z večjo potrebo po hranilih na manj občutljivih tleh,
- pogostejšo analizo tal,
- ponovno zaostritev zakonodaje, katera se je po letu 2013 »omehčala« in
- biološki način kmetovanja.

9 LITERATURA

- [1] *Amonijev nitrat* [svetovni splet]. Wikipedija. Dostopno na: https://sl.wikipedia.org/wiki/Amonijev_nitrat [28. 9. 2015]
- [2] Anne E. Egger. *Visionlearning – your insight into science: Earth Cycles – The Hydrologic Cycle: Water's journey throught time* [svetovni splet]. Visionlearning Vol., 2003. Dostopno na: <http://www.visionlearning.com/en/library/Earth-Science/6/The-Hydrologic-Cycle/99> [28. 9. 2015]
- [3] *Atlas okolja* [svetovni splet]. Agencija Republike Slovenije za okolje. Dostopno na: http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso [25. 10. 2015]
- [4] Blaine R. Hanson, Jirka Šimunek, Jan W. Hopmans. *Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling* [svetovni splet]. ELSEVIER 2006. Dostopno na: www.sciencedirect.com [7. 12. 2015]
- [5] Clifford I. Voss in Alden M. Provost. *SUTRA – A Model for Satutated-Unsaturated, Variable-Density ground-Water Flow with Solute or Energy Transport* [svetovni splet]. Reston: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 2010. Dostopno na: <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware> [23. 10. 2015]
- [6] *Contaminant Transport in the Unsaturated Zone Theory and Modeling* [svetovni splet]. Pc-progress. Dostopno na: http://www.pc-progress.com/Documents/Jirka/Handbook_of_GE_Proofs.pdf [26. 9. 2015]
- [7] J. Šimunek, M. Šejna, H. Saito, M. Sakai in M. Th. Van. *The HYDRUS-1D Software Package for Simulationg the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably_Saturated Media* [svetovni splet]. Department of Environmental Sciences University of California Riverside 2009. Dostopno na: <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-1d> [13. 11. 2015]
- [8] James A. Tindall, James R. Kunkel. *Unsaturated Zone Hydrology – for Scientists and Engineers* [svetovni splet]. Denver: U.S. Geological Survey, 2008. Dostopno na: http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GW_Unsat/Unsat_Zone_Book/ [5. 10. 2015]
- [9] John M. Klein, Wesley L. Bradford. *Distribution of Nitrate in the Unsaturated Zone Highland – East Highlands Area San Bernardion County, California* [svetovni splet]. California: U.S. Geological Survey, Water Resources Diavision, 1980. Dostopno na: <http://pubs.usgs.gov/wri/1980/0048/WRIR80-48.pdf> [31. 9. 2015]

- [10] *Kemijske lastnosti vode* [svetovni splet]. Primavoda. Dostopno na: <http://www.primavoda.si/vse-o-vodi> [8. 8. 2015]
- [11] M. Orešnik, M. Vremec, S. Hajnc, T. Gorenšek, K. Kolar, K. Kuzmič, D. Gošnjak, A. Šutar, A. Praprotnik, P. Pukšič. *VRPAP – Vodonosnik Vrbanski plato in Apaško polje, orodja za trajnostno zagotavljanje vodnih virov*. Maribor: Univerza v Mariboru, 2015.
- [12] Mag. Polonca Mihorko, Gacin Marina univ. dipl. inž. Geol. *Ocena kemijskega stanja podzemnih voda v Sloveniji v letu 201* [svetovni splet]. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE, 2014. Dostopno na: http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/Porocilo_podzemne_2013_12.12.2014.pdf [1. 8. 2015]
- [13] *Ministrstvo za okolje in prostor, Uradna vremenska napoved za Slovenijo* [svetovni splet]. Agencija Republike Slovenije za okolje. Dostopno na: <http://meteo.arso.gov.si/> [10. 1. 2016]
- [14] Nika Tomažič. *Ugotavljanje vpliva gnojenja z mineralnim gnojilom na kakovost vode v nezasičeni coni kraškega vodonosnika trnovske planote (diplomsko delo)* [svetovni splet]. Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju 2007. Dostopno na: <http://repozitorij.ung.si/Dokument.php?id=730> [18. 12. 2015]
- [15] *PODZEMNE VODE – izpis podatkov po vodnih telesih za leto 2014 – Murska kotlina* [svetovni splet]. AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE. Dostopno na: http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/2014_4016.pdf [1. 8. 2015]
- [16] *Podzemne vode*. [svetovni splet]. Agencija Republike Slovenije za okolje. Dostopno na: <http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/programi/PROGRAM%20GW%202010.pdf> [8. 8. 2015]
- [17] Pravilnik o pitni vodi. Uradni list RS, št. 19/2004.
- [18] Prof. dr. Lučka Kajfež-Bogataj. *METEOROLOGIJA, Gradiva za študente – gozdarji*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.
- [19] Sanja Horvat Grilanc, dipl. ms. *Kakovost pitne vode v občini Apače (magistrsko delo)* [svetovni splet]. Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za zdravstvene vede, 2014. Dostopno na: <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=44483> [1. 8. 2015]
- [20] Sebastian Braum. *Fertilizer Nitrogen & Nitrate Leaching* [svetovni splet]. Yara North America. Dostopno na: <http://www.waterboards.ca.gov/> [20. 12. 2013]
- [21] Umetna gnojila [svetovni splet]. Vrt & Narava. Dostopno na: <http://www.vrtnarava.si/vrtna-dela/gnojenje/umetna-gnojila> [18. 12. 2015]

