

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidat:

Blaž Horvat

Aktivna zaščita vodarne Hrastje

Diplomska naloga št.: 37

Mentor:
prof. dr. Boris Kompare

Ljubljana, 7. 10. 2005

Stran za popravke, Errata

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

**Podpisani BLAŽ HORVAT izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»AKTIVNA ZAŠČITA VODARNE HRASTJE«.**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 07.10.2005

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK:	628.19(043.2)
Avtor:	Blaž Horvat
Mentor:	izr. prof. dr. Boris Kompare
Naslov:	Aktivna zaščita vodarne Hrastje
Obseg in oprema:	82 str., 5 tab., 63 sl., 83 en.
Ključne besede:	Aktivna zaščita, umetno bogatenje, varovanje vodnih virov, vodarna Hrastje, model podtalnice Ljubljanskega polja, MIKE-SHE

Izvleček

V diplomski nalogi je predstavljen možen način zaščite vodarne Hrastje pred onesnaženjem. V prvem delu je opisan matematični model podtalnice Ljubljanskega polja, ki je narejen v programskem orodju MIKE-SHE. Sledi opis zmogljivosti vodarne Hrastje, pomembnosti njene lokacije in vpliva okoliških dejavnosti ter pregled kakovosti načrpane vode. Ogroženost pred onesnaženjem z obstoječo zaščito, z vodovarstvenimi pasovi, je preizkušena z modulom za sledenje delcev v programskem orodju MIKE-SHE. Kot rešitev je predlagana aktivna zaščita, pri kateri z umetnim bogatenjem ustvarimo tako imenovano vodno zaveso, s katero odrinemo potencialno onesnaženo vodo izpod mesta. S tem dobimo kontrolo nad kvaliteto vstopajoče vode, obenem pa lahko še povečamo zmogljivost črpališča in zmanjšamo obstoječe vodovarstvene pasove. Vodo, s katero bogatimo, moramo predhodno ustrezno pripraviti. Podrobneje so predstavljeni trije načini zajema (surova voda, obrežni filtrat z drenažo in z vodnjaki) in temu primerna predpriprava vode (koagulacija, flokulacija, lamelni usedalnik, hitri filter, ogljeni filter, kaskade). Za vse različice so podani izračuni vseh postopkov priprave. Nato so bile s pomočjo modula za sledenje delcev določene lokacije nalivalnih vodnjakov in potrebne količine vode za nalivanje. Kot dokaz učinkovitosti zaščite, so rezultati končne rešitve primerjani z obstoječim stanjem. Za vsako različico rešitve so izračunani tudi obratovalni stroški, ki so prav tako primerjani z obstoječimi.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 628.19(043.2)
Author: Blaž Horvat
Supervisor: Assoc. Prof. Boris Kompare, Ph.D.
Title: Active protection of waterworks Hrastje
Notes: 82 p., 5 tab., 63 fig., 83 eq.
Key words: active protection, artificial recharge, drinking water protection, waterworks Hrastje, water resources management model for Ljubljana field, MIKE-SHE

Abstract

A possible method of protection of waterworks Hrastje against pollution is presented in this diploma. First chapter includes a description of water resources management model for Ljubljana field that is made in software tool for groundwater modeling called MIKE-SHE. In the following chapter is an outline of waterworks Hrastje, its pumping capacity, importance of its location and impacts of surrounding activities and examination of quality of pumped water. Threat to pollution with existing protection zones is tested with module for particle tracking in software tool MIKE-SHE. As a suitable solution active protection is suggested. The method is based on artificial recharge of groundwater. The infiltration forms so called »water curtain«, which pushes away potentially polluted water bellow the city and so protects the pumped drinking water from pollution. With that we acquire the control over quantity and quality of water before its infiltration and at the same time we are able to increase the pumping capacity of waterworks and reduce the protection zones. The water must be suitably prepared before infiltration. Three ways of water capture are described in greater detail (raw water from river, riverbank filtrate with drainage and with wells) and in accordance with that captured water is suitably prepared (coagulation, flocculation, tube settler, rapid sand filter, active carbon filter, and aeration cascades). Calculations were made for all procedures. The locations of infiltration wells and the necessary amounts of water for recharge were determined by module for particle tracking. As evidence of efficiency of active protection, results of final solution are compared with existent state. The operation costs were also calculated for every version of solution and were likewise compared with existent ones.

ZAHVALA

Za mentorstvo, pomoč in potrpežljivost se zahvaljujem izr. prof. dr. Borisu Komparetu.

Hvala Javnemu podjetju VO-KA Ljubljana za potrebne podatke in uporabo programske opreme.

Za prijetno delovno vzdušje in pomoč se zahvaljujem kolektivu Razvojne službe JP VO-KA.

Posebna zahvala gre dr. Brigiti Jamnik za vse koristne nasvete, predloge in čas, ki ga je posvetila mojemu delu.

Staršem sem hvaležen za zdravo pamet.

Hvala družini za podporo, ki sem jo imel v času študija - naj tako tudi ostane.

Hvala moji Maji, brez prave ženske roke pač ne gre.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD Z OPISOM NALOGE.....	1
2 OPIS MODELA LJUBLJANSKEGA POLJA.....	3
2.1 Opis programskega orodja MIKE SHE in MIKE 11	3
2.2 Vhodni podatki hidravličnega modela	6
2.2.1 Zgradba modela	7
2.2.2 Meteorološki podatki	7
2.2.3 Hidrološki podatki	8
2.2.4 Geološki in hidrogeološki podatki	9
2.2.5 Vpliv prepustnosti struge reke Save na dinamiko podzemne vode	10
2.2.6 Hitrost pretakanja podzemne vode.....	11
3 OPIS VODARNE HRASTJE.....	13
3.1 Vpliv dejavnosti	15
3.2 Pregled kakovosti podtalnice	15
3.3 Občutljivost vodarne Hrastje na morebitno onesnaženje.....	20
3.3.1 Rezultati simulacije.....	21
4 AKTIVNA ZAŠČITA VODARNE.....	32
4.1 Možni načini predpriprave vode za umetno bogatenje	34
4.1.1 Direktni zajem savske vode.....	35
4.1.2 Zajem obrežnega filtrata z vodnjaki	47
4.1.3 Zajem obrežnega filtrata z drenažo.....	51
4.2 Nalivalni vodnjaki.....	55
4.2.1 Rezultati simulacije z umetnim bogatenjem	57
5 OCENA STROŠKOV OBRATOVANJA	72
6 ZAKLJUČEK.....	76

7 VIRI	78
7.1 Uporabljeni viri	78
7.2 Ostali viri	81
8 PRILOGE.....	83

KAZALO SLIK

Slika 1: Shema modela izdelanega z MIKE SHE (DHI Water and Enviroment, 1999a).....	4
Slika 2: Modelirana gladina in hitrosti pretakanja podzemne vode 27.8.1993-nizke vode (Auersperger, P., et al, 2005).	12
Slika 3: Modelirana gladina in hitrosti pretakanja podzemne vode 5.11.1992-visoke vode (Auersperger, P., et al, 2005).	12
Slika 4: Vodarna Hrastje z bližnjo okolico (Auersperger, P., et al, 2005).....	13
Slika 5: Količine načrpane vode v vodarni Hrastje od 1995 do 2004.....	14
Slika 6: Vodovarstvena območja na območju vodarne Hrastje.	14
Slika 7: Prikaz spreminjanja koncentracij nitratov v podtalnici vodarne Hrastje v letih 93-99 (Jamnik, 2000b)	17
Slika 8: Prikaz spreminjanja koncentracij kloridov v podtalnici vodarne Hrastje v letih 93-99 (Jamnik, 2000b).	17
Slika 9: Prikaz spreminjanja koncentracij atrazina in desetilatrazina v podtalnici vodnjaka Ia vodarne Hrastje v letih 97-2000 (Jamnik, 2000b).....	18
Slika 10: Spreminjanje koncentracije atrazina in desetilatrazina v vodnjaku Hrastje Ia v letih 1997-2000 in časovni niz količine padavin (Jamnik, 2000b).	18
Slika 11: Spreminjanje koncentracije atrazina v vodnjakih Ia, III in II vodarne Hrastje v letu 2000 in časovni niz količine padavin (Jamnik, 2000b).....	19
Slika 12: Spreminjanje koncentracije desetilatrazina v vodnjakih Ia, III in II vodarne Hrastje v letu 1999 in 2000 in časovni niz količine padavin (Jamnik, 2000b).....	19
Slika 13: Gladina podtalnice v piezometru Obrije od 1992 do 1997 (JP VO-KA).	20
Slika 14: Hidroizohipse v obdobju visokih voda pri črpanju 540 l/s.....	22
Slika 15: Hidroizohipse v obdobju nizkih voda pri črpanju 540 l/s.....	22
Slika 16: Uporabljen koordinatni sistem v programskem orodju MIKE SHE (DHI Water and Enviroment, 1999a).....	23
Slika 17: Hitrosti v smeri x pri črpanju 540 l/s.	23
Slika 18: Hitrosti v smeri x pri črpanju 540 l/s.	24
Slika 19: Hitrosti v smeri y pri črpanju 540 l/s.	24
Slika 20: Hitrosti v smeri y pri črpanju 540 l/s.	25

Slika 21: Začetne lokacije delcev, ki so prišli v črpalne vodnjake pri črpanju 540 l/s v obdobju visokih vod.	26
Slika 22: Začetne lokacije delcev, ki so prišli v črpalne vodnjake pri črpanju 540 l/s v obdobju nizkih vod.	26
Slika 23: Oblak onesnaženja 46 dni od začetka simulacije, nizke vode.....	27
Slika 24: Oblak onesnaženja 96 dni od začetka simulacije, nizke vode.....	27
Slika 25: Oblak onesnaženja 166 dni od začetka simulacije, nizke vode.....	28
Slika 26: Oblak onesnaženja 196 dni od začetka simulacije, nizke vode.....	28
Slika 27: Oblak onesnaženja 39 dni od začetka simulacije, visoke vode.....	29
Slika 28: Oblak onesnaženja 69 dni od začetka simulacije, visoke vode.....	29
Slika 29: Oblak onesnaženja 99 dni od začetka simulacije, visoke vode.....	30
Slika 30: Oblak onesnaženja 159 dni od začetka simulacije, visoke vode.....	30
Slika 31: Primer zaščite vodarne z vodovarstvenimi območji (Kompore, B., 2002)	33
Slika 32: Primer zaščite vodarne z vodno zaveso-aktivna zaščita (Kompore, B., 2002)	33
Slika 39: Lokacije uporabljenih nalivalnih in črpalnih vodnjakov ter območje vnosa delcev.	56
Slika 40: Hidroizohipse v obdobju visokih voda, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.....	57
Slika 41: Primerjava hidroizohips v obdobju visokih voda z nalivanjem in brez.	58
Slika 42: Hidroizohipse v obdobju nizkih voda, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.	58
Slika 43: Primerjava hidroizohips v obdobju nizkih voda z nalivanjem in brez.....	59
Slika 44: Območje vpliva nalivanja na gladino podtalnice v obdobju visokih vod.	59
Slika 45: Območje vpliva nalivanja na gladino podtalnice v obdobju nizkih vod.	60
Slika 46: Hitrosti v smeri x v obdobju visokih vod, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s. ...	60
Slika 47: Hitrosti v smeri x v obdobju nizkih vod, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.	61
Slika 48: Hitrosti v smeri y v obdobju visokih vod, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s. ...	61
Slika 49: Hitrosti v smeri y v obdobju nizkih vod, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.	62
Slika 50: Začetne lokacije delcev, ki so prišli v črpalne vodnjake v obdobju visokih vod pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.....	63
Slika 51: Začetne lokacije delcev, ki so prišli v črpalne vodnjake v obdobju nizkih vod pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.....	63
Slika 52: Oblak onesnaženja 39 dni od začetka simulacije, visoke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.....	65

Slika 53: Oblak onesnaženja 99 dni od začetka simulacije, visoke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.	65
Slika 54: Oblak onesnaženja 189 dni od začetka simulacije, visoke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.	66
Slika 55: Oblak onesnaženja 46 dni od začetka simulacije, nizke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.	66
Slika 56: Oblak onesnaženja 76 dni od začetka simulacije, nizke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.	67
Slika 57: Oblak onesnaženja 166 dni od začetka simulacije, nizke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.	67
Slika 58: Oblak onesnaženja 196 dni od začetka simulacije, nizke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.	68
Slika 59: Oblak onesnaženja po 8 dneh po prenehanju nalivanja, obdobje visokih vod.	69
Slika 60: Oblak onesnaženja po 33 dneh po prenehanju nalivanja, obdobje visokih vod.	70
Slika 61: Oblak onesnaženja po 11 dneh po prenehanju nalivanja, obdobje nizkih vod.	70
Slika 62: Oblak onesnaženja po 36 dneh po prenehanju nalivanja, obdobje nizkih vod.	71
Slika 63: Deleži savske vode v opazovanih vodnjakih na podlagi izotopske sestave kisika v vodi (Auersperger, P., <i>et al</i> , 2005).	71

KAZALO TABEL

Tabela 1: Preračun drenažnih krakov.	54
Tabela 2: Količine črpanja in nalivanja.	55
Tabela 3: Učinkovitost bogatenja kot zaščite pred potencialnim onesnaženjem.	64
Tabela 4: Strošek električne energije.	73
Tabela 5: Skupni stroški načrpane vode v vodarni.	74

1 UVOD Z OPISOM NALOGE

Za oskrbo s pitno vodo več kot 300 000 prebivalcev mesta Ljubljane se večinoma črpa podtalnica Ljubljanskega polja. Vodonosnik Ljubljanskega polja je eden največjih v Sloveniji, njegova izdatnost presega potrebe mestne oskrbe s pitno vodo. Žal pa se kvaliteta načrpane vode slabša, v nekaterih vodnjakih je celo neustrezna. Najbolj ogroženi so vodnjaki v vodarni Hrastje, ki je po zmogljivosti druga največja vodarna. Zaradi svoje lokacije v vodovodnem sistemu je zelo pomembna za nemoteno oskrbo mesta s pitno vodo.

Ko so vodarno gradili, so jo postavili na obrobje mesta. To se je z leti širilo. Danes je vodarna obdana s prometnicami in se nahaja tako rekoč sredi mesta, ki jo tudi neposredno ogroža. Še vedno pa je zaščiten z vodovarstvenimi območji. Ta so v preteklosti zagotavljala zadostno zaščito, danes pa ne morejo več ustrezno zaščititi vodarne pred večinoma kemičnimi onesnaževali, ki prihajajo izpod mesta in izpod kmetijskih površin. Kako ranljiva je vodarna, se je pokazalo lansko leto ob izlivu trikloroetena v bližnji okolici vodarne. Edina rešitev je bilačasna zaustavitev vodarne. S takim načinom zaščite, vodarna dolgo ne bo mogla več obratovati. Tega se zavedajo tudi v Javnem podjetju Vodovod-Kanalizacija (v nadaljevanju JP VO-KA) in iščejo možne rešitve.

Problem je rešljiv na več načinov. Na prvi pogled je najbolj enostavna rešitev, da poiščemo nov vir pitne vode, ki jo je v zadostnih količinah in je primerne kvalitete. Takih virov pa običajno v bližnji okolici mesta ni. Tudi če ga najdemo, bo dolgoročno težko ohraniti zadovoljivo kakovost vode. Bolj kot se od mesta oddaljimo, večji so stroški transporta vode. Druga možnost je, da zgradimo čistilno napravo in obstoječi vodni vir z ustrezno tehnologijo prečistimo do zadovoljive kvalitete. V tem primeru so stroški veliki. Tretjo možnost predstavlja ustrezna zaščita obstoječega vodnega vira.

V diplomski nalogi sem predstavil možen način zaščite vodarne Hrastje, tako imenovano aktivno zaščito. Pri tej metodi z umetnim bogatenjem podtalnice ustvarimo »vodno zaveso«, s katero odrinemo potencialno onesnaženo vodo stran ter tako zaščitimo vodarno. Obenem pa na ta način lahko še povečamo njeno zmogljivost. Z umetnim bogatenjem dobimo popoln

nadzor, tako kvalitete kot količine, nad vneseno in črpano količine vode. Poleg tega potrebuje aktivna zaščita znatno manjše varovane površine kot obstoječa. V seminarski nalogi (Horvat, B., 2004) sem kot dokaz učinkovitosti, varnosti in zanesljivosti te metode predstavil tri primere, kjer ta način zaščite uporabljajo že več let.

Učinkovitost predlagane zaščite vodarne Hrastje sem preizkusil na hidravličnem modelu Ljubljanskega polja, ki je narejen v programskem orodju MIKE-SHE. Na podlagi izračunov potrebnih količin črpanja in predpriprave vode za bogatenje sem ocenil tudi obratovalne stroške novega načina zaščite in jih primerjal z obstoječimi.

2 OPIS MODELA LJUBLJANSKEGA POLJA

Hidravlični model Ljubljanskega polja je bil izdelan leta 2000. Nastal je v sodelovanju Danskega hidravličnega inštituta (DHI Water and Environment, Denmark) in skupine slovenskih izvajalcev (Geološki zavod Slovenije, Hidroinženiring in Hydroconsulting). Naročnik projekta je bilo JP VO-KA, Ljubljana.

Model zajema površinsko zaledje reke Save med merilnima postajama Medno in Litija. Omejen je s površinsko razvodnico tega 35 kilometrskega odseka reke. Na celotnem območju sta bila uporabljena dva pristopa hidrološkega modeliranja. Na osrednjem območju je bil uporabljen integrirani hidrološki model MIKE SHE-MIKE 11, na preostalih območjih zaledja pa je bilo uporabljenih šest modelov »padavine-odtok« (NAM), ki določajo dotoke v vodonosnik na Ljubljanskem polju oziroma robne pogoje za osrednji model (Auersperger, P., *et al*, 2005).

2.1 Opis programskega orodja MIKE SHE in MIKE 11

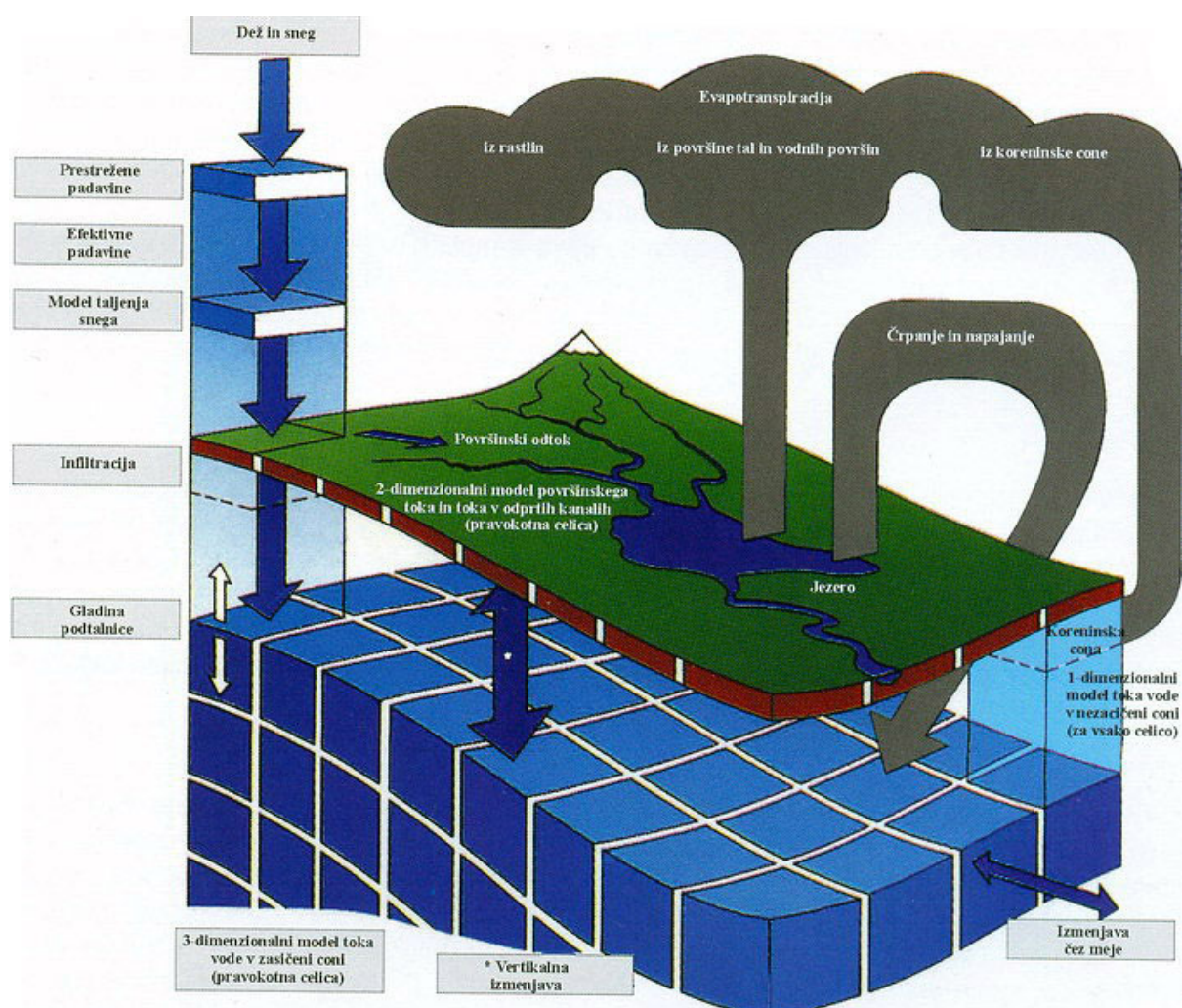
MIKE SHE so razvili na DHI Water and Environment, Denmark. Kot programsko orodje je uporaben za modeliranje procesov celotnega hidrološkega kroga na kopnem. Njegova uporaba služi analizam in gospodarjenju širokega obsega vodnih virov, kot so:

- povezana uporaba površinske in podzemne vode,
- urejanje rečne struge,
- gospodarjenje s podzemno vodo,
- za potrebe kmetijstva; namakanje, osuševanje.

MIKE SHE je distribuiran in integriran model. Pretočni modul rešuje enačbe, ki opisujejo fizikalne procese, povezane s pretokom vode v hidrološkem ciklusu; transportni modul pa enačbe advekcije in disperzije ter sledenje delcev. Enačbe, ki opisujejo hidrološke procese, rešuje model numerično z uporabo metode končnih razlik. Ker je model distribuiran,

omogoča vključevanje časovnih in prostorskih variacij fizikalnih parametrov. Reševanje enačb poteka v določenih časovnih korakih, kar omogoča simuliranje dinamičnih procesov.

Model je sestavljen iz več modulov, ki obravnavajo posamezne dele hidrološkega cikla. Moduli se lahko uporabljajo ločeno ali združeno, pri tem pa se upošteva izmenjava vode med posameznimi moduli. Prav zato je model primeren za reševanje različnih problemov z viri pitne vode. MIKE SHE je torej lahko uporabljen kot tridimenzionalni model podtalnice, ki ima zelo izpopolnjen opis napajanja in interakcijskih procesov med površinsko vodo in podtalnico (slika 1). Hkrati pa je lahko MIKE SHE distribuiran model površinskega odtoka z zelo izpopolnjenim opisom podpovršinskega in baznega toka. Jedro modela MIKE SHE predstavljajo napajalni procesi (Kristensen, M., *et al*, 2000a).



Slika 1: Shema modela izdelanega z MIKE SHE (DHI Water and Environment, 1999a)

Programsko orodje za modeliranje rečne hidravlike predstavlja model MIKE 11, kot sestavni del modela MIKE SHE. MIKE 11 je delovno in modularno inženirsko orodje za modeliranje položaja oziroma pogojev v rekah, jezerih, zaježitvah, namakalnih kanalih in ostalih vodnih sistemih. Uporablja se pri:

- napovedovanju in načrtovanju obsega poplav ter možnosti blaženja posledic,
- napovedovanju točnosti nastopa poplave,
- pri hidravličnih analizah,
- pri študijah namakanja in osuševanja,
- analizah preloma pregrad,
- integriranih analizah podzemne in površinske vode.

MIKE 11 na dinamičen način simulira tok, transport sedimentov in kvaliteto vode v rekah glede na obravnavane probleme. Upoštevajo se lahko različni preseki, strukture in sotočja. Rezultati - nivoji vode – pa se uporabijo za določanje izmenjave med površinsko vodo in podtalnico.

Pri reševanju različnih vprašanj v zvezi s kakovostjo pitne vode se uporabljajo tudi številni drugi moduli sistema MIKE SHE. Modul za sledenje delcev (Particle tracking), ki sledi gibanju navideznih delcev v tokovnem polju, se uporablja predvsem za določanje vplivnih območij črpališč. Modul DAISY določa porabo in infiltracijo dušika na osnovi kmetijske rabe, gojenih poljščin ter klimatskih in talnih pogojev. Vendar pa izračun vseh modulov ne more potekati vzporedno, zato je potrebno najprej zagnati modul MIKE SHE in MIKE 11, da dobimo tokovno sliko. To potem uporabimo kot vhodni podatek za zelene module.

Pri svojem delu sem uporabljal programsko verzijo MIKE SHE 2001 (DHI Water and Environment, 1999a-g), ki je delovala na operacijskem sistemu MS Windows (pred letom 1997 je orodje delovalo v okolju UNIX). Delo s programom poteka prek izbirnih menijev. Pri podatkih o prostoru in časovnih serijah se je potrebno sklicevati na zunanje datoteke, ki so zapisane v posebnih formatih (*.t2 , *.t0). To so tekstovne datoteke, ki imajo, odvisno od vrste, posebno strukturo, urejajo pa se v tekstovnem urejevalniku npr. *Beležnica*. Za urejanje datoteke s črpalnimi količinami so na JP Vodovod-Kanalizaciji razvili samostojen program (MIKE PAD), ki zelo olajša spreminjanje količin črpanja. Črpalne količine se vnaša po

dnevih za vsak vodnjak v enotah $1000 \text{ m}^3/\text{leto}$. Programsko orodje ima še veliko dodatkov, ki omogočajo matematične operacije med datotekami (v obliki matrik), grafični prikaz prostorskih podatkov, ogled rezultatov in možnost izvoza podatkov. Ker je bil ogled rezultatov s programskimi dodatki zelo zamuden, sem rezultate večinoma izvažal. Nato sem jih z uporabo razširitev uvozil v program Arc View, kjer sem jih nadalje obdelal.

Spoznavanje programskega orodja je bilo zelo težavno, predvsem zaradi zelo slabih uporabniških priročnikov. Največkrat je bila težava v strukturi datotek, ki so bile v različnih priročnikih razložene drugače, nekajkrat pa se je izkazalo, da potrebnega zapisa strukture datoteke ni bilo v nobenem od priročnikov. Če je bila struktura datoteke napačna, je program, ko je začel z izračunom, ni mogel prebrati in zato se je ustavil. Včasih je javil vrsto napake, drugič spet ne. Programsko orodje je bilo najbrž v tej različici še v prehodni fazi na novo okolje. Kljub naštetim pomanjkljivostim je MIKE-SHE zelo močno orodje z veliko možnostmi podrobnih nastavitvev, za razumevanje katerih pa bi bil v prvi vrsti potreben boljši uporabniški priročnik.

2.2 Vhodni podatki hidravličnega modela

Vodonosnik Ljubljanskega polja napajata reka Sava in padavine. Glede na obstoječe podatke je gladina podzemne vode odvisna predvsem od vodostaja Save, manj pa od padavin. Nihanje gladine podzemne vode je največje na Brodu (6 m) in se manjša proti vzhodu, 2 do 3 m. Drugi največji površinski tok na Ljubljanskem polju je reka Ljubljanica, katere tok je počasen; njena zablatena struga pa omejuje izmenjavo vode med reko in vodonosnikom.

V zgornjem delu toka po Ljubljanskem polju reka Sava napaja vodonosnik, v spodnjem delu pa podzemna voda odteka v strugo Save. Iz tega izhaja, da je gladina podzemne vode na zahodnem delu Ljubljanskega polja nagnjena proti jugu oziroma jugovzhodu, v osrednjem delu pa proti vzhodu. V splošnem teče podzemna voda v smeri, ki je vzporedna s Savo. Strmec podzemne vode je v povprečju največji na severozahodnem delu polja med Brodom in najsevernejšim delom vodarne Kleče, in sicer približno 0,15%. Med kamniško železniško

progo in vodarno Hrastje proti vzhodu je nekoliko manjši in znaša do 0,09% (Auersperger, P., et al, 2005).

2.2.1 Zgradba modela

Pri izdelavi modela so bili upoštevani vsi razpoložljivi podatki o hidrologiji, hidrogeologiji in geologiji obravnavanega območja (popisi vrtnin, podatki o tleh, meritve gladine podzemne vode, raba tal, rečni preseki, meteorološki podatki, dnevne količine črpanja, rečni pretoki, rezultati kemičnih analiz, rezultati črpalnih poskusov). Nekateri procesi, do katerih je prišlo zaradi spremenjenih pogojev v tem obdobju, v modelu niso upoštevani (npr. transport sedimentov v rekah, zaradi česar pride do sprememb v morfologiji in presekih rek).

Model Ljubljanskega polja je sestavljen iz treh računskih plasti, ki ustrezajo geološkim plastem. V horizontalni smeri pa je razdeljen na celice, velikosti 200x200 m. Za nekatere scenarije, ki jih je bilo potrebno analizirati, so bili razviti še lokalni modeli z mrežo 25x25 m in 50x50 m ter s šestimi plastmi. Lokalni modeli imajo robne pogoje določene kot časovno odvisni nivo podzemne vode. Ta pa je določen iz izračunanega nivoja podzemne vode v regionalnem modelu. S tem je zagotovljen vpliv rek, tudi če reke niso del lokalnega modela.

Časovni niz podatkov v modelu obsega obdobje od leta 1984 do leta 1997 in je pri izdelavi modela razdeljen na del za kalibracijo in del za validacijo modela. S kalibracijo oziroma umerjanjem modela je bilo s prilagoditvijo parametrov doseženo optimalno ujemanje rezultatov modela in dejanskega stanja. Z validacijo oziroma vrednotenjem modela pa je bila dokazana primerljiva zanesljivost modela tudi na podatkih, ki niso bili vključeni pri kalibraciji. Pri teh dveh postopkih so bili uporabljeni predvsem rezultati meritev gladine podzemne vode in ocenjene bilančne komponente na obravnavanem območju (Auersperger, P., et al, 2005).

2.2.2 Meteorološki podatki

Obseg zbranih podatkov zajema podatke o količini padavin na 9 merilnih postajah znotraj obravnavanega območja, pri tem pa so upoštevani tudi popravki zaradi učinka vetra in

omočenosti. Manjkajoči podatki v časovnih serijah so bili nadomeščeni s podatki iz bližnjih postaj, ob upoštevanju razlik v letnih padavinah. Padavine so bile razporejene po obravnavanem območju v glavnem na osnovi metode Thiessenovih poligonov, vendar ob upoštevanju višinskih efektov. Vsak mesec je bil z ene postaje v evapotranspiracijski modul sistema vnesen podatek o potencialni izhlapevanju. Temperaturni podatki so bili zbrani s treh postaj in popravljeni glede višinskega efekta ob upoštevanju temperaturnega gradienta, ki skozi leto očitno niha (Kristensen, M., *et al*, 2000a).

2.2.3 Hidrološki podatki

Kot osnova za kalibriranje modelov NAM in modela MIKE SHE/MIKE 11 so služile meritve pretokov in nivojev vode v 11 postajah v rečnem omrežju. Nekateri od teh podatkov so bili uporabljeni direktno kot robni pogoji za model glavnega območja. Podatki o strukturah in presekih rečnih strug so bili težko dostopni, delno zaradi dinamičnega merjenja oblike in lokacij. Ne glede na to model vsebuje glavne in najpomembnejše strukture, ki so večinoma zgrajene iz naravnih kamnov in betonskih blokov. Na nekaterih manjših delih rek so bili preseki določeni na osnovi terenskega ogleda. Položaj rek je bil določen s pomočjo digitaliziranih kart, vključeni pa so bili tudi podatki nivojev brežin.

Model MIKE SHE zahteva digitalni model reliefa za opis površinskega gravitacijskega toka. Topografski parametri so bili izpeljani na podlagi digitalnega mrežnega modela z ločljivostjo 100 metrov.

Evapotranspiracija je v veliki meri odvisna od porazdelitve rabe tal in vrste poljščin. Na osnovi tematskih kart lahko obravnavano območje razdeljeno na 6 območij z različnimi pogoji. Agrarne površine so bile nadaljnje razdeljene na 8 različnih poljščin, ki so bile naključno porazdeljene v prostoru glede na njihovo statistično razdelitev. Gozdne površine so bile razdeljene v dve podskupini – iglavce in listavce; urbane površine pa na tlakovane površine in parke. Za izračun vrednosti dejanske evapotraspiracije za posamezno kulturo so bili potrebni podatki o indeksu površine listov in globin korenin. Za izračun teh podatkov je bil uporabljen modul DAISY (Kristensen, M., *et al*, 2000a).

2.2.4 Geološki in hidrogeološki podatki

Podatki o tipih tal za opis zgornjih plasti so bili težko dostopni. Na podlagi različnih podatkov je bila opravljena groba porazdelitev; lastnosti tal pa so bile določene z indirektno metodo na osnovi povezave med granulometrično sestavo in lastnostmi tal. Peščena plast pod površjem je na območju vodonosnika Ljubljanskega polja prekrita z vrhno plastjo, ki zadržuje vodo. Za kmetijske površine pa so bile, zaradi pomanjkanja podatkov, uporabljene splošne podatkovne baze DHI.

Pogoji v globljih geoloških usedlinah so določeni s pomočjo različnih podatkov. Najprej so bili zbrani podatki približno 400 interpretiranih vrtnin in oblikovana podatkovna baza, ki predstavlja osnovo za geološki model. Tipični prerezi so služili kot osnova za interpretacijo geološkega modela, ki opisuje površje in obseg geoloških plasti in leč na obravnavanem območju. Spodnja meja modela je bila določena s pomočjo digitaliziranih kart kot kamninskih podlag. Na Ljubljanskem polju se v geološke plasti vključuje dominantna leča konglomerata, ki je po podatkih iz vrtnin prisotna v večini jugozahodnega dela pod terasnim območjem. Vendar pa je specifična zelo velikega horizontalnega pretoka in slabša vertikalna prepustnost omejena na vzhodni del vodonosnika. Ocene prepustnosti za nekatere vodonosnike so bile dobljene na osnovi črpalnih poizkusov, interpolacija teh vrednosti pa je bila uporabljena skupaj s kvalificiranimi domnevami o drugih parametrih kot vhodna vrednost za model podtalnice. Hkrati pa je bila, kot vhodni pogoj za model podtalnice, uporabljena tudi interpretacija kart nivojev podtalnice v različnih vodonosnikih (Kristensen, M., *et al*, 2000a).

Pri kalibriranju dinamičnega modela podtalnice je bilo uporabljenih več kot 70 časovnih serij nivoja podzemne vode. Te predstavljajo večino vodonosnikov na obravnavanem območju. Poudarek je bil na pridobivanju pravilnega nivoja in dinamičnih odzivov. Pri kalibriranju modela podtalnice so bile indirektno uporabljene tudi posamezne meritve pretokov izvirov znotraj območja. Zaradi izkoriščanja vodonosnikov za pridobivanje pitne vode je potrebno ugotoviti količine črpanja. Za del obdobja kalibriranja so bili na voljo podatki o dnevni količinah črpanja za posamezne vrtnine, preostali podatki pa so bili pridobljeni iz mesečnih vrednosti za vsako črpališče. V podatkovno bazo so bili vključeni tudi podatki o črpanju za 27

industrijskih vrtin. Pri tem pa nista bila upoštevana odvzem iz vrtin za toplotne črpalke in črpalna količina za namakanje.

V veliki meri je prisotno tudi umetno odvodnjavanje agrarnih površin. Odvodni jaški in odprti odtočni kanali znižujejo nivo podtalnice in tako omogočajo obdelovanje polj. Ker je nemogoče dobiti podatke o vsakem posameznem kanalu in odvodni cevi, vključuje model skupen opis celotnega odvodnjavanja. Na območjih, kjer je nivo podtalnice blizu nivoja kanalizacijskega omrežja, služi kanalizacija za odvajanje vode. Tudi to dejstvo je bilo upoštevano v modelu, kjer sta bila lokacija in globina kanalizacijskih cevi uporabljena kot direktni vnos v modul odvajanja vode pri modelu MIKE SHE. Kot posledica puščajočih cevi, se približno 50% odvzete vode v vodovodnem omrežju izgubi. Zato so v modelu definirani odseki vodovodnega omrežja z znano količino odtokanja vode. Na teh odsekih prihaja do infiltracije vode v podtalnico (Kristensen, M., *et al*, 2000a).

2.2.5 Vpliv prepustnosti struge reke Save na dinamiko podzemne vode

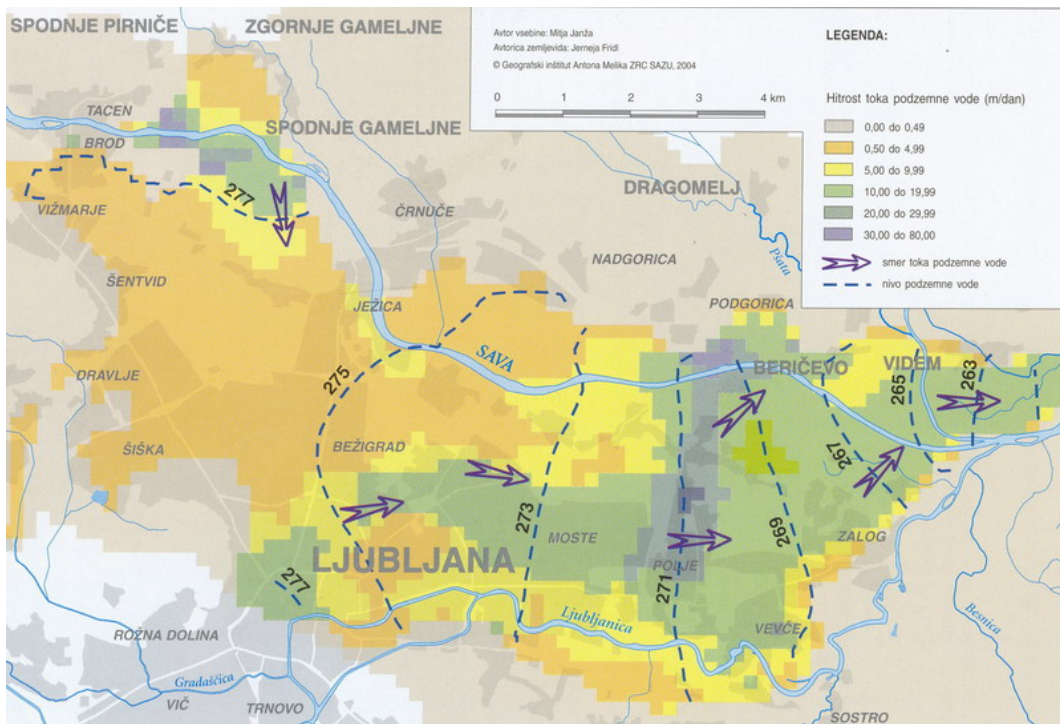
Tesna povezanost med gladino reke Save in vodonosnikom se je pokazala tudi pri modeliranju. Pri kalibraciji je bilo ugotovljeno, da je model zelo občutljiv na spremembo vrednosti koeficienta prepustnosti rečne struge, ki neposredno vpliva na izmenjavo vode med reko in vodonosnikom. Zmanjšanje vrednosti tega koeficienta za 10% povzroči največje spremembe modelirane gladine podzemne vode na severozahodnem – zgornjem delu vodonosnika. Gladina podzemne vode se na tem delu zniža za več kot 2,5 m. V osrednjem delu je znižanje manjše, okrog 0,5 m. Nasproten pa je učinek na spodnjem delu vodonosnika, kjer vodonosnik napaja reko Savo. Tam enako zmanjšanje koeficienta prepustnosti rečne struge povzroči dvig gladine podzemne vode, in sicer za do 0,25 m. Opisane spremembe so posledica zmanjšane izmenjave vode med reko in vodonosnikom. Največja sprememba je v zgornjem delu toka reke Save, kjer je na odseku šestih kilometrov napajanje vodonosnika iz reke zmanjšano za 25%, kar znaša za modelirano obdobje povprečno zmanjšanje z 1,49 m³/s na 1,09 m³/s (Kristensen, M., *et al*, 2000a).

Prepustnost rečnega korita reke Save je močno odvisna od zablatenja struge, ki se s časom spreminja, v modelu pa je konstantna.

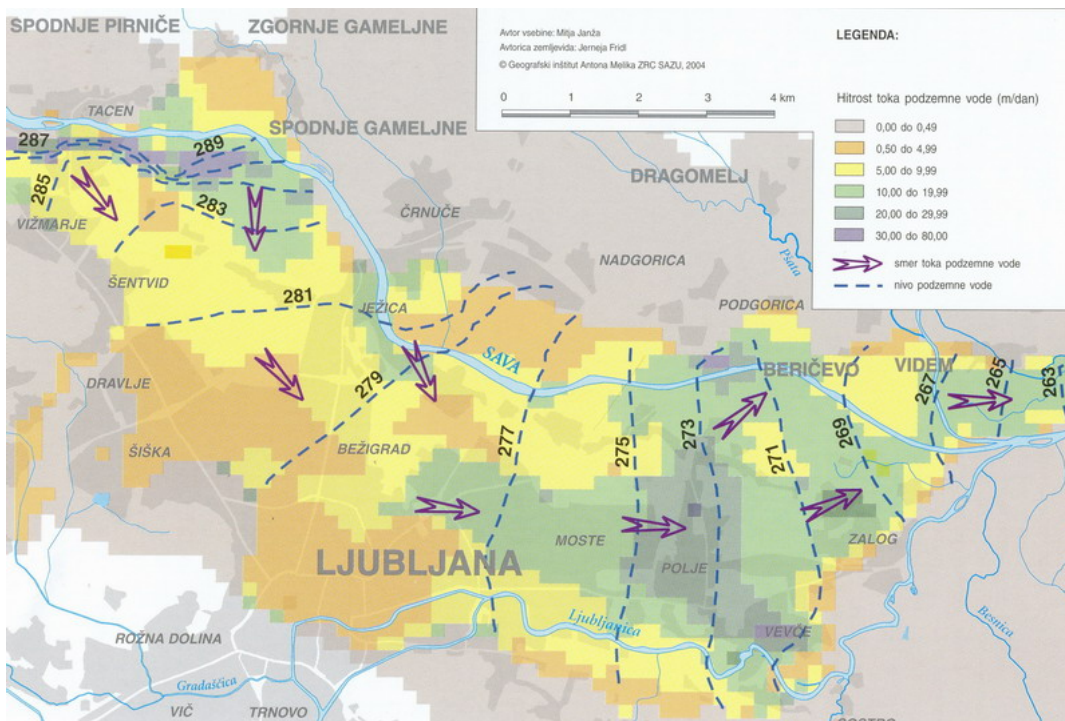
2.2.6 Hitrost pretakanja podzemne vode

Na hitrost pretakanja podzemne vode vplivajo: hidravlični gradient podzemne vode, koeficient prepustnosti in koeficient efektivne poroznosti vodonosnih plasti.

V modelu je bila porazdelitev vrednosti koeficienta prepustnosti ob upoštevanju rezultatov črpalnih poskusov določena v fazi kalibracije. Vrednosti koeficienta prepustnosti v vodoravni smeri se v tretji računski plasti gibljejo med 0,001 m/s in 0,045 m/s, v večjem delu območja pa med 0,008 m/s in 0,03 m/s. Višje vrednosti so v jugovzhodnem delu Ljubljanskega polja. Rezultati matematičnega modeliranja potrjujejo, da je vodonosnik Ljubljanskega polja zelo dobro prepusten in omogoča velike količine črpanja ter izvedbo visoko izdatnih vodnjakov. Po drugi strani pa take razmere vplivajo tudi na zelo velike hitrosti prenosa onesnaženja (Auersperger, P., et al, 2005). Efektivno poroznost je bilo zaradi pomanjkanja meritev težko določiti. Po različnih ocenah je najverjetnejša povprečna efektivna poroznost prodno-peščenega zasipa približno 15%, ta vrednost je bila tudi uporabljena v modelu. Tako izračunane hitrosti se lahko gibljejo do več 10 metrov na dan. Na slikah 2 in 3 so prikazane gladine in modelirane hitrosti pretakanja podzemne vode v tretji računski plasti modela v času nizkih in visokih voda (Auersperger, P., et al, 2005).



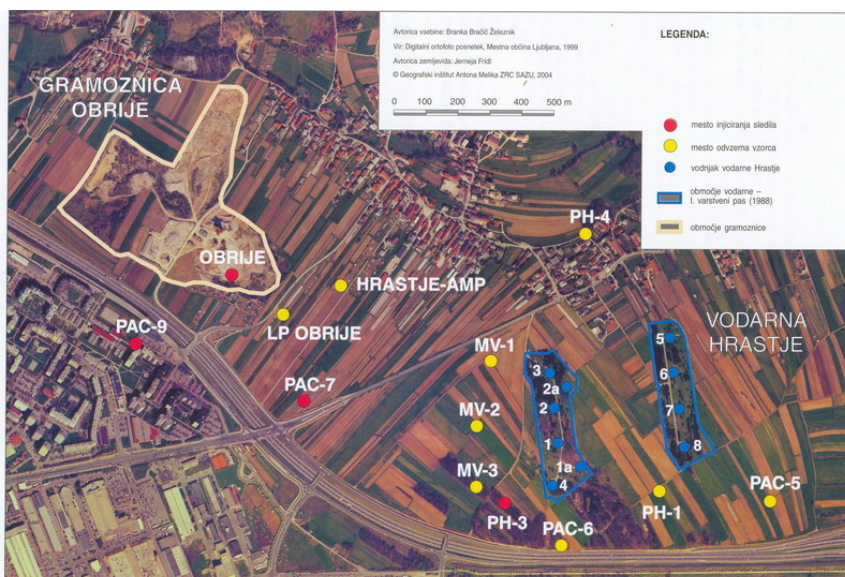
Slika 2: Modelirana gladina in hitrosti pretakanja podzemne vode 27.8.1993-nizke vode (Auersperger, P., et al, 2005).



Slika 3: Modelirana gladina in hitrosti pretakanja podzemne vode 5.11.1992-visoke vode (Auersperger, P., et al, 2005).

3 OPIS VODARNE HRASTJE

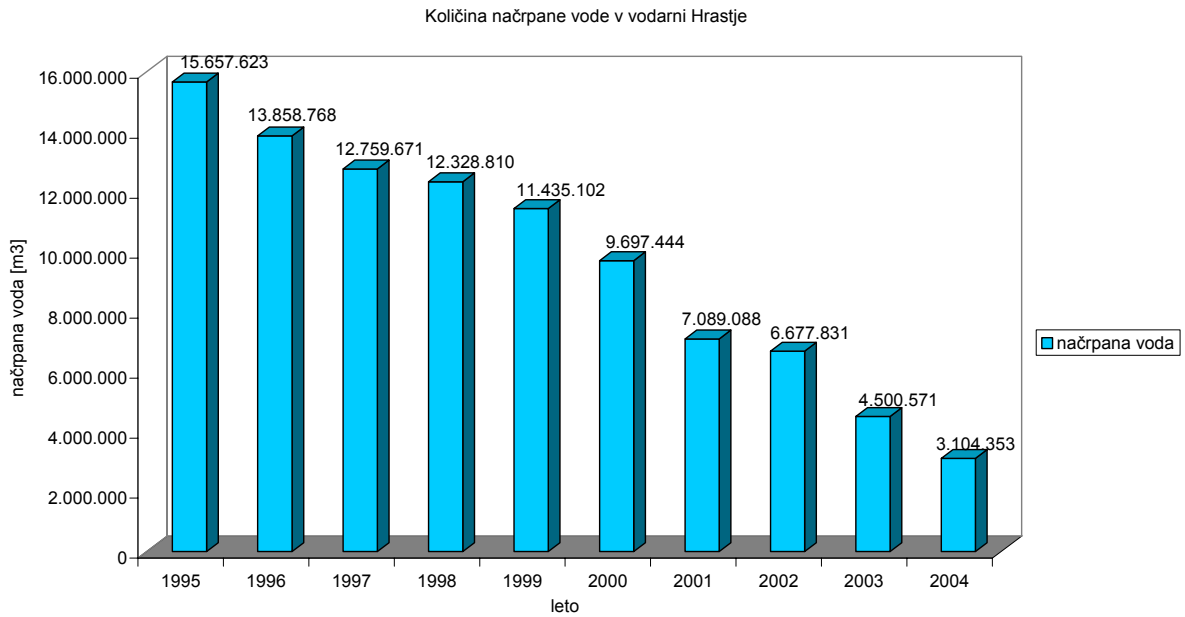
Vodarna Hrastje je ena izmed štirih vodarn, ki črpajo podtalnico Ljubljanskega polja. Vodarna se nahaja na desnem bregu Save v vzhodnem delu mesta. Na južni strani jo obdaja ljubljanska obvoznica, na zahodni pa zelo prometna Šmartinska cesta, okrog vodarne pa so tudi kmetijske površine (Slika 4).