- [22] *Unsaturated Flow Processes – Unsaturated Flow Basics* [svetovni splet]. USGS science for a changing world. Dostopno na: <http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/unsatflow/unsatflow.html> [26. 9. 2015]
- [23] Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Apaškega polja. Uradni list RS, št. 22/13.
- [24] Valerija Kaluder. *Spremljanje mobilnih oblik dušika v tleh pri različnih načinih dognojevanja hmelja (*humulus lupulus L.*) z dušikom (diplomsko delo)* [svetovni splet]. Velenje: Visoka šola za varstvo okolja, 2013. Dostopno na: http://www.vsvo.si/images/pdf/2014010618_DIPLOMSKO_DELO_VALERIJA_KALUDER_CD_PDF.pdf [28. 9. 2015]
- [25] *VODOVARSTVENA OBMOČJA – Srečanje z župani slovenskih občin* [svetovni splet]. Republika Slovenija, Ministrstvo za zdravje, Urad Republike Slovenije za kemikalije. Dostopno na: http://www.uk.gov.si/fileadmin/uk.gov.si/pageuploads/pdf/Vodovarstvena_obmocja_Matoz_.pdf [10. 2. 2016]

UNIVERZA V MARIBORU
Fakulteta za strojništvo

IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE VERZIJE ZAKLJUČNEGA DELA IN OBJAVI
OSEBNIH PODATKOV MAGISTRANTOV

Ime in priimek magistranta-tke: Simon Hajnc

Vpisna številka: 52.003.025

Študijski program: 2. STOPNJA TEHNIŠKO VARSTVO OKOLJA

Naslov magistrskega dela: Tok vode in onesnaževal skozi nenasičeno sredino

Mentor: Jure Ravnik

Somentor: _____

Podpisani-a Simon Hajnc izjavljam, da sem za potrebe arhiviranja oddal elektronsko verzijo zaključnega dela v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru. Magistrsko delo sem izdelal-a sam-a ob pomoči mentorja. V skladu s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah dovoljujem, da se zgoraj navedeno zaključno delo objavi na portalu Digitalne knjižnice Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija magistrskega dela je istovetna elektronski verziji, ki sem jo oddal za objavo v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

Zaključno delo zaradi zagotavljanja konkurenčne prednosti, varstva industrijske lastnine ali tajnosti podatkov naročnika: _____ ne sme biti javno dostopno do _____ (datum odloga javne objave ne sme biti daljši kot 3 leta od zagovora dela).

Podpisani izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum magistriranja, naslov magistrskega dela) na spletnih straneh in v publikacijah UM.

Datum in kraj:

Maribor, 09.08.2016

Podpis magistranta-tke:

Hjnc

Podpis mentorja _____
(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno):

Podpis odgovorne osebe naročnika in žig: _____
(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)