Slika 4: Vodarna Hrastje z bližnjo okolico (Auersperger, P., et al, 2005)

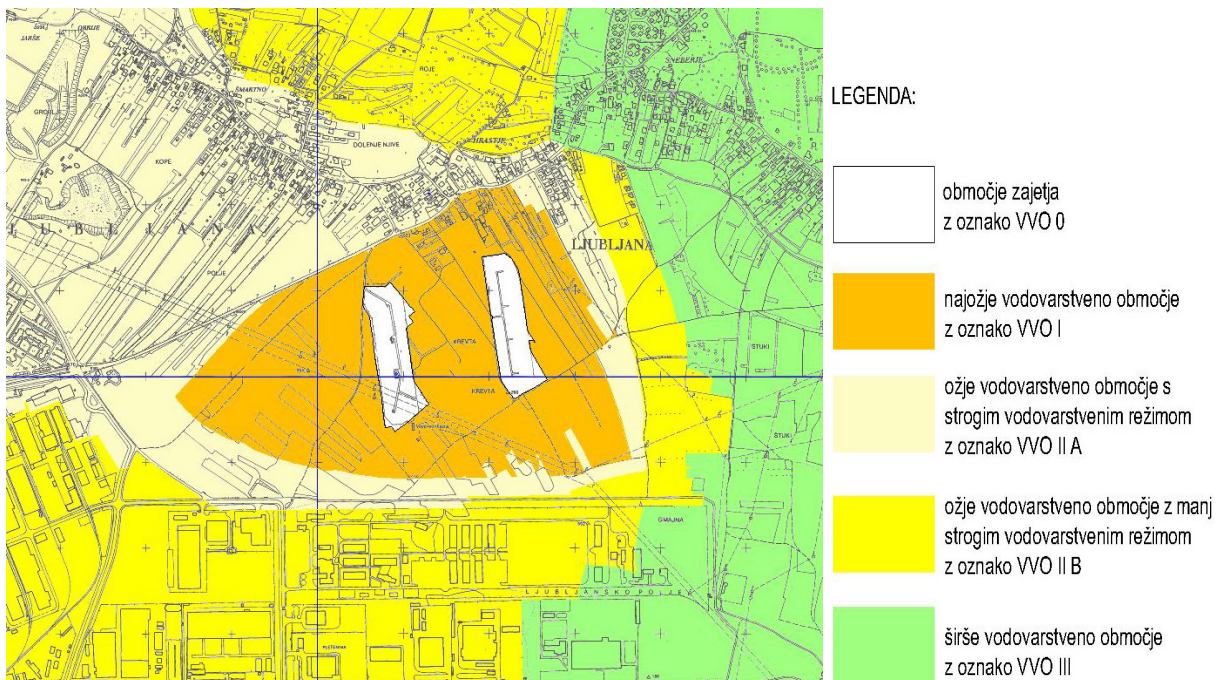
Po zmogljivosti je vodarna Hrastje z 10 vodnjaki in skupno zmogljivostjo 665 l/s drugo največje črpališče na območju Ljubljanskega polja. Od nje je odvisna varna oskrba osrednjega dela mesta in vse do primestnih naselij na vzhodu. Koncept vodovodnega sistema v Ljubljani je zasnovan tako, da omogoča kratkoročno oskrbo brez vodarne Hrastje, vendar varna in zanesljiva dolgoročna oskrba brez prispevkov vodarne Hrastje in ob nespremenjenem režimu drugih vodarn ni mogoča (Jamnik, 2000b).

Vodarna že dolgo ne izkorišča vseh svojih zmogljivosti. Leta 1995 je bilo načrpanih več kot 15 milijonov kubičnih metrov vode, lansko leto pa le še petina tega (slika 5). Res, da je tudi poraba vode upadla, vendar je glavni razlog slaba kvaliteta vode iz nekaterih vodnjakov, ki ne zadošča kriterijem za pitno vodo. Za normalno oskrbo z vodo bi na območju vodarne Hrastje, po oceni JP VO-KA, potrebovali cca 500 l/s.



Slika 5: Količine načrpane vode v vodarni Hrastje od 1995 do 2004.

Zaradi svoje lokacije, tako rekoč sredi mesta, je vpliv dejavnosti na prispevnem območju vodarne zelo velik. Vodarna je sicer zaščiten z vodovarstvenimi območji (Ur. I. RS 120/04 in slika 6), vendar ti niso dovolj učinkoviti. Občasno prihaja tudi do večjih onesaženj.



Slika 6: Vodovarstvena območja na območju vodarne Hrastje.

3.1 Vpliv dejavnosti

- Iz zahodne smeri priteka podtalnica, ki infiltrira na območju vasi Tomačevo, Jarše in Obrije, ki kljub drugemu vodovarstvenemu pasu še nimajo tesnega kanalizacijskega omrežja, kar se kaže kot naraščajoča vsebnost koncentracije nitratov (Jamnik, 2000b).
- Vzrok za naraščanje koncentracije nitrata so lahko prepustne gnojne jame v naseljih gorvodno od vodarne v smeri reke Save, netesna kanalizacija, ali pa pretirana uporaba organskih in umetnih gnojil na kmetijskih površinah v okolici črpališč (Jamnik, 2000b).
- Na severo-zahodni strani vodarno obdaja Šmartinska cesta, ki še nima urejene meteorne kanalizacije, kar predstavlja stalno in neposredno nevarnost ob morebitnem razlitju nevarnih snovi. (Jamnik, 2000b)
- Tudi severna obvoznica mesta je v vodovarstveni prostor vnesla dodatno nevarnost, saj črpališče kljub strogim varnostnim ukrepom ni zavarovano pred morebitnimi izrednimi dogodki s posledicami na okolje (Jamnik, 2000b) in (Rismal, M., 2002b).
- Uporaba rastlinskih zaščitnih sredstev na drugem varstvenem pasu je sicer prepovedana, vendar kljub monitoringu zemljin še vedno ni popolnega nadzora. Uporaba atrazina v preteklosti ni bila omejena le na kmetijsko obdelovalne površine, ampak vir onesnaženja predstavlja tudi njegova uporaba ob železnici (Jamnik, 2000b).
- Obstaja tudi nevarnost dotoka onesnažene vode zaradi netesnih cistern kurilnega olja, ki so v lasti gospodinjstev ali netesnosti cistern bencinskih servisov ob uporabi ali rekonstrukciji (Jamnik, 2000b).

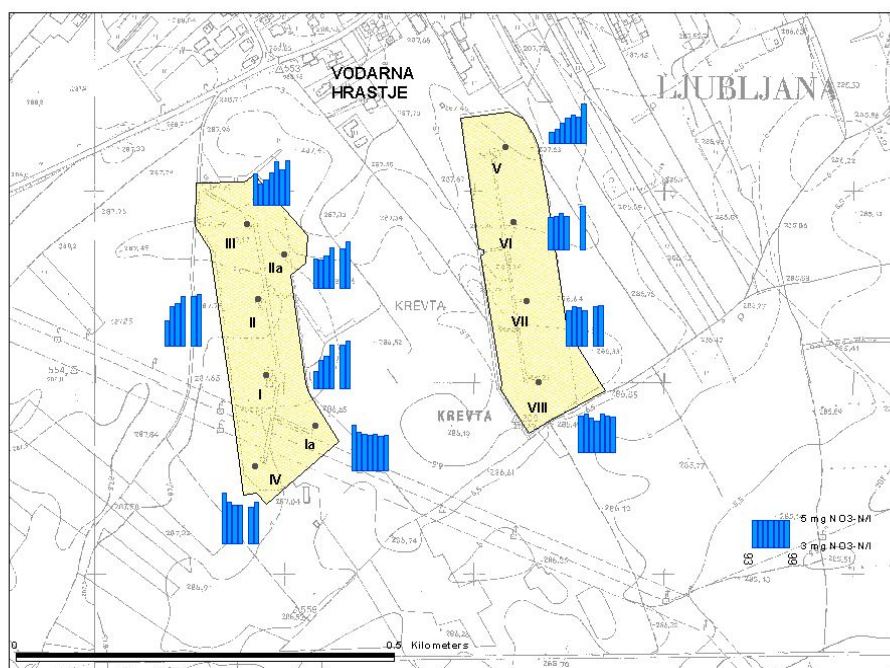
3.2 Pregled kakovosti podtalnice

Zaradi različnih območij napajanja zajemajo vodnjaki vodarne Hrastje podtalnico različne kakovosti. Vodnjaki v severnem delu vodarne (vodnjaka III in V) zajemajo večji delež vode

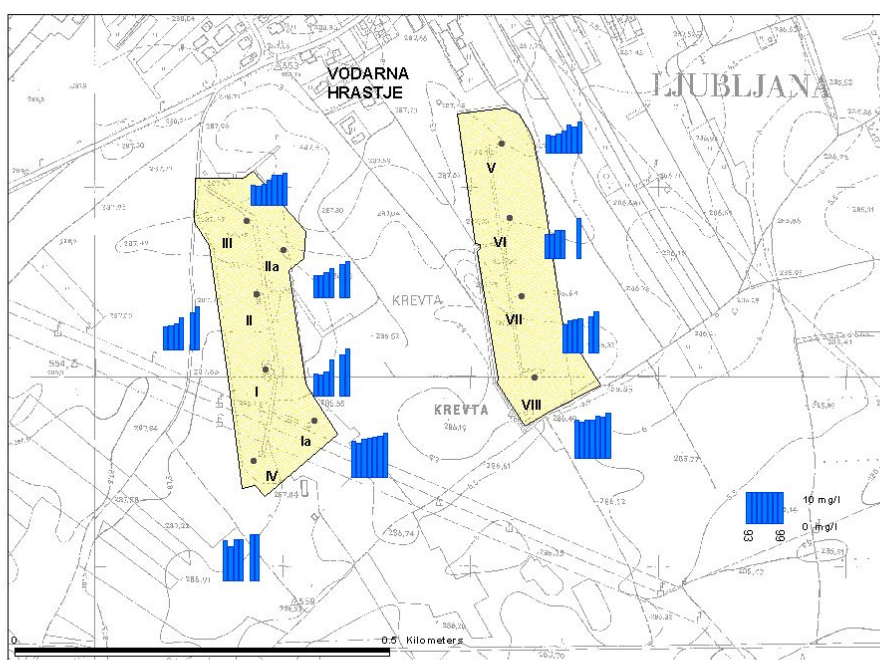
reke Save iz napajalnega območja na Tomačevem ter manjši delež padavinske vode in posledično tudi manjšo koncentracijo onesnaženj. Kljub temu, tu najhitreje naraščajo koncentracije nitratov (slika 7) in tudi presežene koncentracije atrazina oz. razgradnega produkta desetilatrazina (slike 10-12).

Na južnem in osrednjem delu vodarne Hrastje I najdemo presežene koncentracije atrazina oz. razgradnih produktov (slike 9-12), pa tudi naraščajoče koncentracije nitratov. Iz smeri južnih vodnjakih vodarne (IV, Ia) proti severu se razširja oblak Cr+6 – v letu 1999 od okrog 14 µg/l v vodnjaku IV na jugu do občasnih koncentracij nad mejo detekcije metode v vodnjaku V. MDK za skupni krom je 50 µg/l, kar pomeni, da so koncentracije še daleč pod dovoljenimi, vendar je pomembno predvsem, da je opazen trend naraščanja. Podatki monitoringov kažejo, da obremenitve z lahkohlapnimi ogljikovodiki niso zanemarljive, čeprav koncentracije v splošnem še ne dosegajo vrednosti MDK, razen občasnih prekomernih obremenitev (Urbanc, J., et al, 2004). Naraščanje koncentracije Cr+6 in nekaterih osnovnih parametrov (klorid (slika 8) nakazujejo, da podtalnico vodarne Hrastje vendarle najbolj ogrožajo dejavnosti, ki imajo vpliv na južnem prispevnem območju vodarne.

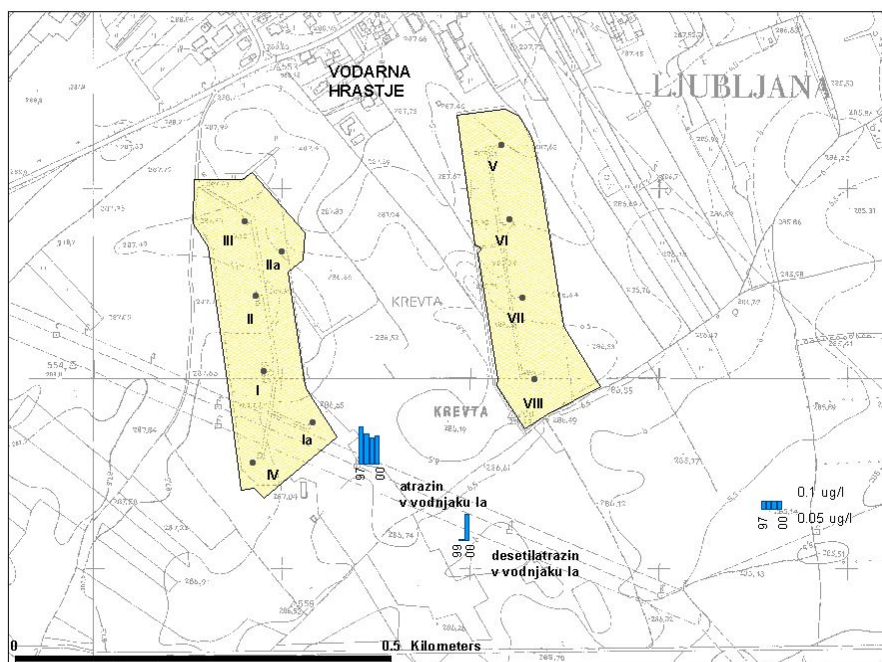
Slike od 10 do 12 prikazujejo časovne nize spreminjanja koncentracij pesticidov atrazina in desetilatrazina. Slika 10 prikazuje daljši časovni niz spreminjanja koncentracije atrazina in desetilatrazina, iz katerega je razvidno, da so koncentracije glede na MDK vrednost 0.1 µg/l presežene več kot dvakratno in da bistvenih trendov upadanja koncentracij ni. V vodnjakih II in III so koncentracije nižje, a kljub temu presežene. V omenjenih vodnjakih so koncentracije razgradnega produkta desetilatrazina višje od atrazina, kar nakazuje, da gre za onesnaženja, ki so v vodonosniku prisotna že daljši čas (Jamnik, 2000b).



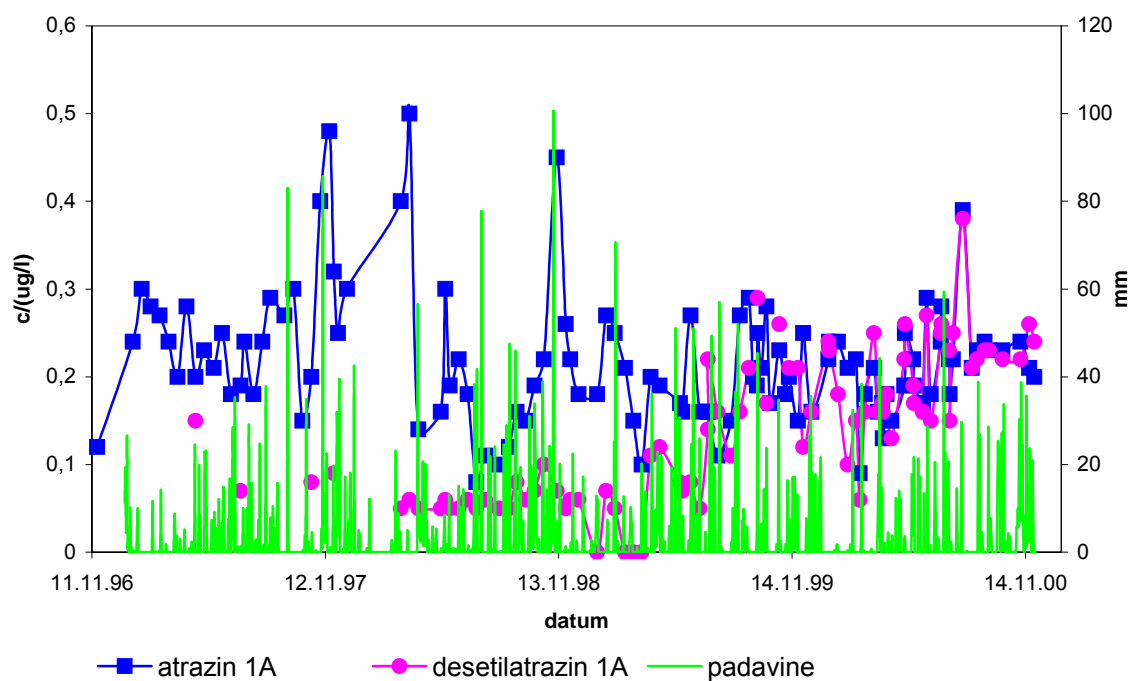
Slika 7: Prikaz spreminjanja koncentracij nitratov v podtalnici vodarne Hrastje v letih 93-99 (Jamnik, 2000b)



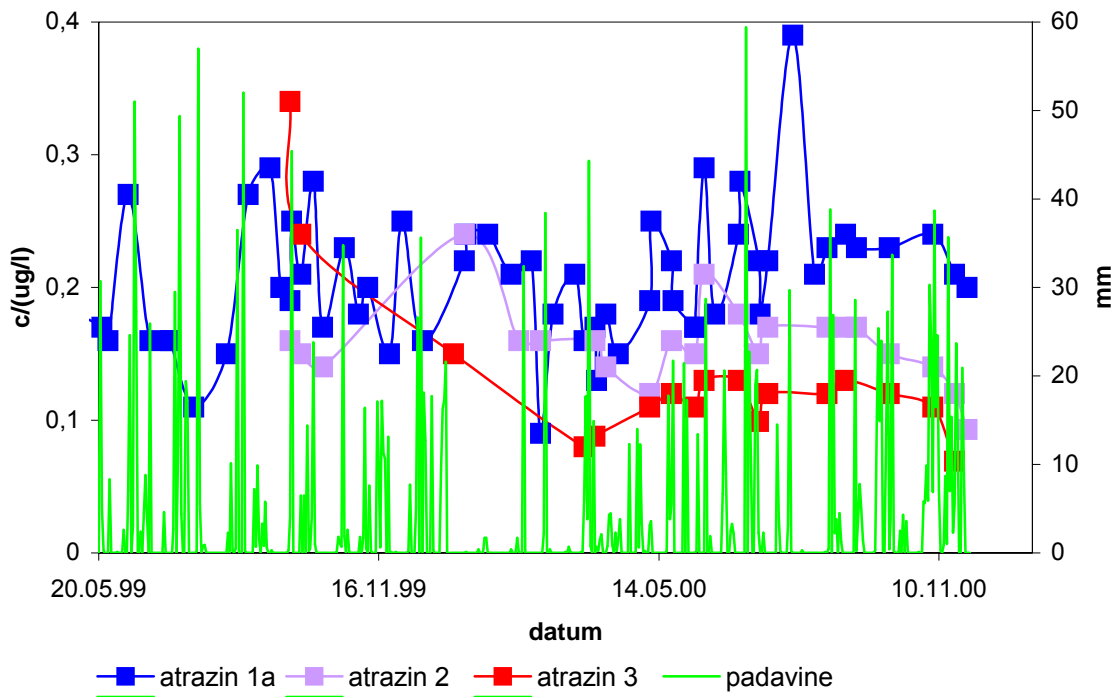
Slika 8: Prikaz spreminjanja koncentracij kloridov v podtalnici vodarne Hrastje v letih 93-99 (Jamnik, 2000b).



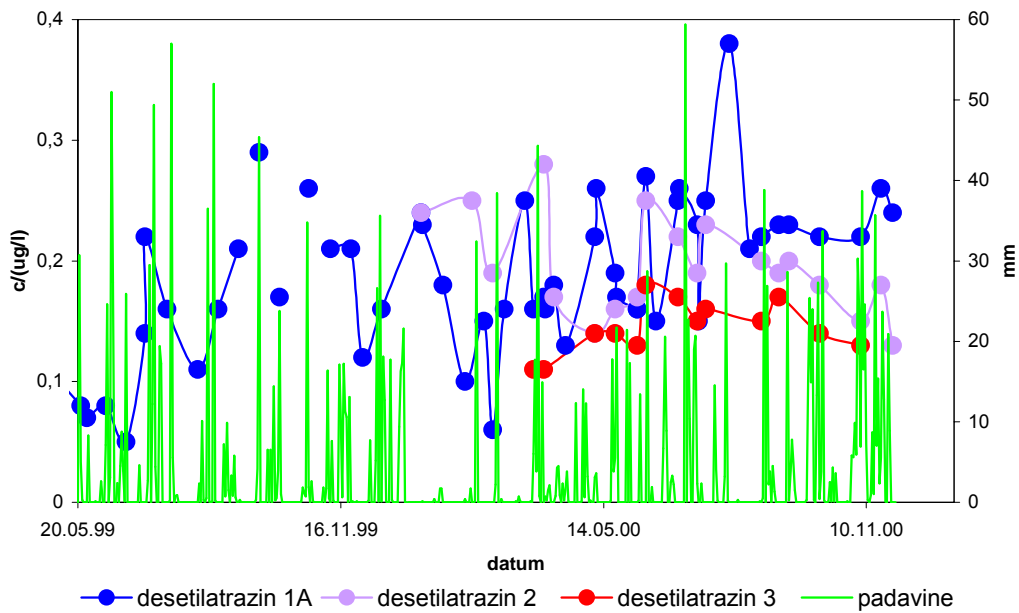
Slika 9: Prikaz spreminjanja koncentracij atrazina in desetilatrazina v podtalnici vodnjaka Ia vodarne Hrastje v letih 97-2000 (Jamnik, 2000b)



Slika 10: Spreminjanje koncentracije atrazina in desetilatrazina v vodnjaku Hrastje Ia v letih 1997-2000 in časovni niz količine padavin (Jamnik, 2000b).



Slika 11: Spreminjanje koncentracije atrazina v vodnjakih Ia, III in II vodarne Hrastje v letu 2000 in časovni niz količine padavin (Jamnik, 2000b).

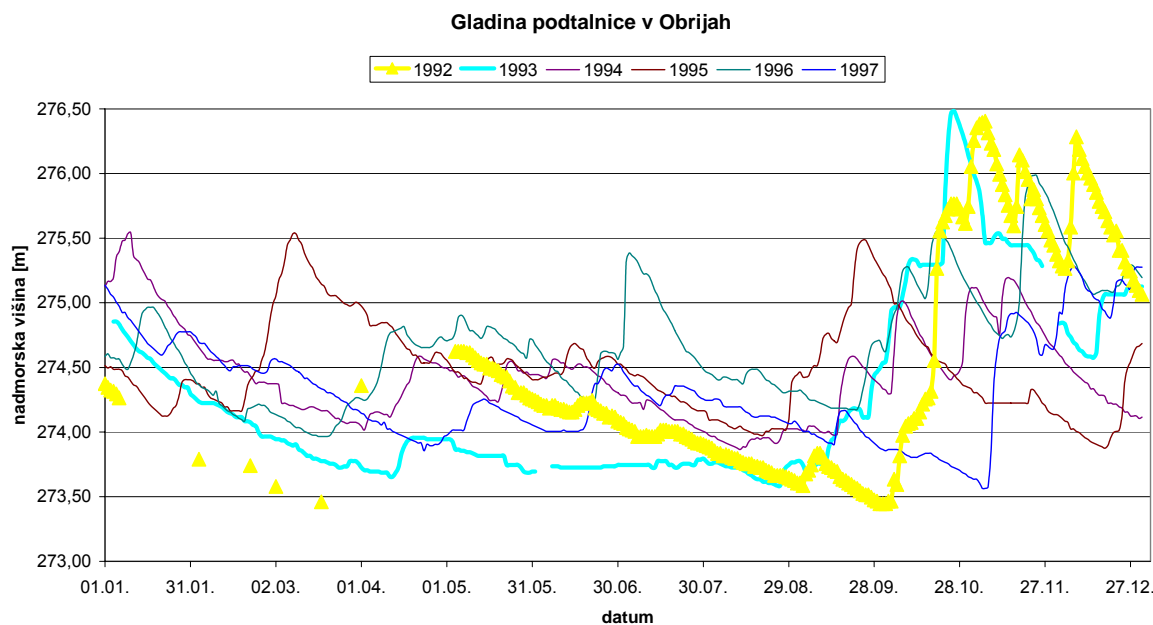


Slika 12: Spreminjanje koncentracije desetilatrazina v vodnjakih Ia, III in II vodarne Hrastje v letu 1999 in 2000 in časovni niz količine padavin (Jamnik, 2000b).

3.3 Občutljivost vodarne Hrastje na morebitno onesnaženje

Občutljivost sem preveril s programskim orodjem MIKE SHE, z modulom za sledenje delcev (Particle tracking). Uporabil sem obstoječi lokalni model vodarne Hrastje s prostorsko ločljivostjo 25 x 25 metrov in 6-imi plastmi v vertikalni smeri. Površina celotnega območja lokalnega modela je 6 km² (120 x 80 celic). Na območju okrog vodarne (slika 21) sem v vseh 6 plasti in v vsako celico vstavil 10 delcev. Glede na želeno kapaciteto črpanja (cca 500 l/s) sem določil, da bo črpalo 9 obstoječih vodnjakov po 60 l/s (dejansko se črpalne zmogljivosti črpalk v vodnjakih gibljejo od 60 l/s do 85 l/s). Vodnjak *Hrastje V* ni obratoval. Torej je bila skupna količina črpanja 540 l/s, vsi vodnjaki pa so črpali iz 3 računske plasti, ki se nahaja cca 30 metrov pod površjem.

Določiti sem moral še čas simulacije. Na podlagi meritev gladin podtalnice v piezometru Obrije (slika 4), ki se nahaja cca 1 kilometer zahodno od vodarne, sem določil obdobje visokih in nizkih vod (slika 13). Ti dve obdobji predstavljata kritične trenutke simulacije.



Slika 13: Gladina podtalnice v piezometru Obrije od 1992 do 1997 (JP VO-KA).

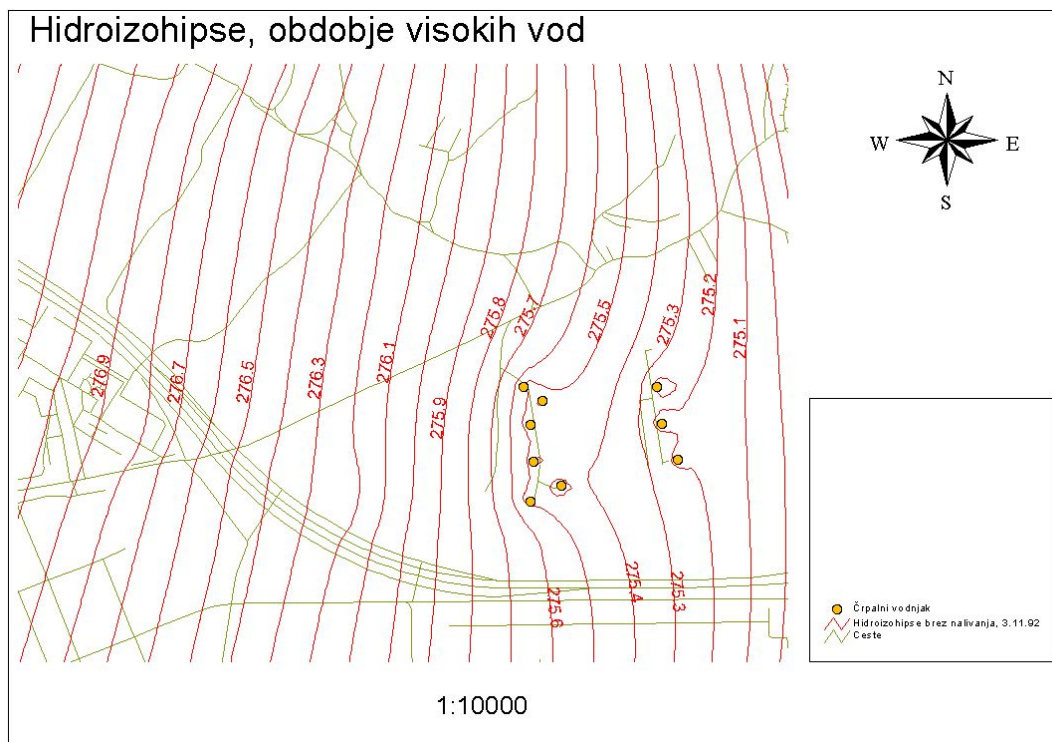
Za začetek obdobja nizkih vod sem izbral 10.2.1992, kritični dan (z najnižjo gladino) pa 25.8.1993. Za začetek obdobja visokih voda pa sem izbral 20.10.1993, kritični dan (z najvišjo gladino) pa 3.11.1992. Simulacija je obakrat trajala cca 7 mesecev, časovni korak shranjevanja rezultatov je bil 120 ur oziroma 5 dni.

Najprej sem pognal simulacijo toka za obe obdobji in dobil tokovno sliko. To sem uporabil kot vhodno datoteko v modulu za sledenje delcev. Nato sem v model vstavil delce in zagnal izračun sledenja delcev. Rezultate sledenja delcev sem dobil v dveh oblikah: število delcev, ki so prišli v posamezen vodnjak z njihovo začetno lokacijo ter širjenje oblaka onesnaženja.

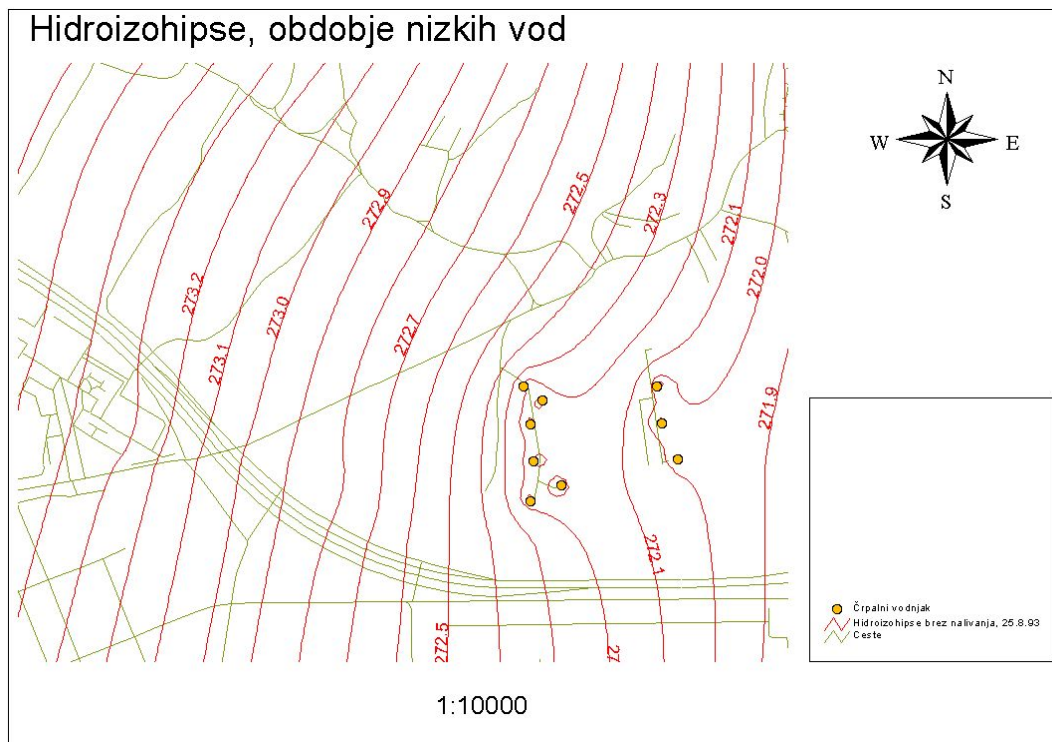
3.3.1 Rezultati simulacije

Med obdobji visokih in nizkih voda se razlika gladin podtalnice giblje med 3 in 3,5 metra (sliki 14 in 15). To se sklada z izmerjenimi gladinami v Obrijah (slika 13). Tok podtalnice poteka v obdobju visokih voda od Z proti V (slika 14), v obdobju nizkih voda pa se na severni strani vodarne obrne proti JV (slika 15). Na južni strani vodarne se smer toka ne spremeni.

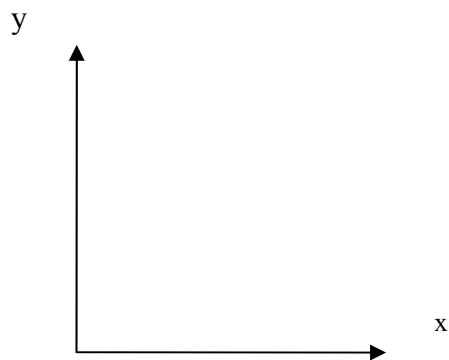
Ker je smer toka vzporedna z osjo x (slika 16), je sprememba smeri razvidna tudi iz grafikonov hitrosti v x smeri (sliki 17 in 18). V času visokih in nizkih voda je v južnem delu vidno polje večjih hitrosti (sliki 17 in 18). V severnem delu je tok v času visokih voda sicer počasnejši vendar na celem območju dosega enake hitrosti, zato se njegova smer ne spremeni (slika 17). V času nizkih voda pa je lepo vidno območje nižjih hitrosti, ki povzroči odklon smeri toka (slika 18).



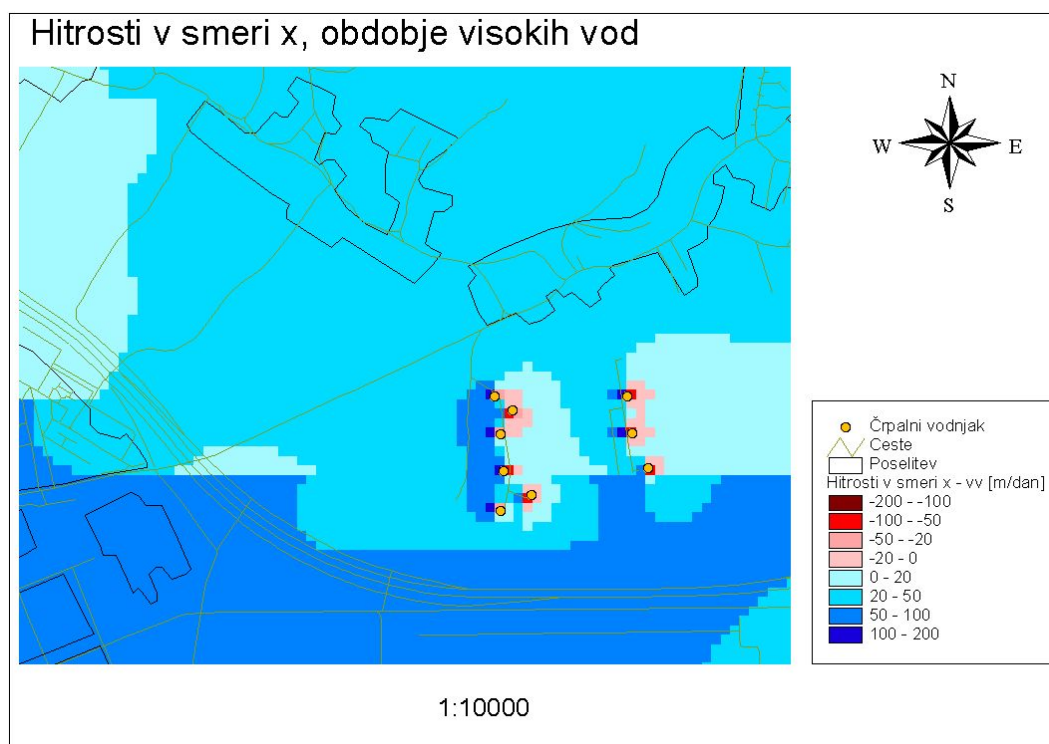
Slika 14: Hidroizohipse v obdobju visokih voda pri črpanju 540 l/s.



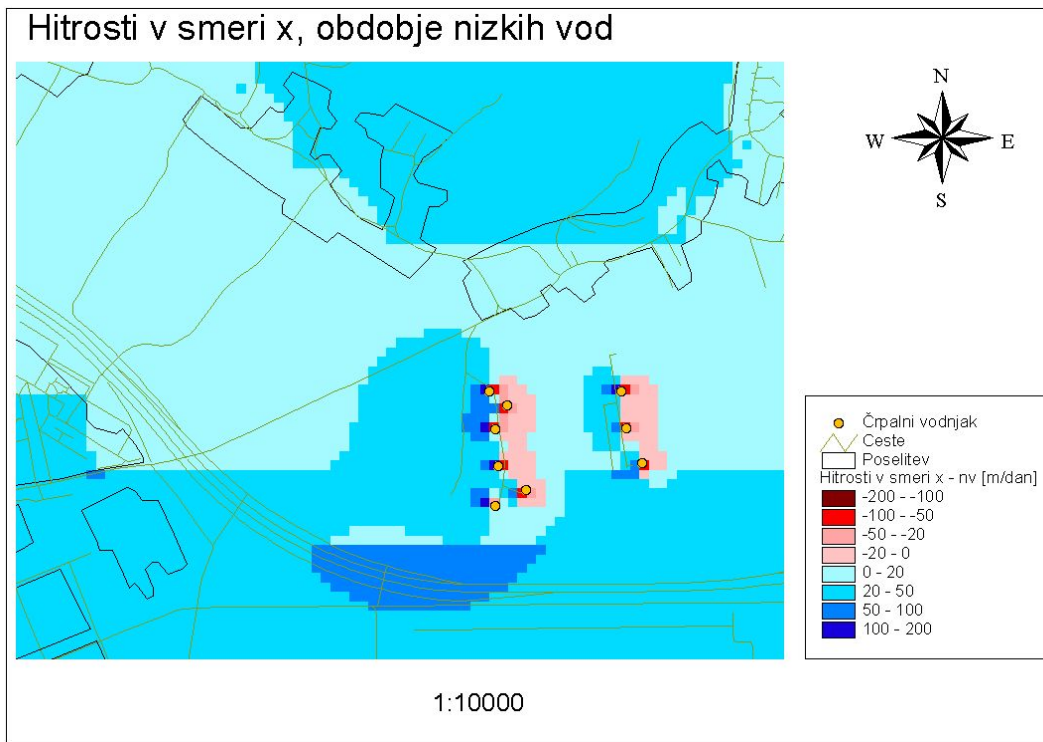
Slika 15: Hidroizohipse v obdobju nizkih voda pri črpanju 540 l/s.



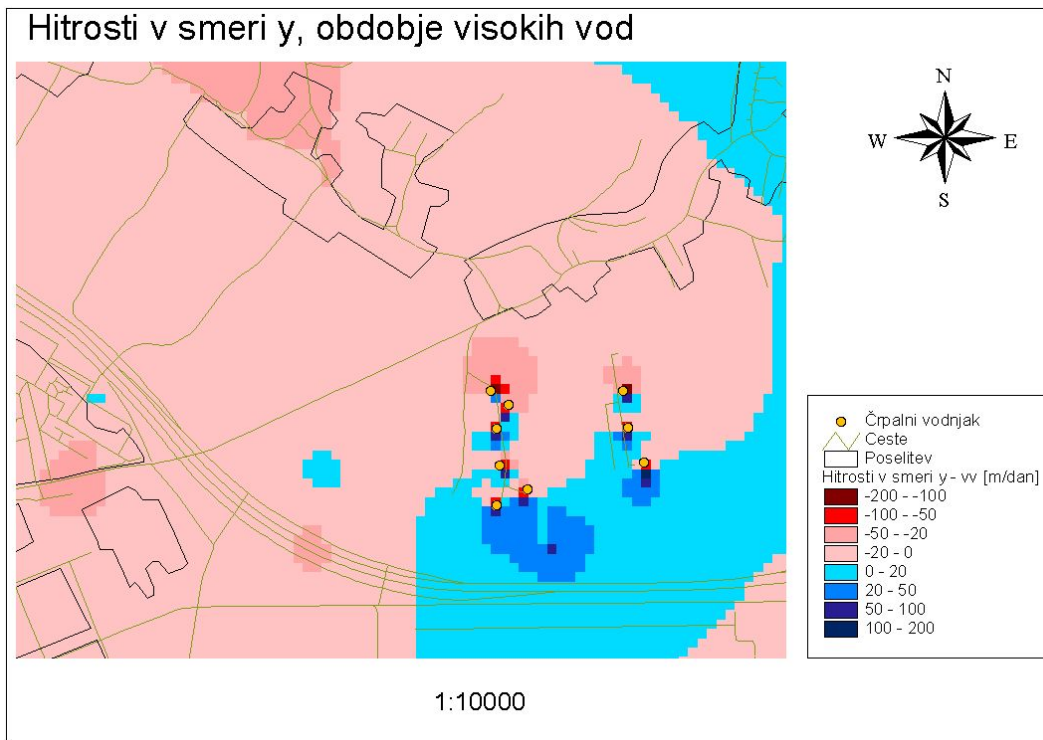
Slika 16: Uporabljen koordinatni sistem v programskem orodju MIKE SHE (DHI Water and Enviroment, 1999a).



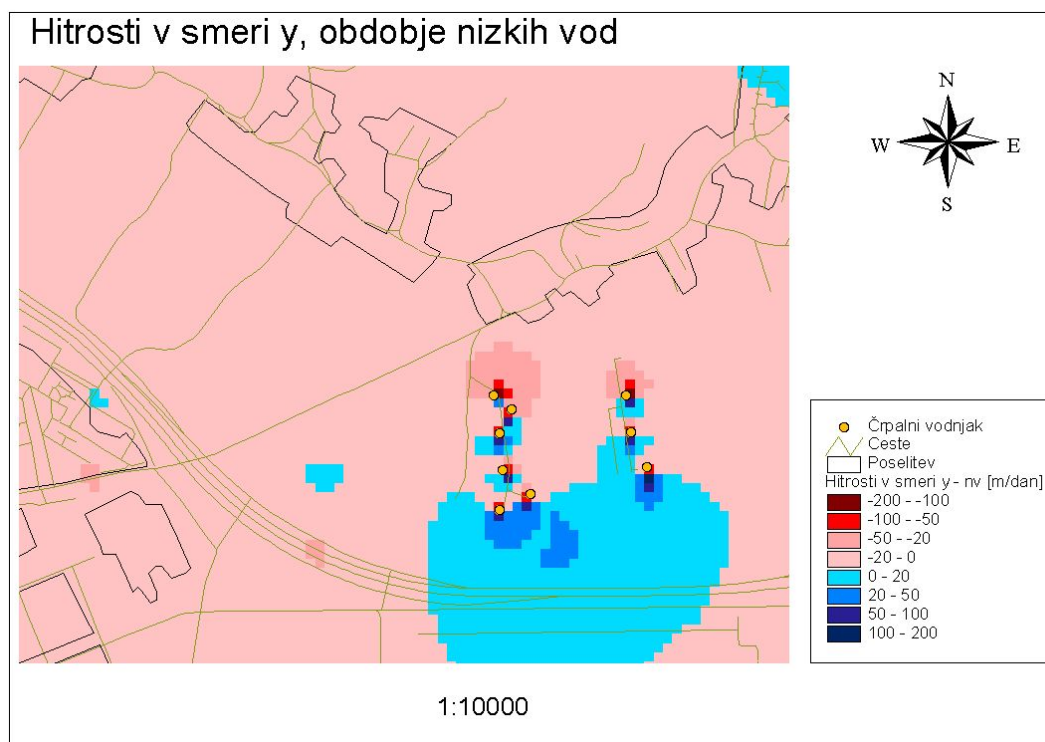
Slika 17: Hitrosti v smeri x pri črpanju 540 l/s.



Slika 18: Hitrosti v smeri x pri črpanju 540 l/s.

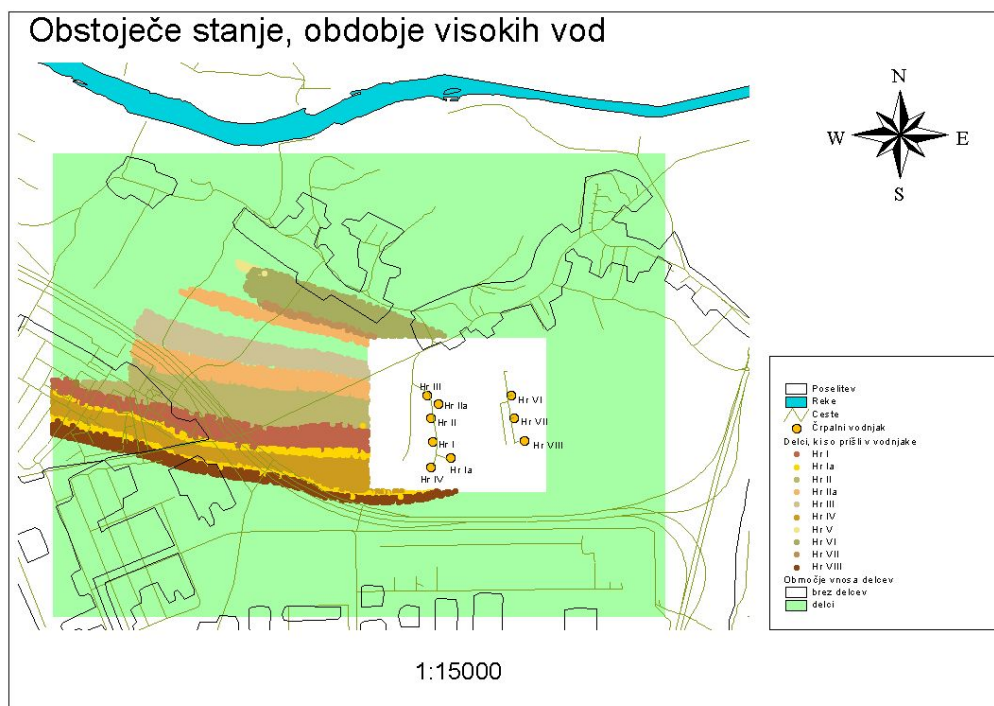


Slika 19: Hitrosti v smeri y pri črpanju 540 l/s.

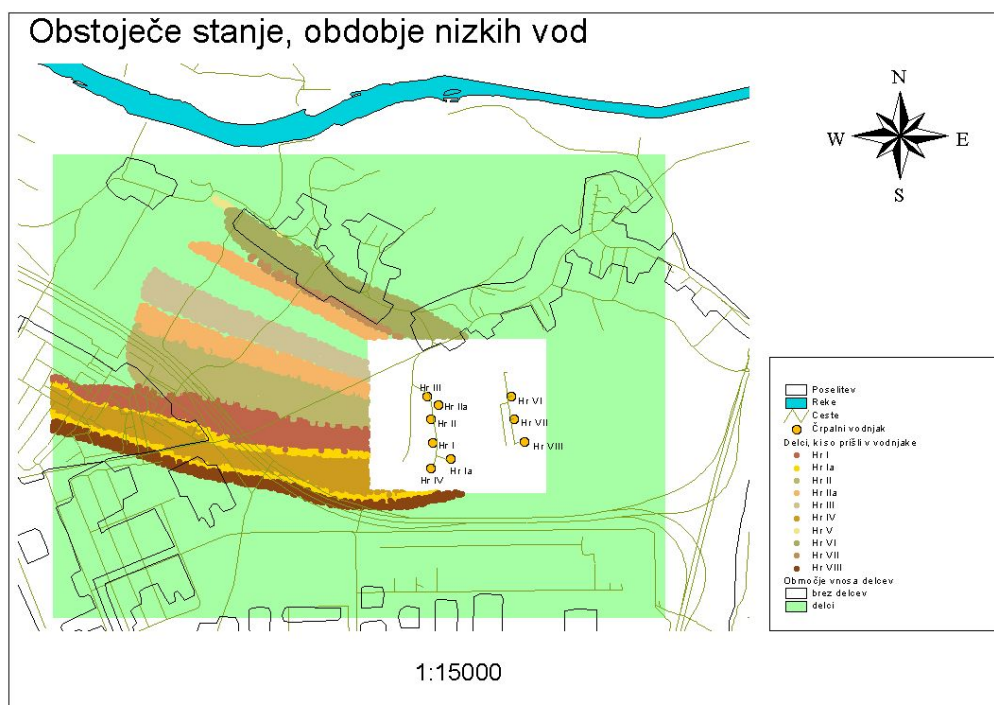


Slika 20: Hitrosti v smeri y pri črpanju 540 l/s.

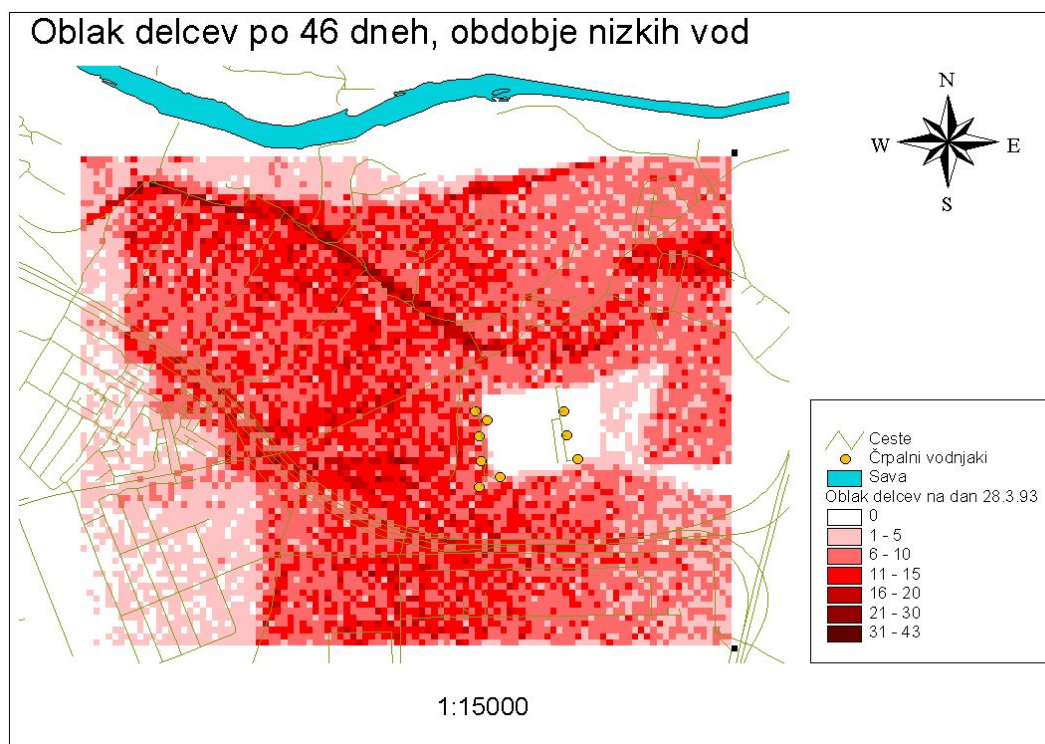
Na spodnjih dveh slikah (sliki 21 in 22) so prikazane začetne lokacije delcev, ki so od tam prišli do določenega črpalnega vodnjaka. Temu lahko rečemo tudi vplivno območje vodarne. V času nizkih vod se to območje na severni strani še malo poveča (slika 22). To je posledica spremembe smeri toka iz Z na SV. Pri potovanju oblaka onesnaženja je opazno območje velikih hitrosti pretakanja podtalnice na jugu, kjer delce hitro odnaša naprej (slike 23-30). Onesnaženje doseže vodnjake v prvi vrsti vodarne v obdobju visokih vod 39 dni (slika 27), v obdobju nizkih vod pa 46 dni (slika 23).



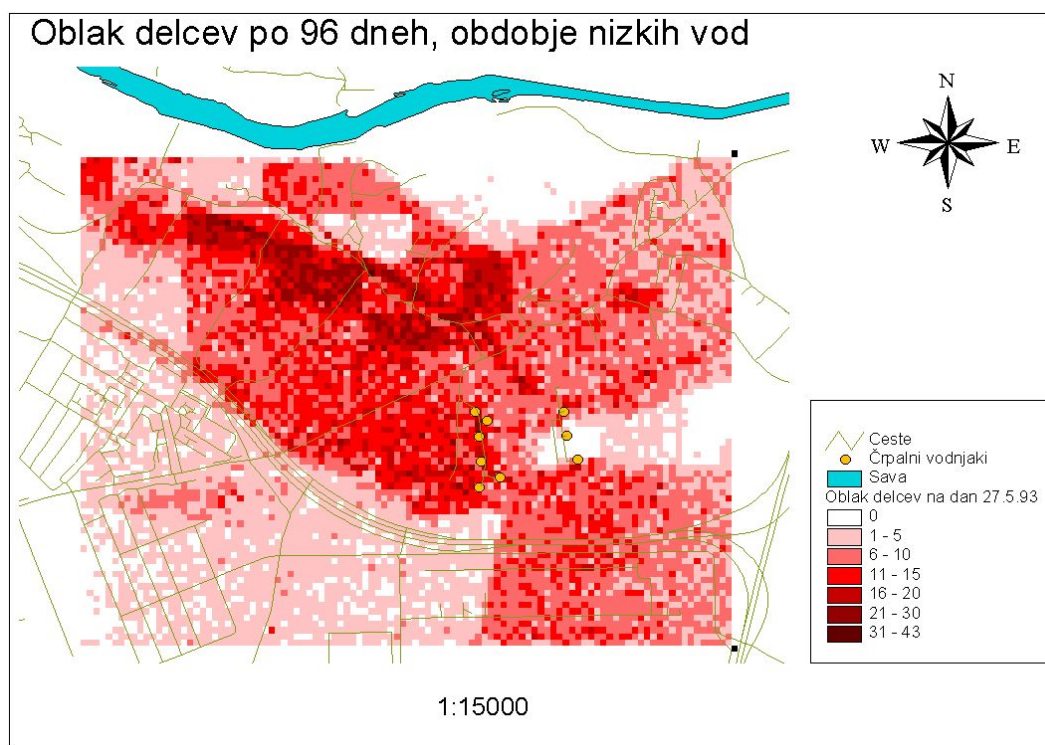
Slika 21: Začetne lokacije delcev, ki so prišli v črpalne vodnjake pri črpanju 540 l/s v obdobju visokih vod.



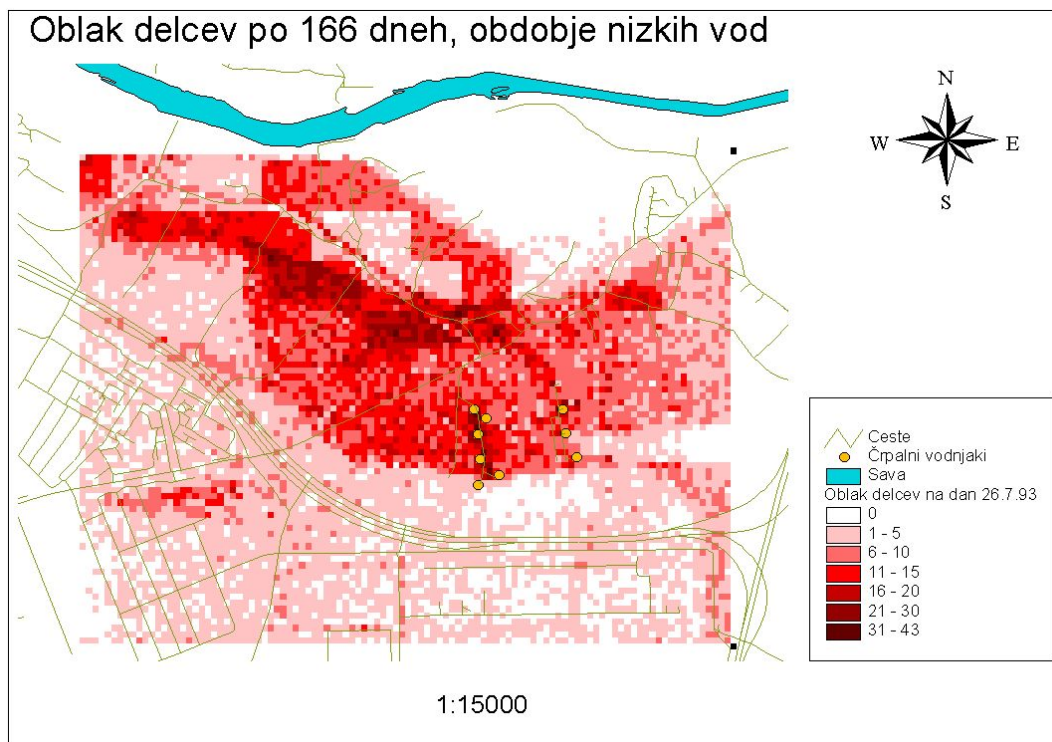
Slika 22: Začetne lokacije delcev, ki so prišli v črpalne vodnjake pri črpanju 540 l/s v obdobju nizkih vod.



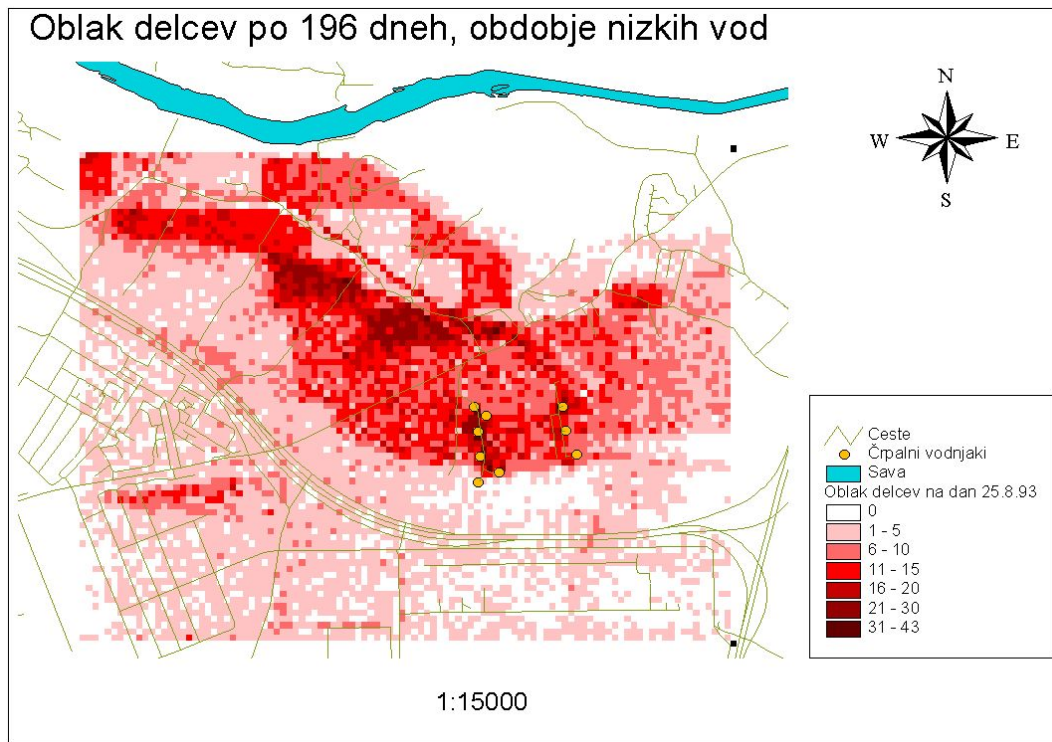
Slika 23: Oblak onesnaženja 46 dni od začetka simulacije, nizke vode.



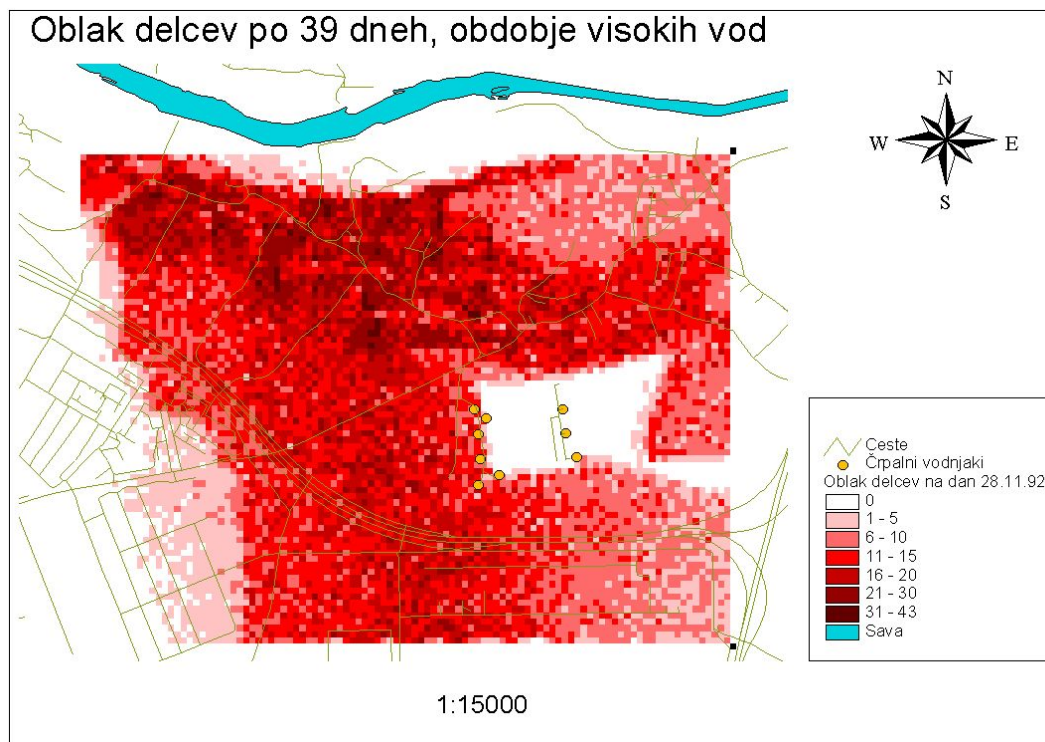
Slika 24: Oblak onesnaženja 96 dni od začetka simulacije, nizke vode.



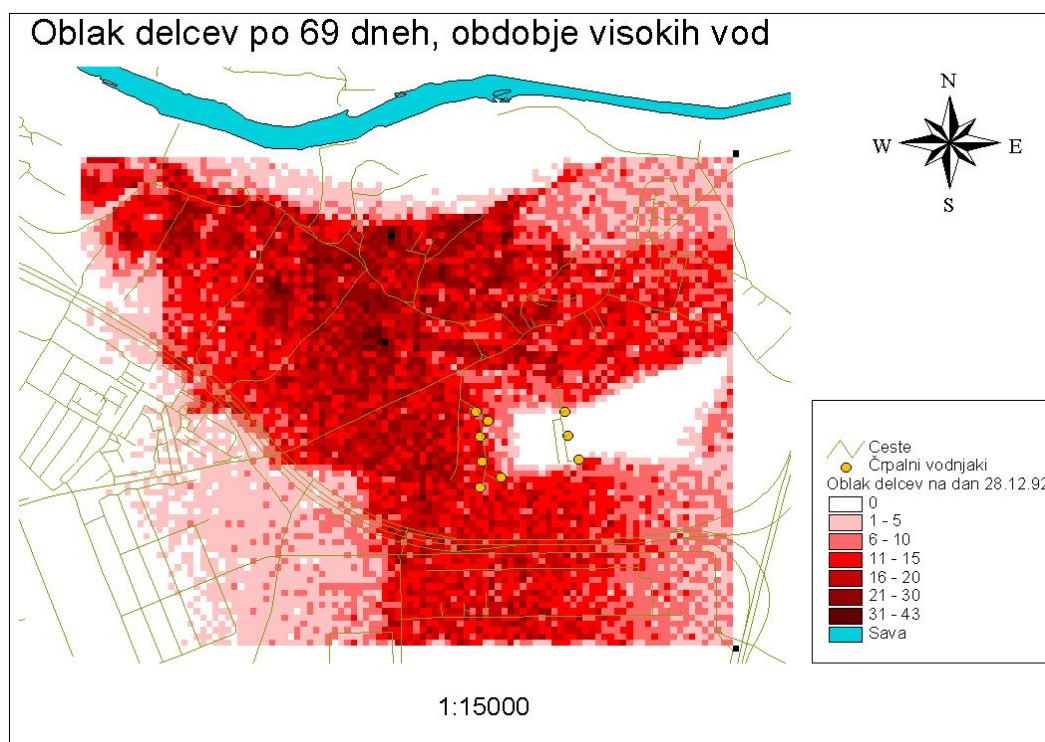
Slika 25: Oblak onesnaženja 166 dni od začetka simulacije, nizke vode.



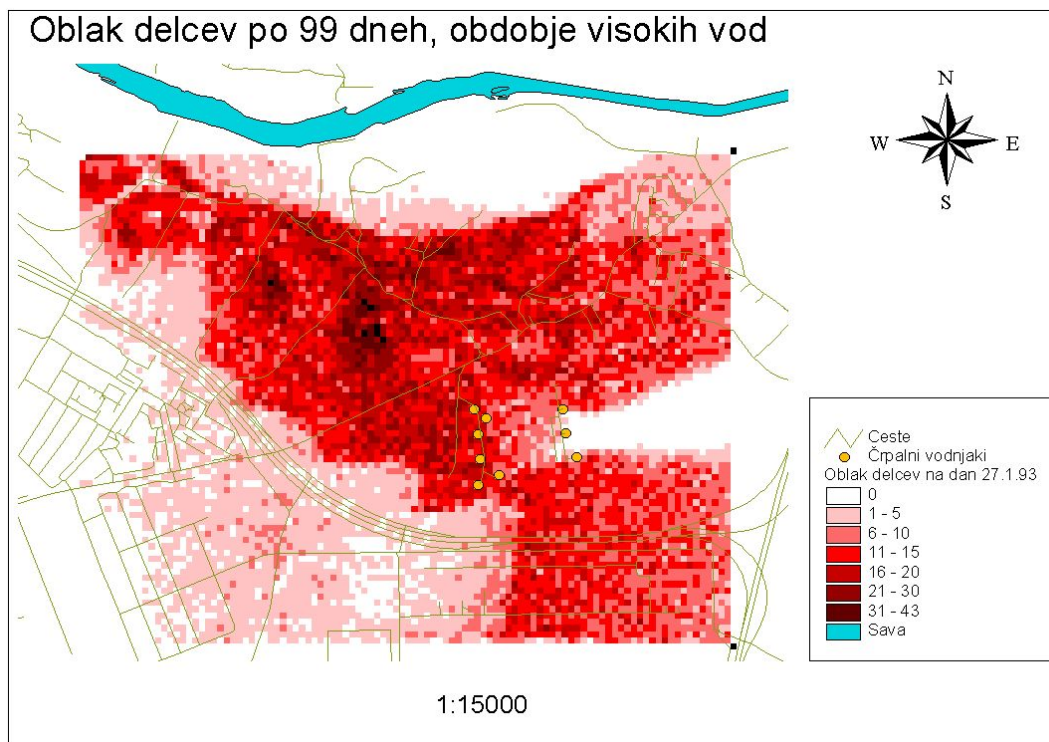
Slika 26: Oblak onesnaženja 196 dni od začetka simulacije, nizke vode.



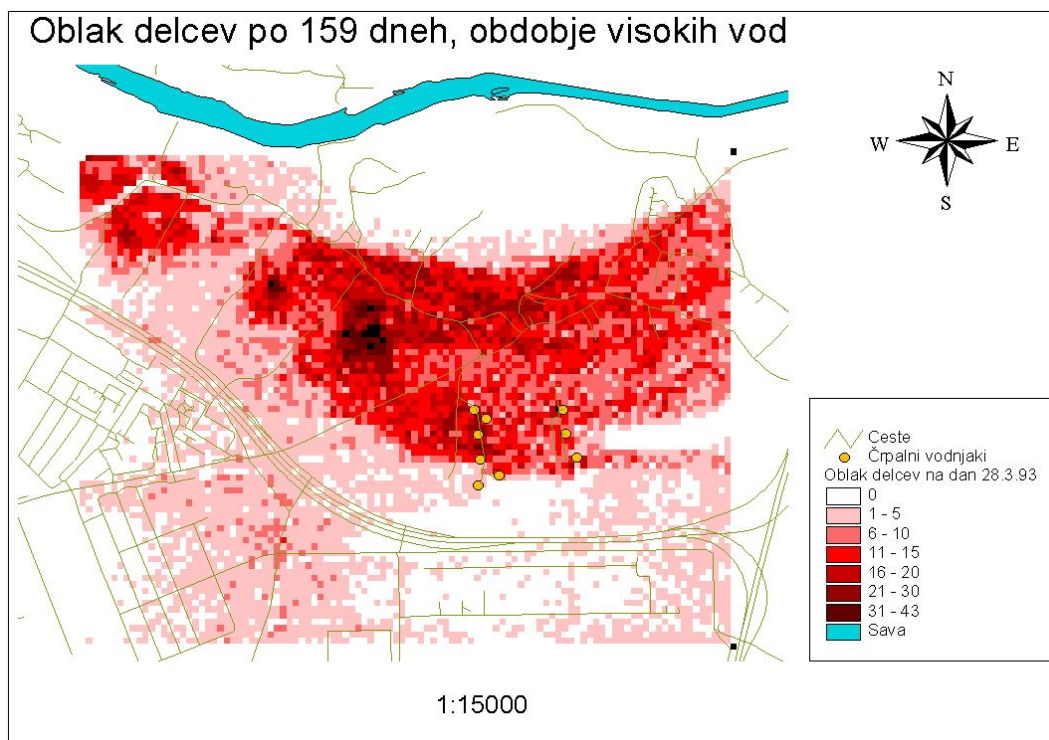
Slika 27: Oblak onesnaženja 39 dni od začetka simulacije, visoke vode.



Slika 28: Oblak onesnaženja 69 dni od začetka simulacije, visoke vode.



Slika 29: Oblak onesnaženja 99 dni od začetka simulacije, visoke vode.



Slika 30: Oblak onesnaženja 159 dni od začetka simulacije, visoke vode.

Iz rezultatov simulacije je razvidno, da je vodarna kljub trenutnim varovalnim ukrepom zelo ogrožena. Če do pride do onesnaženja na zahodni strani vodarne, bo to sigurno prišlo do črpalnih vodnjakov. Na južnem delu je polje večjih hitrosti, ki na nek način ščiti vodarno in odnaša morebitno onesnaženje naprej, oziroma ga vsaj zmanjša. Ko ugotovimo, da je voda onesnažena, nam ne preostane drugega, kot da prekinemo črpanje in poskušamo odkriti izvor onesnaženja ter ga odstraniti. Tudi če nam to uspe, lahko s črpanjem nadaljujemo šele takrat, ko gre onesnaženje mimo. To pa je odvisno predvsem od vrste in količine onesnaženja. V vmesnem času pa morajo ostale vodarne nadomestiti kapacitete vodarne. Seveda pa to potegne za seboj tudi veliko stroškov, ker moramo vodo prečrpavati, posledično so višji tlaki v omrežju, ki pomenijo večjo možnost okvar, to pa pomeni še večje izgube na omrežju. Vse to, pa je možno le ob predpostavki, da ostale vodarne nimajo težav z onesnaženjem in da imajo dovolj velike kapacitete črpanja. Če temu ni tako, nam ostane le uvedba redukcije in dostava vode z gasilskimi cisternami. V primeru, da je onesnaženje bolj ali manj konstantno, nam tak način reševanja ne pomaga.

Nastali problem lahko rešimo na tri načine:

- vodarno opustimo in poiščemo nov vodni vir,
- zgradimo objekte in naprave za pripravo vode in jo ustrezno prečistimo,
- obstoječo vodarno ustrezno zaščitimo.

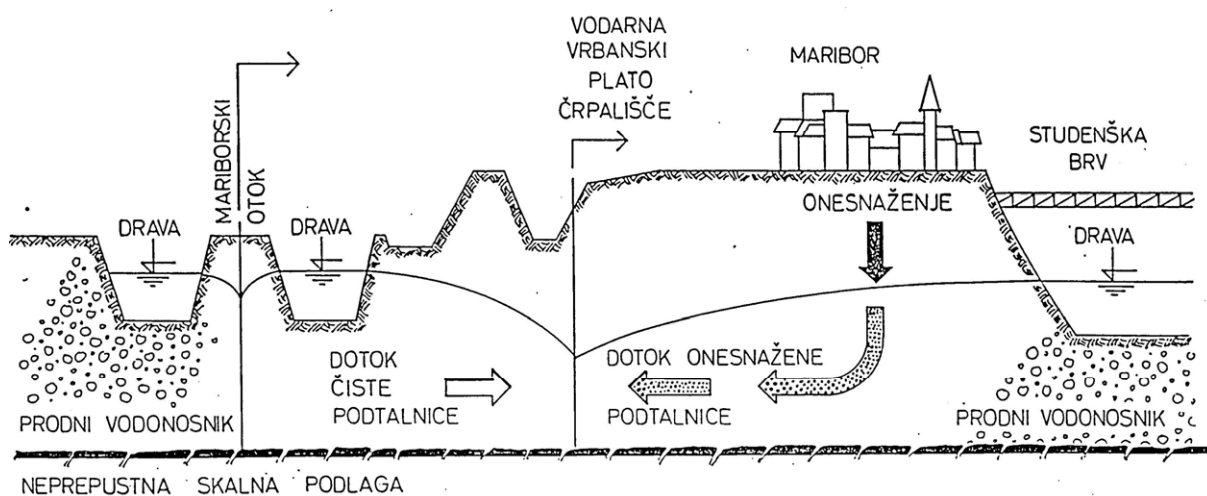
V nadaljevanju bom podrobneje predstavil možno zaščito obstoječe vodarne.

4 AKTIVNA ZAŠČITA VODARNE

O aktivni zaščiti lahko govorimo takrat, ko ukrepe pasivne zaščite (vodovarstvena območja) nadgradimo z operativnimi postopki. Rezultat tega je, da imamo kontrolo nad kakovostjo in količino vstopajoče (padavine, ponikanje, infiltracija, inducirana infiltracija iz rek, itd.) in izstopajoče (črpanje) vode. To lahko dosežemo z umetnim bogatenjem podtalnice in na ta način ustvarimo »vodno zaveso« okrog črpališča ter s tem preprečimo dostop potencialno onesnaženi vodi izpod mesta.

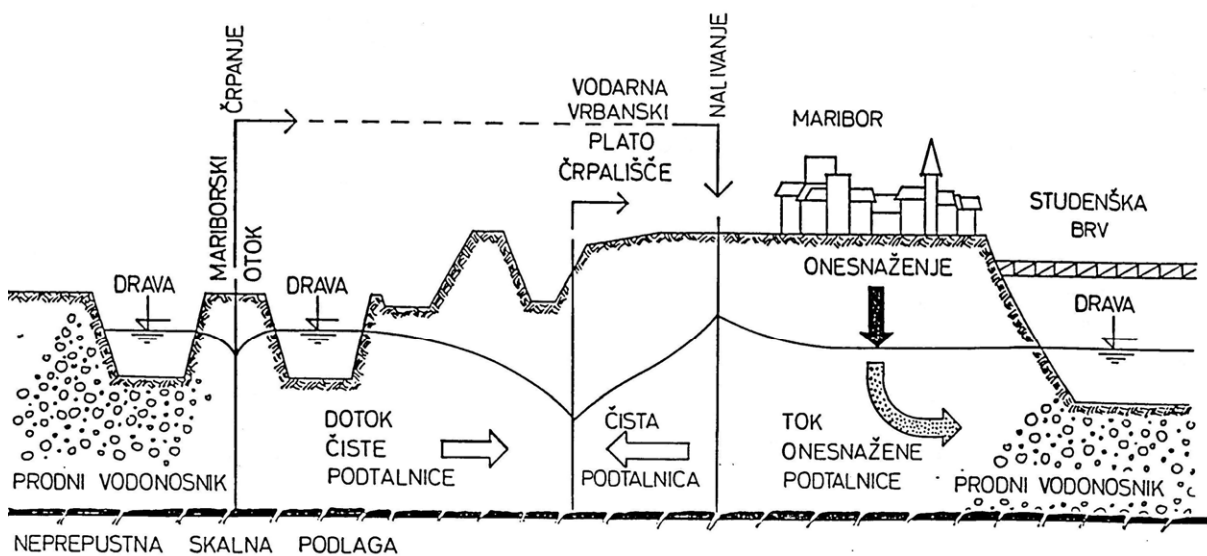
Umetno bogatenje je postopek, pri katerem črpamo vodo iz podtalnice ali površinskih vodotokov in jo po kontroli kvalitete nalivamo (bogavimo) v podtalje v neposredni bližini črpališča. Črpamo in bogavimo več, kot kasneje iz podtalja izčrpamo za potrebe vodovoda. To pomeni, da del vode odteka od črpališča. S tem je ustvarjena vodna zavesa, ki odriva morebiti onesnaženo vodo iz zaledja. Potencialno ali dejansko onesnažena zaledna voda torej ne more priti do črpališča in ga onesnažiti. Ves postopek je tako količinsko in kakovostno popolnoma kontroliran (Kompare, B., 2002). Učinek vodne zavesa je lepo viden na spodnjih dveh slikah (slika 31 in slika 32).

V primeru zaščite le z vodovarstvenimi območji (slika 31), doteka v vodarno tudi voda izpod mesta, ki predstavlja nenehno grožnjo z onesnaženjem. Nad dotokom vode do vodarne nimamo nikakršnega vpliva. Da je voda onesnažena, opazimo šele v vodarni in edini možni ukrep je, da zaustavimo črpanje in počakamo, da gre onesnaženje mimo. Zelo težko pa je najti tudi vir onesnaženja in ga odstraniti, ker od vnosa le-tega običajno mine že veliko časa (odvisno od razdalje in hitrosti toka podtalnice).



Slika 31: Primer zaščite vodarne z vodovarstvenimi območji (Kompore, B., 2002)

Z umetnim bogatenjem ustvarjena vodna zavesa pa vodo izpod mesta odrine stran od vodarne in jo s tem zaščiti (slika 32).



Slika 32: Primer zaščite vodarne z vodno zaveso-aktivna zaščita (Kompore, B., 2002)

Ker nismo omejeni z naravno izdatnostjo vodonosnika, lahko povečamo tudi zmogljivost črpališča. Seveda moramo temu primerno nalivati več vode. Obenem pa lahko tudi zmanjšamo obseg vodovarstvenih pasov in s tem ne omejujemo več razvoja mesta. Ožje območje vodarne lahko tako namenimo rekreacijskim površinam, ki neposredno ne ogrožajo podtalnice, npr parki, tenis igrišča, ipd. (Rismal, M., 2002b).

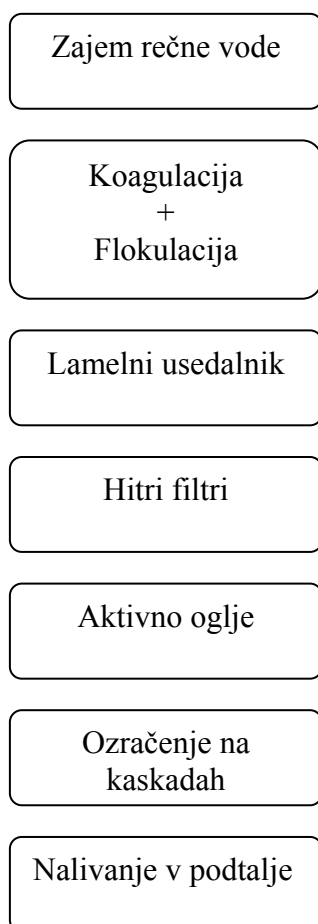
Tak način zaščite uporabljajo v Nemčiji (Schmidt, C. K., *et al*, 2003), Avstriji (Schmoelzer, H., 2002), Švici (Leuthold, A., Lussi, G., 1988), ZDA (Jonson, A.I., Pyne, D.G., 1994) in tudi pri nas v Ormožu (Meško, B., 2003) in Mariboru (Rismal, M., Kopač, I., 2000). Povsod se je ta metoda izkazala kot učinkovita, varna in zanesljiva.

Vodo, namenjeno bogatenju podtalnice, moramo pred nalivanjem ustrezno pripraviti. Biti mora brez kemikalij, lahko pa vsebuje biološko onesnaženje, ker se to odfiltrira kasneje v podtalju. Odstraniti je treba tudi suspendirane delce in lebdeče snovi, v nasprotnem primeru imamo lahko težave pri nalivanju, ker se nam nalivalni vodnjaki lahko zamašijo.

4.1 Možni načini predpriprave vode za umetno bogatenje

Vodo za bogatenje lahko črpamo iz površinskih vod ali podtalnice. Površinske vode so bolj izpostavljene onesnaženju, vendar to hitreje odteče (Rismal, M., 2002a), količina načrpane vode pa nam, vsaj pri večjih vodotokih, ne dela težav. Podtalnica je sicer zaščitena s krovno zemljino, vendar v primeru, da pride do onesnaženja, traja dalj časa, da se očisti in da lahko zopet začnemo s črpanjem (Rismal, M., 2002a). Pri količini črpanja smo tudi bolj omejeni, oziroma potrebujemo več prostora. Vmesna možnost je črpanje obrežnega filtrata, ki večino kemijskega onesnaženja zelo zmanjša ali pa celo odstrani (Schmidt, C. K., *et al*, 2003). Učinek je odvisen od oddaljenosti od reke, geološke sestave tal in vrste onesnaženja. V nadaljevanju so podrobneje predstavljeni trije načini predpriprave vode za bogatenje: direkten zajem surove savske vode, zajetje obrežnega filtrata z vodnjaki in z drenažo.

4.1.1 Direkten zajem savske vode



Slika 33: Shema predpriprave vode za nalivanje.

Sava trenutno spada v 2. kvalitetni razred (ARSO, 2002), njena kvaliteta pa naj bi se v prihodnje, v skladu s sprejeto direktivo (WFD), še izboljšala (Brilly, M., 2002). Voda je po kakovosti skoraj primerna za nalivanje (priloga B3), odstraniti je potrebno le fenole. Vsebuje tudi preveč suspendiranih snovi, ki jih je prav tako potrebno odstraniti. V nasprotnem primeru se nam nalivalni vodnjaki prehitro zamašijo.

Na desnem bregu Save, na območju Roj, postavimo zajetje (priloga C). S črpalkami prečrpamo vodo na območje vodarne. Tam bodo objekti za pripravo vode. Suspendirane snovi se bodo odstranile v bazenih za koagulacijo in flokulacijo. V lamelnem usedalniku se bodo odstranili kosmi, ki bodo prišli iz flokulacijskega bazena (večina kosmov se odstrani že v flokulacijskem bazenu). S tem zmanjšamo število pranj filtra. Vodo spustimo še čez hitri filter in nato še čez ogljeni, kjer odstranimo še morebitne kemijske polutante. Pred nalivanjem vodo na kaskadah nasičimo s kisikom in nato jo s cevovodi pripeljemo do nalivalnih vodnjakov ter nalivamo nazaj v podtalje (slika 33). Sledi okvirni izračun potrebnih objektov za pripravo vode za bogatenje.

Dimenzioniranje cevovoda Roje-Hrastje

Za dimenzioniranje so uporabljene enačbe od 1 do 5.

Prečrpati moramo pretok $Q = 640 \text{ l/s}$

Izberem premer cevi $d = 700 \text{ mm}$

Manningov koeficient: $n_g = 0,011$

Razdalja do vodarne: 1200 m

R... hidravlični radij

c... De Chezy-ev koeficient

v... hitrost toka

I... naklon

ΔH ...hidravlične izgube

$$R = \frac{d}{4} = 0,175 \quad (1)$$

$$c = \frac{1}{n_g} \cdot R^{\frac{1}{6}} = 67,99 \quad (2)$$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = 1,66 \frac{m}{s} \quad (3)$$

$$I = \frac{v^2}{c^2 \cdot R} = 0,0034 = 3,4\% \quad (4)$$

$$\Delta H_{in} = I \cdot L = 4,1m \quad (5)$$

Izbira črpalke

Geodetska višina je cca 14,5 m (od kote črpanja do vodarne), linijske izgube so 4,1 m. Potrebna višina črpanja je 19 m. Na osnovi tega in želene količine črpanja $Q=640$ l/s izberem 3 črpalke v horizontalni izvedbi, naslednjih nazivnih (delovnih) karakteristik (priloga A1):

- $Q=215$ l/s
- črpalna višina $H= 19$ m
- izkoristek $\eta = 0,78$
- potrebna moč za pogon $P_{gr}= 84$ kW
- specifična poraba energije $E=0,07$ kWh/m³

Koagulacija

Račun koagulacije je samo informativen. Za podrobnejši izračun bi bilo potrebno opraviti natančnejše analize, oziroma postaviti pilotno napravo in spremljati spremembe. Na podlagi rezultatov bi se potem lahko odločili za koagulant in doziranje.

Koagulant izberem na podlagi pH surove vode. Sava ima pH od 8 do 8,5. Izberem Železov sulfat - $Fe_2(SO_4)_3$. Na našem tržišču se ga dobi kot 41% raztopino.

Predpostavim, da smo na podlagi analiz prišli do zaključka, da je potrebna količina koagulanta 20 mg/l. Ker se koagulant dobavlja kot 41% raztopina, izračunam količino doziranja (6).

$$C[\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3] = \frac{20 \text{ mg/l}}{0,41} = 48,8 \text{ mg/l} \quad (6)$$

Pripraviti moramo 640 l/s, torej bomo potrebovali cca 110 kg koagulanta na uro črpanja.

Dimenzioniranje koagulacijskega bazena

Grobi opis objekta je v (AWWA, ASCE, 1997). Dimenzioniranje prikazujejo enačbe od (7) do (10) (Lin, 2001).

Izberem čas $t = 20\text{s}$

Izberem $G = 3000$

$\mu_v = 0,00113 \text{ Ns/m}^2$ pri $T = 15^\circ\text{C}$

$20\ 000 < G \cdot t < 200\ 000$

$G \cdot t = 60\ 000$

Predvidim dva bazena, zato dimenzioniram na $Q/2$.

Izračunam volumen posameznega bazena (7).

$$V = Q \cdot t = 0,32 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 20\text{s} = 6,4 \text{ m}^3 \quad (7)$$

Izberem hitrost $v = 0,16 \text{ m/s}$. Izračunam površino (8) in višino (9).

$$S = \frac{Q}{v} = \frac{0,32}{0,16} = 2 \text{ m}^2 \quad (8)$$

$$h = \frac{V}{S} = \frac{6,4}{2} = 3,2 \text{ m} \quad (9)$$

Potrebna moč posameznega motorja (10).

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V = 9 \cdot 10^6 \cdot 113 \cdot 10^{-5} \cdot 6,4 = 65 \text{ kW} \quad (10)$$

Za celoten pretok potrebujemo dva bazena in dva motorja s skupno močjo 130 kW.

Dimenzioniranje flokulacijskega bazena

Grobi opis objekta je v (AWWA, ASCE, 1997). Dimenzioniranje prikazujejo enačbe od (11) do (16).

Predvidim dva bazena, zato dimenzioniram na $Q/2$.

$$Q = 0,32 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t = 30 \text{ min} = 1800 \text{ s}$$

Izberem $G \cdot t = 72\,000$.

$$G = \frac{72000}{1800} = 40$$

Izračunam volumen bazena z mešali (11).

$$V = Q \cdot t = 0,32 \cdot 1800 = 576 \text{ m}^3 \quad (11)$$

Izberem višino bazena $H = 3,2 \text{ m}$

Izračunam površino bazena (12).

$$A = \frac{V}{H} = \frac{576}{3,2} = 180 \text{ m}^2 \quad (12)$$

Izberem širino bazena $B = 10 \text{ m}$, dolžina $L = 18 \text{ m}$

Izračunam potrebno moč motorja (13)

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V = 1600 \cdot 113 \cdot 10^{-5} \cdot 576 = 1,04 \text{ kW} \quad (13)$$

Izberem obodno hitrost mešal $v_p = 0,45 \text{ m/s}$

Koeficient upora oblike $c_d = 1,9$

Izračunam površino lopatic (14).

$$P = F \cdot v = c_d \cdot \rho \cdot \frac{S_p \cdot v_p^3}{2} \Rightarrow S_p = \frac{2 \cdot P}{c_d \cdot \rho \cdot v_p^3} = \frac{2 \cdot 1,04}{1,9 \cdot 0,999 \cdot 0,45^2} = 12 \text{ m}^2 \quad (14)$$

Izberem 2 motorja. Os motorja je nameščena pravokotno na tok vode.

$$P_1 = P_2 = 0,52 \text{ kW}$$

Površina lopatic na posameznem motorju $S_1 = 6 \text{ m}^2$.

Število lopatic na posameznem motorju $n = 12$, nameščene so z zamikom 90° .

Površina ene lopatice $A_1 = 0,5 \text{ m}^2$.

Izberem širino ene lopatice $b = 0,25 \text{ m}$

$$d = \frac{A}{b} = \frac{0,5}{0,25} = 2 \text{ m} \rightarrow \text{polmer mešala } r = 1 \text{ m} \quad (15)$$

$$\text{Število obratov v minuti } \nu = \frac{60 \cdot v_p}{2 \cdot \pi \cdot r} = 4,3 \text{ min}^{-1} \quad (16)$$

Za celoten pretok potrebujemo dva bazena $10 \text{ m} \times 18 \text{ m} \times 3,2 \text{ m}$

in 4 motorje s skupno močjo $2,08 \text{ kW}$, na katerih je nameščeno skupno 24 lopatic dimenzij $2 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$.

Dimenzioniranje lamelnega usedalnika

Grobi opis objekta je v (AWWA, ASCE, 1997). Predvidim dva usedalnika, zato dimenzioniram na pretok $Q/2$. Dimenzioniranje prikazujejo enačbe od (17) do (23).

Predpostavke:

- 1) Pri flokulaciji se izločijo delci, ki so večji od $0,02 \text{ mm}$.
- 2) Hitrost usedanja manjših delcev je bila izmerjena v laboratoriju in znaša $0,22 \text{ mm/s}$ pri temperaturi vode 15°C . Hitrost je obratno sorazmerna z viskoznostjo, ki je v veliki meri odvisna od temperature; torej nižja temperatura pomeni tudi manjšo hitrost.

Lamelni usedalnik bo modularne zasnove, iz kvadratnih cevi, širine 60 mm , višine $1,3 \text{ m}$ in nagnjenih za 50° (slika 34).

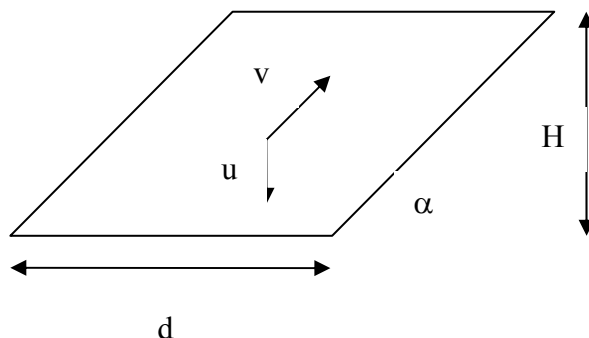
$$Q = 0,32 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = 60 \text{ mm} = 0,06 \text{ m}$$

$$H = 1,3 \text{ m}$$

$$\alpha = 50^\circ$$

u = hitrost usedanja



Slika 34: Prerez lamele lamelnega usedalnika.

$$u = \frac{Q \cdot d}{A \cdot (H \cdot \cos \alpha + d \cdot \cos^2 \alpha)} = \frac{0,32 \cdot 0,06}{A \cdot (1,3 \cdot \cos 50 + 0,06 \cdot \cos^2 50)} = \frac{0,0223}{A} \quad (17)$$

Ker so v praksi hitrosti usedanja manjše kot v laboratoriju v idealnih pogojih uporabimo še varnostni faktor, (Lin, S., 2001).

$$u = 0,6 \cdot 0,00022 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{0,0223}{0,6 \cdot 0,00022} = 169 \text{ m}^2 \quad (18)$$

Uporabim $A = 170 \text{ m}^2$

Izračunam površinsko obremenitev (19).

$$\frac{Q}{A} = \frac{0,32 \cdot 3600 \cdot 24}{170} = 162 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dan} \quad (19)$$

Hitrost vode v ceveh (20).

$$v = \frac{Q}{A \cdot \sin \alpha} = \frac{162}{\sin 50} \quad (20)$$

$$v = 211,5 \text{ m/dan} = 0,147 \text{ m/min} = 0,0024 \text{ m/s}$$

Izberem globino $H = 4 \text{ m}$ in širino $B = 8 \text{ m}$.

Izračunam potrebno dolžino (21).

$$L = \frac{A}{B} = \frac{162}{8} = 21m \quad (21)$$

Kontrola horizontalne hitrosti (22).

$$v_H = \frac{Q}{S} = \frac{0,32 \cdot 3600}{4 \cdot 8} = 36 m/h \quad (22)$$

Kontrola Reynoldsovega števila: $Re < 2000$ (23).

$$\text{Hidravlični radij } R = \frac{d}{4} = 0,015m$$

$$Re = \frac{v \cdot R}{\mu} = \frac{0,0024 \cdot 0,015}{1,131 \cdot 10^{-6}} = 31,8 < 2000 \Rightarrow \text{laminarni režim toka} \quad (23)$$

Dimenzioniranje hitrega filtra

Grobi opis objekta je v (AWWA, ASCE, 1997). Dimenzioniram na pretok $Q = 0,64 \text{ m}^3/\text{s}$. Izračun prikazujejo enačbe od (24) do (43).

Izberem hitrost filtracije $v = 5 \text{ m/h}$

Debelina filtrske plasti je $0,6 \text{ m}$.

Površina filtra

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,6 \cdot 3600}{5} = 432 \text{ m}^2 \quad (24)$$

Izberem število filtrov $n = 4$.

To pomeni, da morajo biti 4 v obratovanju 1 pa se čisti, torej potrebujem 5 filtrov.

Površina posameznega filtra

$$A_1 = \frac{A}{n} = 108 \text{ m}^2 \quad (25)$$

Izberem širino $B = 8 \text{ m}$ in dolžino $L = 13,5 \text{ m}$.

Izberem granulacijo medija, izračunam koeficient zrnivosti (26) in srednje zrno (27).

$$d_{10} = 0,6 \text{ mm}$$

$$d_{60} = 0,75 \text{ mm}$$

$$\text{Koefficient enakomernosti } n = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 1,25 \quad (26)$$

$$d_{90} = d_{10} \cdot (10^{1,67 \cdot \log n}) \quad (27)$$

$$d_{90} = 0,87 \text{ mm} = 0,087 \text{ cm} = 0,00087 \text{ m}$$

Hidravlične izgube

Izračun je narejen po (Lin, S., 2001).

$$\text{Poroznost } \varepsilon = 0,38$$

$$\text{Koefficient okroglosti } \psi = 1$$

$$\text{Kozeny-eva konstanta } k = 6$$

$$\text{Razmerje površine in volumna zrn } \frac{A}{V} = \frac{6}{\psi \cdot d_{90}} = 6897 \quad (28)$$

$$\frac{h}{L} = \frac{k \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon)^2}{g \cdot \rho \cdot \varepsilon^3} \cdot \left(\frac{A}{V}\right)^2 \cdot v$$

$$h = \frac{L \cdot k \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon)^2}{g \cdot \rho \cdot \varepsilon^3} \cdot \left(\frac{A}{V}\right)^2 \cdot v \quad (29)$$

$$h = \frac{0,6 \cdot 6 \cdot 0,00113 \cdot (1 - 0,38)^2}{9,81 \cdot 999 \cdot 0,38^3} \cdot 6897^2 \cdot \frac{5}{3600}$$

$$h = 0,2 \text{ m}$$

Hitrost pralne vode

Izračun je narejen po (Lin, S., 2001).

$$\rho = 0,999 \text{ g/cm}^3 = 999 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,00113 \text{ Ns/m}^2 = 0,00113 \text{ kg/ms} = 0,0113 \text{ g/cms}$$

Galilejevo število G_n (30).

$$G_n = \frac{d_{90}^3 \cdot \rho \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g}{\mu^2} = \frac{0,087^3 \cdot 0,999 \cdot (2,65 - 0,999) \cdot 981}{0,0113^2} \quad (30)$$

$$G_n = 8344$$

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho \cdot d_{90}} \cdot (1135,69 + 0,0408 \cdot G_n)^{0,5} - \frac{33,7 \cdot \mu}{\rho \cdot d_{90}} \quad (31)$$

$$U_{mf} = \frac{0,0113}{0,999 \cdot 0,087} \cdot (1135,69 + 0,0408 \cdot 8344)^{0,5} - \frac{33,7 \cdot 0,0113}{0,999 \cdot 0,087}$$

$$U_{mf} = 0,614 \text{ cm/s}$$

Rezultat še pomnožim z varnostnim faktorjem 1,3.

Hitrost pralne vode

$$U_{mf} = 0,798 \text{ cm/s} = 0,00798 \text{ m/s} = 29 \text{ m/h} \quad (32)$$

Žlebovi za odvod pralne vode

Izračun je narejen po (Lin, S., 2001).

$$Q = C \cdot b \cdot h^{1,5} \quad (33)$$

C = konstanta = 0,808

b = širina žlebu

h = maksimalna višina vode v žlebu

$$Q = A_1 \cdot U_{mf} = 108 \cdot \frac{29}{3600} = 0,87 \text{ m}^3/\text{s} \quad (34)$$

$$h^{\frac{3}{2}} = \frac{Q}{C \cdot b} \quad (35)$$

Izberem 3 žlebove dolžine 13,5 m in širine 0,5 m.

$$Q_1 = 0,29 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h = 0,8 \text{ m}$$

Drenažne odprtine in nosilni sloj filtra

Izračun je narejen po (Rismal, M., 1995).

Izberem:

premer drenažne odprtine $d_0=10 \text{ mm}$,

razdalja med odprtinami $l=20 \text{ cm}$,

dolžina lateralne cevi $L_1= 2\text{m}$

pri pogoju $\frac{S_1}{\sum S_0} = 3$ in $\frac{S}{\sum S_1} = 2$

$$n \cdot d_0 + (n+1) \cdot l = L_1 \quad (36)$$

$$n = \frac{L_1 - l}{d_0 + l} = \frac{2 - 0,2}{0,01 + 0,2} = 8,57 \approx 9$$

Dejanski razmik med odprtini (37).

$$l_d = \frac{L_1 - n \cdot d_0}{n+1} = \frac{2 - 9 \cdot 0,01}{9+1} = 0,19 \text{ m} \quad (37)$$

Presek lateralnega cevovoda (38).

$$\frac{S_1}{2} = 3 \cdot \sum S_0 = 3 \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \quad (38)$$

$$S_1 = 0,0042 \text{ m}^2$$

Premer lateralnega cevovoda (39).

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}} = 73 \text{ mm} \quad (39)$$

Dolžina glavnega cevovoda $L=13,5$ m.

Izberem razmik med lateralnimi cevovodi $l_1=25$ cm.

$$n_1 \cdot d_1 + (n_1 + 1) \cdot l_1 = L \quad (40)$$

$$n_1 = \frac{L - l_1}{d_1 + l_1} = \frac{13,5 - 0,25}{0,073 + 0,25} = 41$$

Kontrola (41).

$$l_{1d} = \frac{L - n_1 \cdot d_1}{n_1 + 1} = \frac{13,5 - 41 \cdot 0,073}{41 + 1} = 0,25 \text{ m} \quad (41)$$

Presek glavnega cevovoda (42).

$$S = 2 \cdot \sum S_1 = 3 \cdot n_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad (42)$$

$$S = 0,343 \text{ m}^2$$

Premer glavnega cevovoda (43).

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 660 \text{ mm} \quad (43)$$

Ogleni filter

Iz vode moramo odstraniti fenole. MDK je 0,005 mg/l, v vodi je 0,009 mg/l. izračun je narejen po (Lin, S., 2001). Empty bed contact time (EBCT) predpostavim. Iz tabele odčitam Freundlich-ove konstante (Lin, 2001).

$$K(\text{mg/g})(\text{l/mg})^{1/n} = 21$$

$$1/n = 0,54$$

$$\rho_{\text{gac}} = 480 \text{ g/l} = 480 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{EBCT}_{\text{min}} = 5,5 \text{ min}$$

$$(q_e)_0 = K \cdot C_1/n = 1,2 \text{ mg/g} \quad (44)$$

Izberem površino filtra: B=8m, L=16, A=128 m²

Kritična višina (45).

$$H_{\text{cr}} = \text{EBCT}_{\text{min}} \cdot Q/A = 5,5 \cdot 0,64 \cdot 60/128 = 1,65\text{m} \quad (45)$$

Življenjska doba filtra (46).

$$Z = \frac{q_e \cdot \rho}{C_0 - C_1} = \frac{1,2 \text{ mg/g} \cdot 480 \text{ g/l}}{(0,009 - 0,005) \text{ mg/l}} = 144000 \text{ l vode/l GAC} \quad (46)$$

Poraba aktivnega oglja (47).

$$\text{CUR} = \frac{C_0 - C_1}{q_e} = 0,0033 \text{ g GAC/l vode} \quad (47)$$

Potrebni volumen filtra (48).

$$V = 16 \cdot 8 \cdot 1,65 = 211 \text{ m}^3 \quad (48)$$

Potrebna količina aktivnega oglja (49).

$$\text{GAC} = 211 \cdot 480 = 101280 \text{ kg} = 101,28 \text{ tone} \quad (49)$$

Ozračevanje na kaskadah

Pred nalivanjem mora biti voda nasičena s kisikom. S tem se pospeši biološko samočiščenje.

Vodo ozračim na kaskadah s prepadno višino 0,5 m. Izračun je narejen po (Rus, A., 1985).

$$h = 0,5 \text{ m}$$

$$T_{\text{vode}} = 10^{\circ}\text{C}$$

Koncentracija kisika pri kateri je doseženo nasičenje - $C_s = f(T)$

$$C_s = 11,3 \text{ mg/l}$$

Predpostavim, da je voda brez kisika.

$$C_{T0} = 0 \text{ mg/l}$$

Doseči želim 90% nasičenost.

$$C_{TN} = 0,9 \cdot 11,3 = 10,17 \text{ mg/l} \quad (50)$$

Izberem še koeficient aeracije, ker je dejanska aeracijska kapaciteta manjša zaradi prisotnosti snovi v vodi ($0,5 < \alpha < 0,9$).

$$\alpha = 0,6$$

$$n = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{C_s - C_{T0}}{C_s - C_{TN}} = \frac{1}{0,6} \cdot \ln \left(\frac{11,3 - 0}{11,3 - 10,17} \right) \quad (51)$$

$$n = 3,84 \Rightarrow \text{potrebujem 4 kaskade.}$$

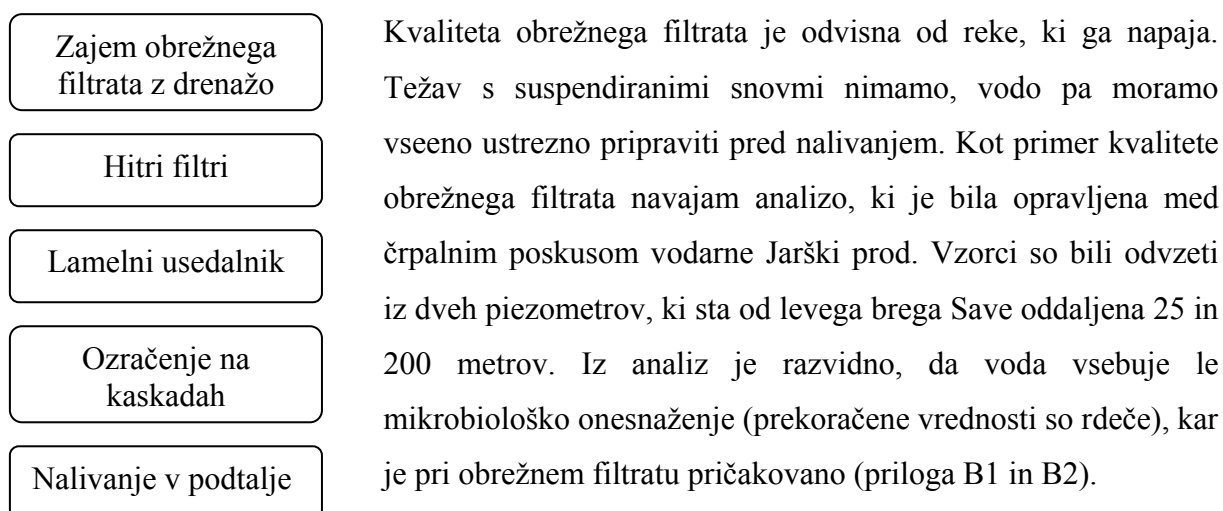
Tako pripravljena voda se zbere v zbiralniku, majhen del pa se pretaka čez akvarij, v katerem proti toku plavajo mlade šarenke (lat. *Salmo giardneri*), ki opravljajo funkcijo bioindikatorja.

Šarenko uvrščamo med postrvi (lat. *Salmonidae*). Sposobna je preživeti le v vodi z nizko temperaturo (od 3 °C do 5 °C) in veliko vsebnostjo kisika (nad 8 mg/l) ter vrednostjo pH od 6,5 do 8,0. Zelo je občutljiva tudi na vse vrste onesnaženja: na naravno mehansko onesnaženje (vpliv temperature, motnost, pene, suspendirani delci, radioaktivnost, prisotnost mineralnih in drugih trdih delcev v vodi), na biološko onesnaženje (pojav bolezenskih mikroorganizmov) in na kemično onesnaženje (vpliv organskih in anorganskih snovi) (Meško, B., 2003).

V primeru pogina rib, jih tok vode odnese na tekoči trak, mimo fotocelice, ki služi kot detektor. Ob poginu določenega števila rib se ustavi celoten sistem v črpališču.

Če je vse v redu, se vodo prek cevovodov pripelje do nalivalnih vodnjakov in naliva nazaj v podtalje.

4.1.2 Zajem obrežnega filtrata z vodnjaki

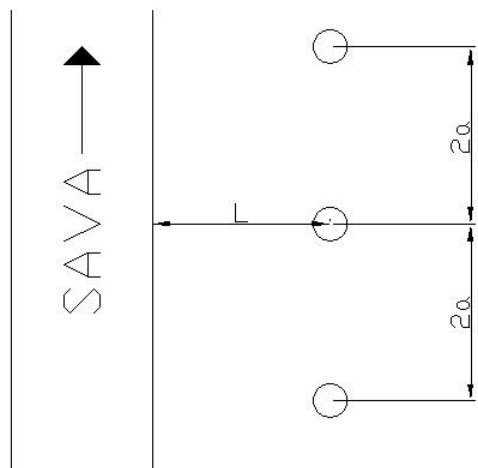


Slika 35: Shema

predpriprave vode za
nalivanje.

Obrežni filtrat se zajame z serijo vodnjakov, ki so locirani vzporedno s strugo Save na oddaljenosti 100 m (slika 36). Vrednosti koeficienta prepustnosti so bile vzete na podlagi črpalnih poizkusov izvedenih na vodnjakih v vodarni Jarški prod (Mencej, Z., Malešič, U., 2003). Povprečna vrednost koeficienta prepustnosti $k=1,41 \cdot 10^{-2}$ m/s.

Število vodnjakov je odvisno od potrebne količine vode. Vodnjaki zajamejo del obrežnega filtrata in del zaledne vode. Nadaljnji postopki priprave so razvidni iz sheme (slika 35), njihov izračun pa je enak kot pri prejšnji točki (količine vode so enake), zato jih še enkrat ne navajam. Sledi izračun vodnjakov in izbor potrebnih črpalk.



k = koeficient filtracije v m/s

$2a$ = razdalja med vodnjaki v m

L = oddaljenost od reke v m

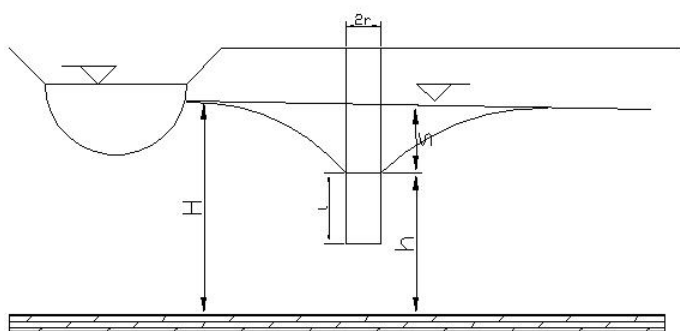
r = polmer vodnjaka m

H = debelina nasičene cone v m

l = dolžina potopljenega dela vodnjaka v m

s = upad gladine pri črpanju

h = višina vode v vodnjaku merjena od nepropustne podlage



Slika 36: Zajem obrežnega filtrata z vodnjaki.

Hidravlični izračun

Uporabim enačbo Averjanova (Aljatovski, M.E., 1973) za izračun izdatnosti za serijo vodnjakov ob vodotoku.

$$Q_i = \frac{2 \cdot \beta_1}{(1 + \beta_1)} \cdot \left[Q_2 + \frac{2 \cdot a \cdot k \cdot T_1}{L} \cdot (H - h) \right] \quad (52)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot a}{L} \cdot B} \quad (53)$$

$$B = 0,73 \cdot \log \frac{a}{\pi \cdot r} \quad (54)$$

$$T_1 = \frac{H + h}{2} \quad (55)$$

$$Q_z = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot \frac{\sqrt{k}}{15} \quad (56)$$

$$Q_i = Q_z \rightarrow Q_{\max} \quad (57)$$

Največjo možno količino črpanja (Q_{\max}) dobimo z iteracijo h ob pogoju, da sta izdatnost in zmogljivost vodnjaka enaki (57). V računu predpostavimo, da se vodnjaki napajajo samo iz reke, zato je člen Q_2 enak 0. Vodnjaki ne bodo segali do nepropustne podlage (nepopolni vodnjaki), zato moramo koeficient β_1 zmanjšati s koeficientom α (58).

$$\alpha = \frac{1}{1 + 1,47 \cdot \lg \frac{1}{\sin \frac{\pi \cdot l}{2 \cdot T_1}}} \quad (58)$$

$$\Rightarrow \bar{\beta}_1 = \alpha \cdot \beta_1 \quad (59)$$

$$k = 0,0141 \text{ m/s}$$

$$2a = 100 \text{ m}$$

$$L = 100 \text{ m}$$

$$r = 0,25 \text{ m}$$

$$H = 50 \text{ m}$$

$$l = 30 \text{ m}$$

$$\bar{\beta}_1 = 0,099$$

$$Q_i = Q_z = 0,561 \frac{m^3}{s} = Q_{\max} \quad (60)$$

Upad gladine pri taki količini črpanja (60) je 4,7 m, kar je preveč. Paziti je potrebno tudi na hitrost vode v vodnjaku, katera ne sme preseči 1,5 m/s (Vuković, M., Soro, A., 1990). V tem primeru bi bila tudi hitrost prevelika.

Izberem upad gladine $s=2$ m. Izračunam pretok in hitrost vode v cevi.

$$Q = 0,241 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{\max}$$

$$v_c = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = 1,23 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (61)$$

Kontrola hitrosti je ustrezna. Zadovoljiti moramo še kriterij premera filtrskih cevi (62) po Aleksejevu (Vuković, M., Soro, A., 1990).

$$\begin{aligned} D_f &> 0,85 \cdot \sqrt{Q} \\ D_f &> 0,417 \\ 0,5 &> 0,417 \end{aligned} \quad (62)$$

Tudi ta kontrola je ustrezna. Nadaljujem z izračunom potrebnega števila vodnjakov:

$$n = \frac{Q_{\text{potr}}}{Q} = \frac{0,64 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,241 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 2,7 \quad (63)$$

Potrebujem vsaj 3 vodnjake. Zaradi varnosti izberem 4 vodnjake, s tem tudi zmanjšam potrebno izdatnost posameznega vodnjaka na 160 l/s, hitrost v cevi vodnjaka je potem 0,8 m/s. Vodo črpamo do vodarne Hrastje, kjer jo nadaljnje obdelamo (slika 35).

Dimenzioniranje cevovoda Roje-Hrastje

Prečrpati moramo pretok $Q = 640 \text{ l/s}$

Izberem premer cevi $d = 700 \text{ mm}$

$$n_g = 0,011$$

$$L = 1100 \text{ m}$$

$$R = \frac{d}{4} = 0,175 \quad (64)$$

$$c = \frac{1}{n_g} \cdot R^{\frac{1}{6}} = 67,99 \quad (65)$$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = 1,66 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (66)$$

$$I = \frac{v^2}{c^2 \cdot R} = 0,0034 = 3,4\text{‰} \quad (67)$$

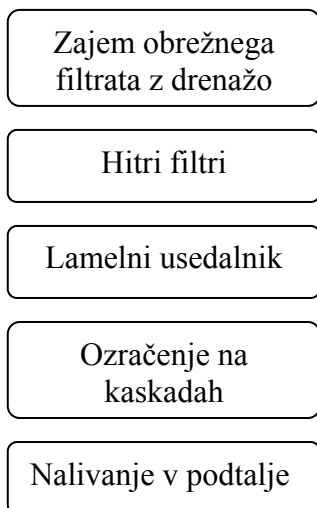
$$\Delta H_{lin} = I \cdot L = 3,7\text{m} \quad (68)$$

Izbira črpalke

Geodetska višina je cca 40 m (od kote črpanja do vodarne), linijske izgube so 3,7 m. Potrebna višina črpanja je 44 m. Na osnovi tega in želene količine črpanja $Q=640$ l/s izberem 4 črpalke naslednjih nazivnih (delovnih) karakteristik (priloga A2):

- $Q=160$ l/s
- črpalna višina $H=44$ m
- izkoristek $\eta = 0,79$
- potrebna moč za pogon $P_{gr}=84$ kW
- specifična poraba energije $E=0,16$ kWh/m³

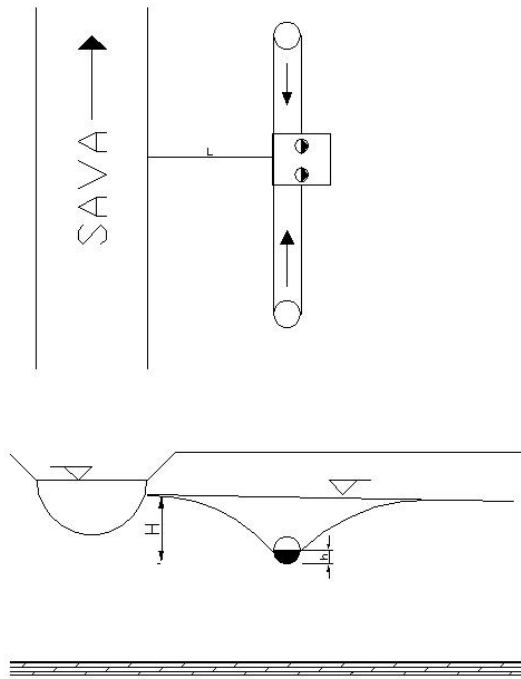
4.1.3 Zajem obrežnega filtrata z drenažo



Slika 37: Shema predpriprave vode za nalivanje.

Tudi tukaj zajamemo obrežni filtrat, glede kvalitete velja isto kot pri prejšnji točki, prav tako je nadaljnja priprava vode enaka (slika 37). Sledi izračun drenaže in izbor črpalke.

Obrežni filtrat se zajame s horizontalno drenažo, ki je položena vzporedno s strugo Save na oddaljenosti 100 m (slika 38). Ker drenaža poteka na istem območju kot bi bili vodnjaki je koeficient prepustnosti enak kot pri prejšnji točki. Dolžina drenaže je odvisna od potrebne količine vode. Drenaža zajame del obrežnega filtrata in zaledno vodo. Drenaža je iz dveh krakov, na sredini je jašek v katerem so črpalke za prečrpavanje vode do vodarne. Premer drenažne cevi je 0,7 m.

Hidravlični izračun

Slika 38: Zajem obrežnega filtrata z drenažo.

Dotok rečne vode:

$$H_1 = 5 \text{ m}$$

$$k = 0,014 \text{ m/s}$$

$$h = 0,7 \text{ m}$$

$$L = 100 \text{ m}$$

 $B = 1 \text{ m}$ – drenažo računam na tekoči meter

Dotok zaledne vode:

$$H_2 = 4,2 \text{ m}$$

$$k = 0,014 \text{ m/s}$$

$$h = 0,7 \text{ m}$$

$$L_r = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k} = 1240 \text{ m}$$

$$L = 100 \text{ m}$$

$$B = 1 \text{ m}$$

$$Q_{1i} = \frac{k \cdot B \cdot (H_1^2 - h^2)}{2 \cdot L} = 1,7 \text{ l/s}$$

$$Q_{2i} = \frac{k \cdot B \cdot (H_2^2 - h^2)}{2 \cdot L_r} = 0,1 \text{ l/s} \quad (70)$$

 Q_i ...dotok v drenažo na tekoči meter

$$Q_i = 1,8 \text{ l/s}$$

$$Q_{potr} = 640 \text{ l/s}$$

$$n = \frac{Q_{potr}}{Q_i} = 354 \quad (71)$$

Potrebna dolžina drenaže je 400 metrov.

Izberem dolžine in padce obeh krakov:

$$L_1 = 200 \text{ m}$$

$$I_1 = 0,006$$

$$L_2 = 200 \text{ m}$$

$$I_2 = 0,005$$

Zmogljivost drenaže

$$Q_{dr} = \frac{\sqrt{I}}{n_g} \cdot d^{\frac{8}{3}} \cdot a \quad (72)$$

$a = f\left(\frac{h}{d}\right) \Rightarrow$ odčitam v tabeli za določanje pretoka pri normalnem toku v cevi krožnega prereza

$n_g = 0,013$...Manningov koeficient

Zmogljivost drenaže računam po 100 metrskih odsekih. Drenaža prevaja pretok, če je $h_{pi} + \Delta h > h_{pi+1}$. V tem primeru ne pride do zajezbe.

h_{pi} ...višina polnitve cevi

Δh razlika višin zaradi naklona

Prvi krak drenaže

$$a_i = \frac{Q_{dr i}}{2302} \rightarrow a_i = f\left(\frac{h}{d}\right) \rightarrow h_{pi} \quad (73)$$

Drugi krak drenaže

$$a_i = \frac{Q_{dr i}}{2101} \rightarrow a_i = f\left(\frac{h}{d}\right) \rightarrow h_{pi} \quad (74)$$

Tabela 1: Preračun drenažnih krakov

krak	i	Q _{1i}	Q _{2i}	Q _{doi}	a _i	h _{pi} /d	h _{pi} [cm]	h _{pi} +Δh [cm]	h _{pi+1} >h _{pi}
1	1	171,57	9,66	181,23	0,0787	0,34	23,8	83,8	>
1	2	343,14	19,33	362,47	0,1575	0,5	35	95	
2	1	171,57	9,66	181,23	0,0863	0,36	25,2	75,2	>
2	2	343,14	19,33	362,47	0,1725	0,53	37,1	87,1	

Dimenzioniranje cevovoda Roje-Hrastje

Prečrpati moramo pretok $Q = 640 \text{ l/s}$

Izberem premer cevi $d = 700 \text{ mm}$

$$n_g = 0,011$$

$$L = 1100 \text{ m}$$

$$R = \frac{d}{4} = 0,175 \quad (75)$$

$$c = \frac{1}{n_g} \cdot R^{\frac{1}{6}} = 67,99 \quad (76)$$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = 1,66 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (77)$$

$$I = \frac{v^2}{c^2 \cdot R} = 0,0034 = 3,4\% \quad (78)$$

$$\Delta H_{in} = I \cdot L = 3,7 \text{ m} \quad (79)$$

Izbira črpalke

Geodetska višina je cca 19 m (od kote črpanja do vodarne), linijske izgube so 3,7 m. Potrebna višina črpanja je 23 m. Na osnovi tega in želene količine črpanja $Q=640 \text{ l/s}$ izberem 3 črpalke naslednjih nazivnih (delovnih) karakteristik (priloga A3):

- $Q=215 \text{ l/s}$
- črpalna višina $H= 23 \text{ m}$
- izkoristek $\eta = 0,79$
- potrebna moč za pogon $P_{gr} = 63 \text{ kW}$
- specifična poraba energije $E=0,088 \text{ kWh/m}^3$

4.2 Nalivalni vodnjaki

Vodo nalivamo cca 30 metrov v globino. Pri obratovanju se lahko pojavijo določene težave. Vodnjak se lahko zamaši, če voda vsebuje suspendirane snovi ali hranila (v tem primeru vodnjak zarastejo alge). Težave lahko povzročijo tudi zračni mehurčki v vodi, ki zmanjšajo hidravlično prevodnost in zato jih je potrebno pred nalivanjem odstraniti (Fowler, L. C., 1996). Detajl nalivalnega vodnjaka je prikazan v Asano, T., 1985.

Postavitev nalivalnih vodnjakov v prostor je zelo pomembna. Ugotoviti moramo lokacijo in število potrebnih nalivalnih vodnjakov, da kar najbolje zaščitimo črpalne vodnjake. Ob tem je treba paziti tudi na razmerje med nalivano in črpano vodo, ki mora biti čim manjše.

Za črpanje sem uporabil iste vodnjake kot pri scenariju brez nalivanja, torej 9 vodnjakov s skupno zmogljivostjo 540 l/s. Količine nalivanja v vodnjake in njihove lokacije sem določil s poskušanjem, s pomočjo modula za sledenje delcev. Cilj je bil poiskati najprimernejše lokacije nalivalnih vodnjakov in določiti čim manjše količine nalivanja ob pogoju, da bo v črpalne vodnjake prišlo minimalno število delcev. To je bilo zelo zamudno, saj izračun posamezne tokovne slike za obdobje enega leta traja cca 7 ur, nadaljnja ura pa je potrebna za izračun modula sledenja delcev.

V svoji rešitvi sem za nalivalne vodnjake uporabil obstoječe vodnjake MV-1, MV-2, MV-3 in vodnjak Hrastje 5. Dodal pa sem še 6 novih (od B-1 do B-6), njihove lokacije so vidne na sliki 39 in v situaciji (priloga C) . Količine črpanja in nalivanja pa so razvidne v spodnji tabeli.

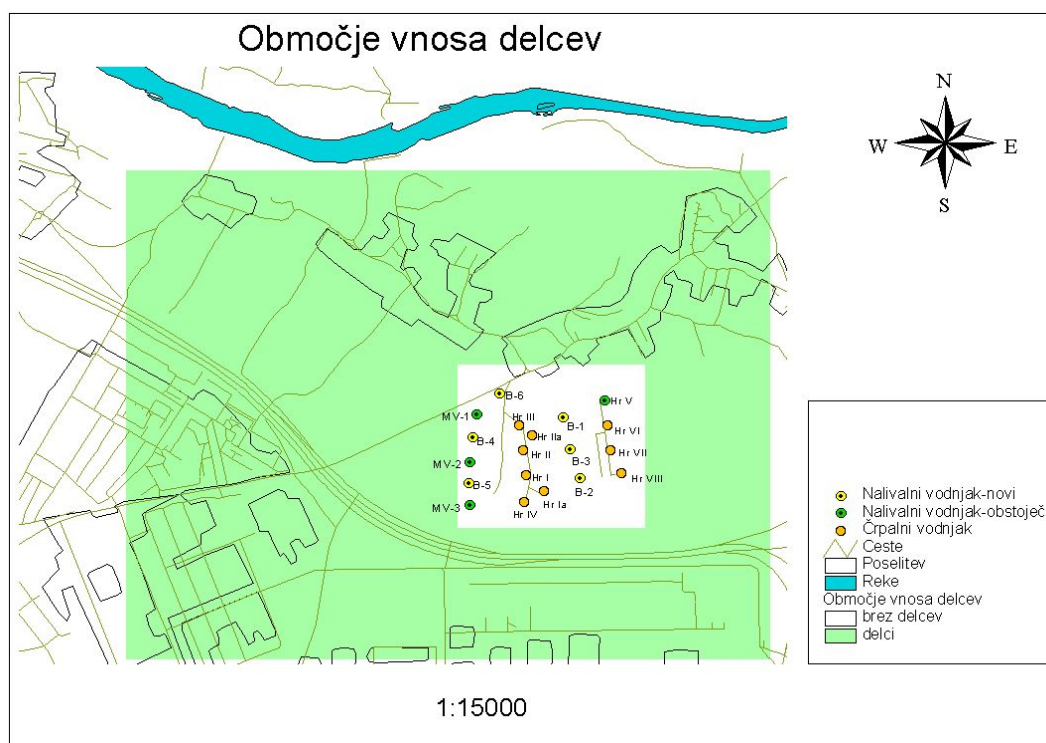
Tabela 2: Količine črpanja in nalivanja.

Ime	črpanje [l/s]	nalivanje [l/s]
Filtrat 1	160	
Filtrat 2	160	
Filtrat 3	160	
Filtrat 4	160	

Nadaljevanje tabele 2.

Ime	črpanje [l/s]	nalivanje [l/s]
B1		50
B2		50
B3		70
MV-1		80
MV-2		80
MV-3		50
B-4		80
B-5		60
B-6		60
I	60	
Ia	60	
II	60	
IIa	60	
III	60	
IV	60	
V		60
VI	60	
VII	60	
VIII	60	

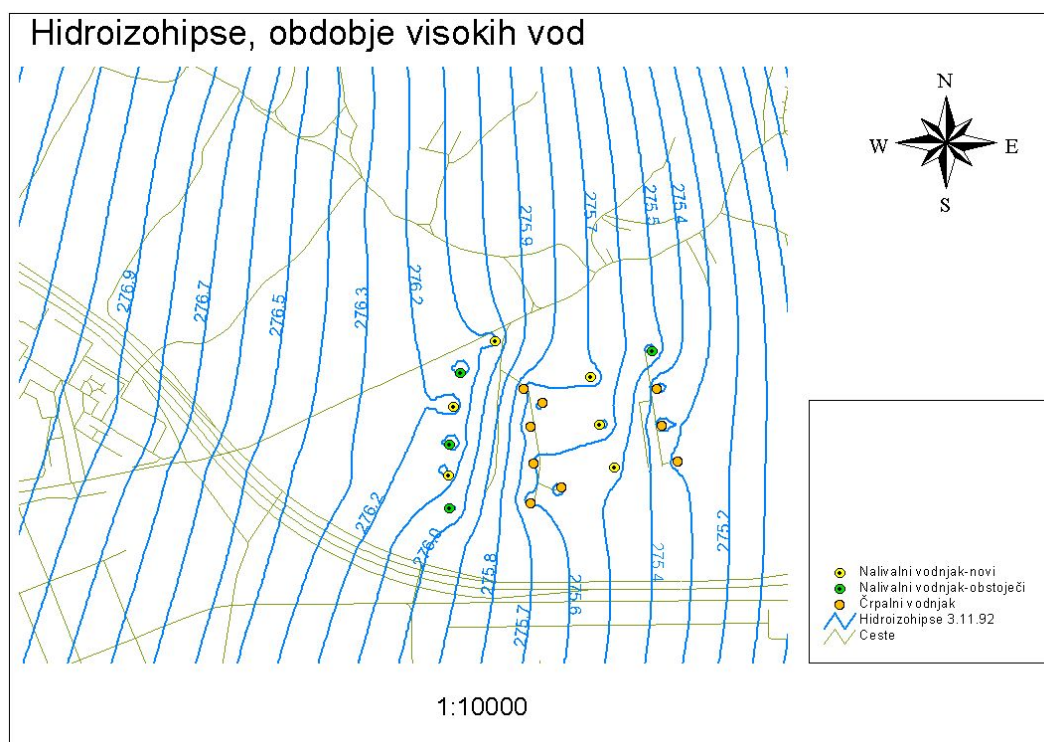
540 640
 izguba 100 l/s 15,6 %



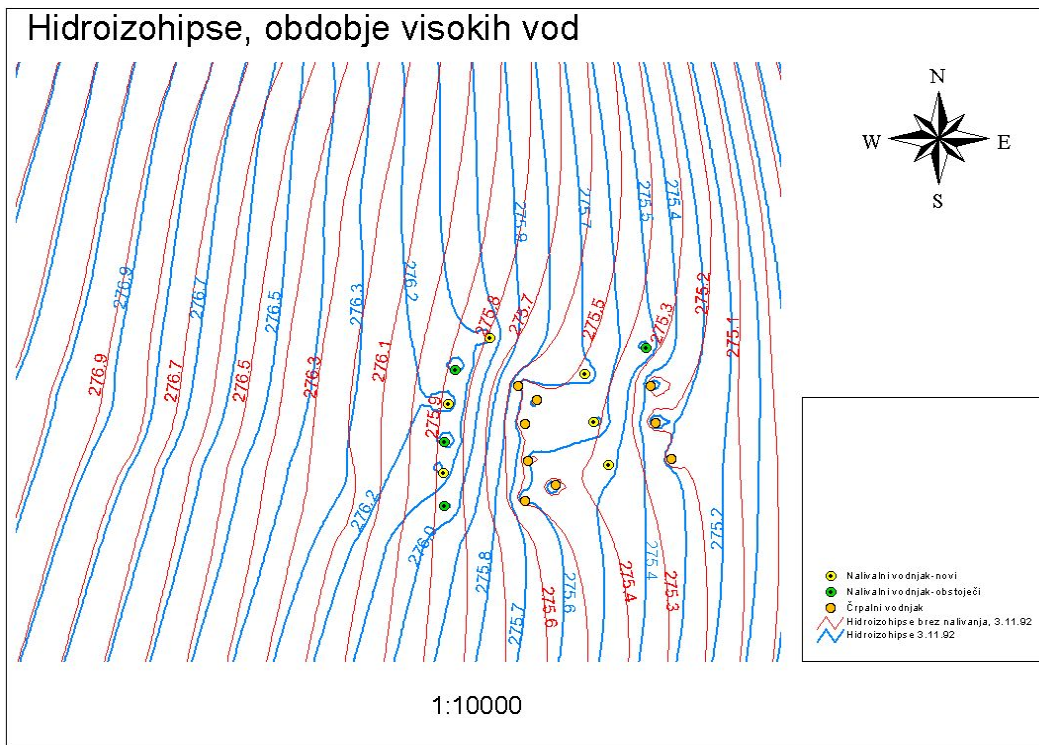
Slika 39: Lokacije uporabljenih nalivalnih in črpalnih vodnjakov ter območje vnosa delcev.

4.2.1 Rezultati simulacije z umetnim bogatenjem

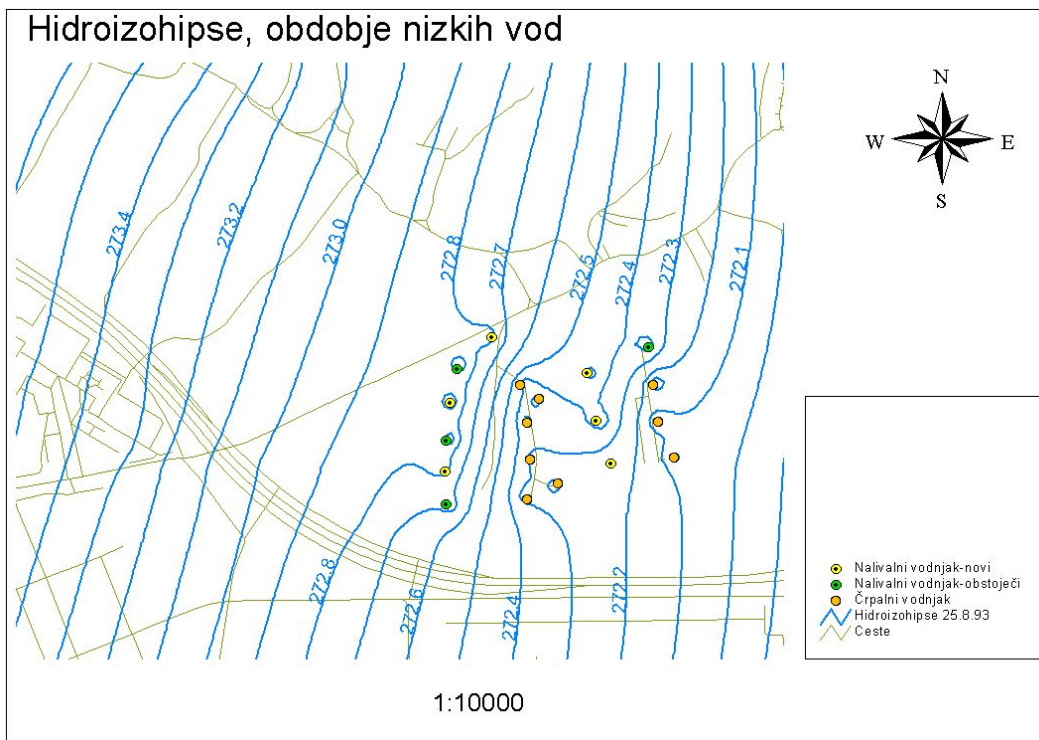
Z nalivanjem vode v podtalje dvignemo gladino podtalnice na območju vodarne za cca 0,3m in na njenem ožjem območju za cca 0,1 m (sliki 41 in 43). S tem dosežemo lokalno spremembo smeri toka naravne podtalnice, kar je razvidno iz poteka hidroizohips (sliki 40 in 42). Na ta način ustvarimo tako imenovano »vodno zaveso«. Območje vpliva nalivanja, torej dvig gladine je enako v obeh obdobjih (sliki 44 in 45). Iz prikaza hitrosti v smeri x (sliki 46 in 47) je razvidno, da voda, ki jo nalivamo v prvo serijo nalivalnih vodnjakov ustvari vodno zaveso na zahodni strani. Med prvima linijama nalivalnih in črpalnih vodnjakov pa se povečajo hitrosti vode na cca 60 m/dan (sliki 46 in 47). V času nizkih vod ima vpliv na prvo linijo črpalnih vodnjakov tudi druga linija nalivalnih (B1, B2, B3), v času visokih vod pa je viden vpliv le na črpalne vodnjake III, IIa, II (sliki 46 in 47). Nalivalni vodnjak B2 v času nizkih voda uspešno odriva vodo z južne strani in s tem zmanjša vplivno območje vodnjakov IV, Ia in VIII (slika 49). Severno stran vodarne v obeh obdobjih uspešno ščitijo nalivalni vodnjaki MV1, B6, B1 in V (sliki 48 in 49).



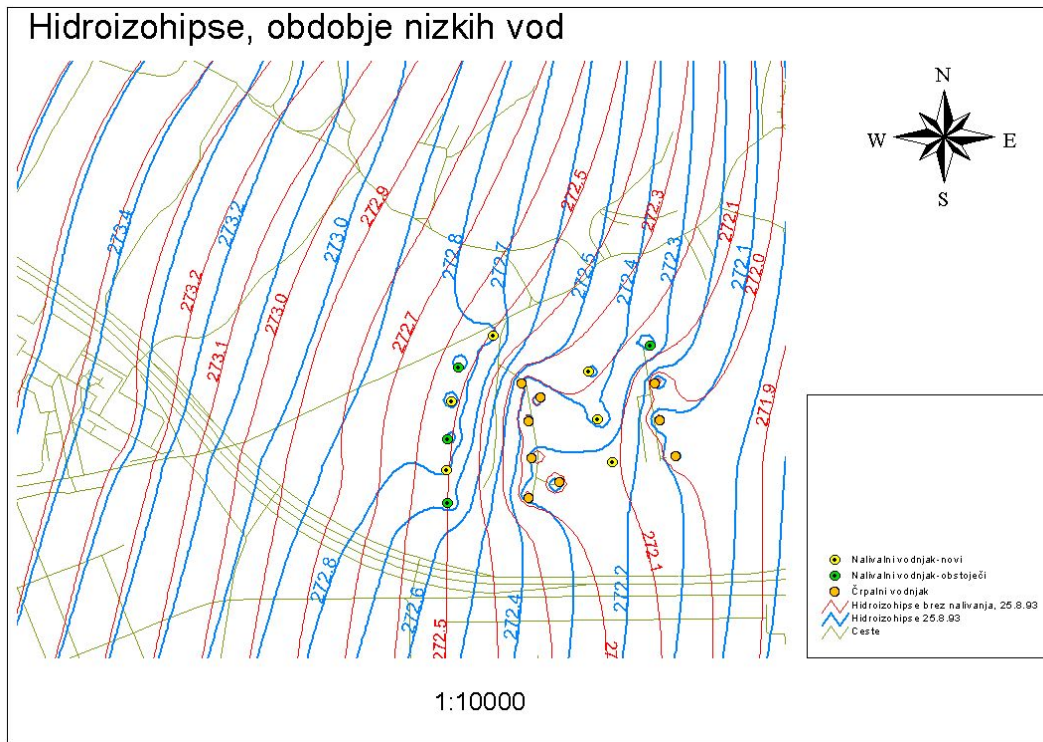
Slika 40: Hidroizohipse v obdobju visokih voda, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.



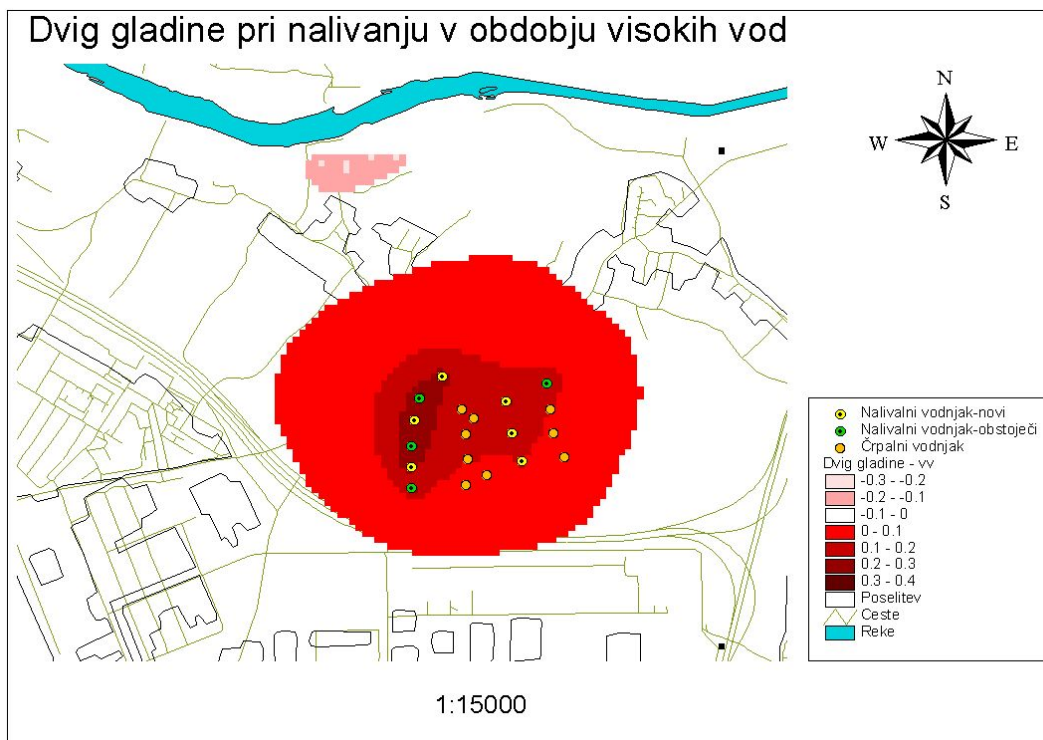
Slika 41: Primerjava hidroizohips v obdobju visokih voda z nalivanjem in brez.



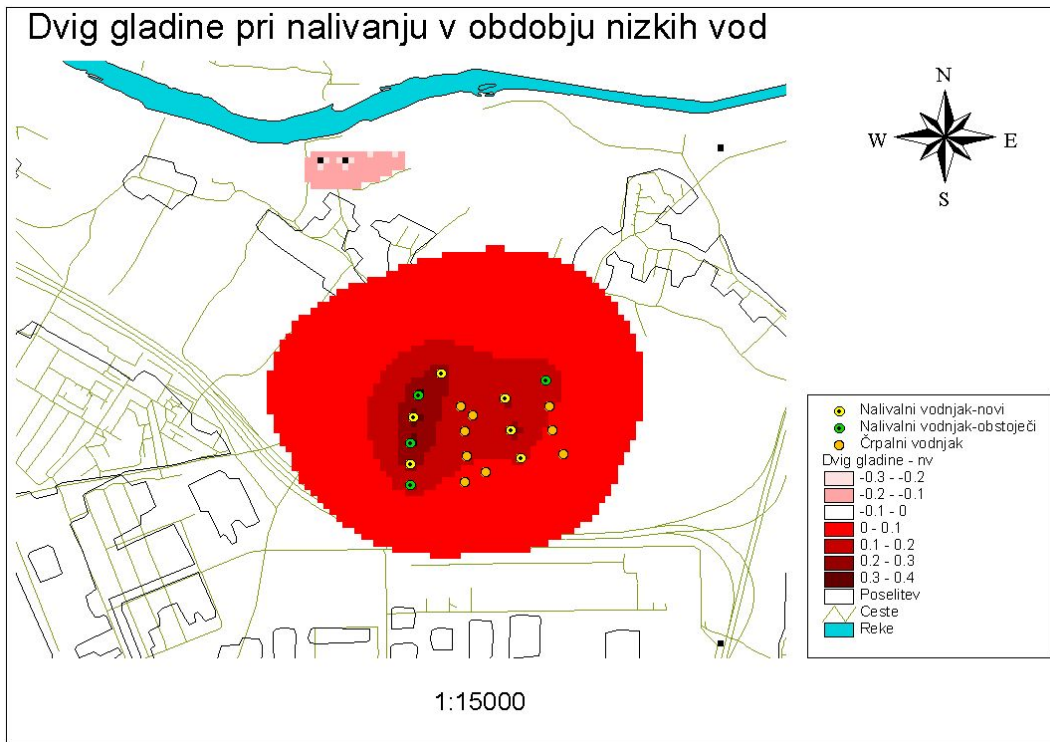
Slika 42: Hidroizohipse v obdobju nizkih voda, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.



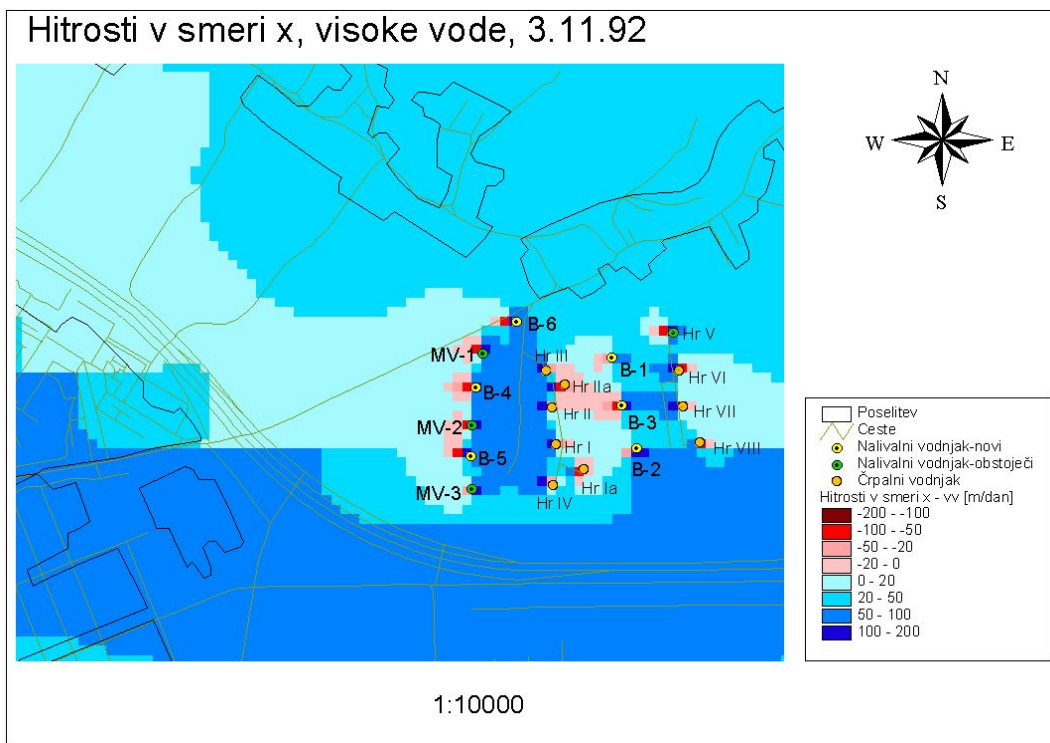
Slika 43: Primerjava hidroizohips v obdobju nizkih voda z nalivanjem in brez.



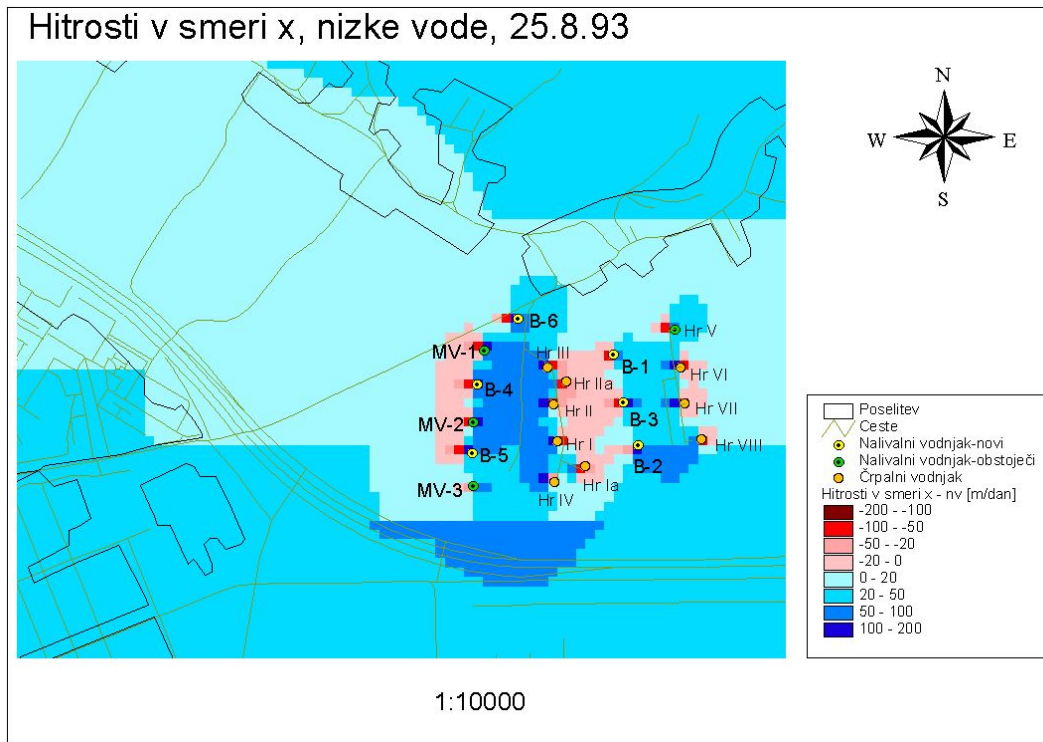
Slika 44: Območje vpliva nalivanja na gladino podtalnice v obdobju visokih vod.



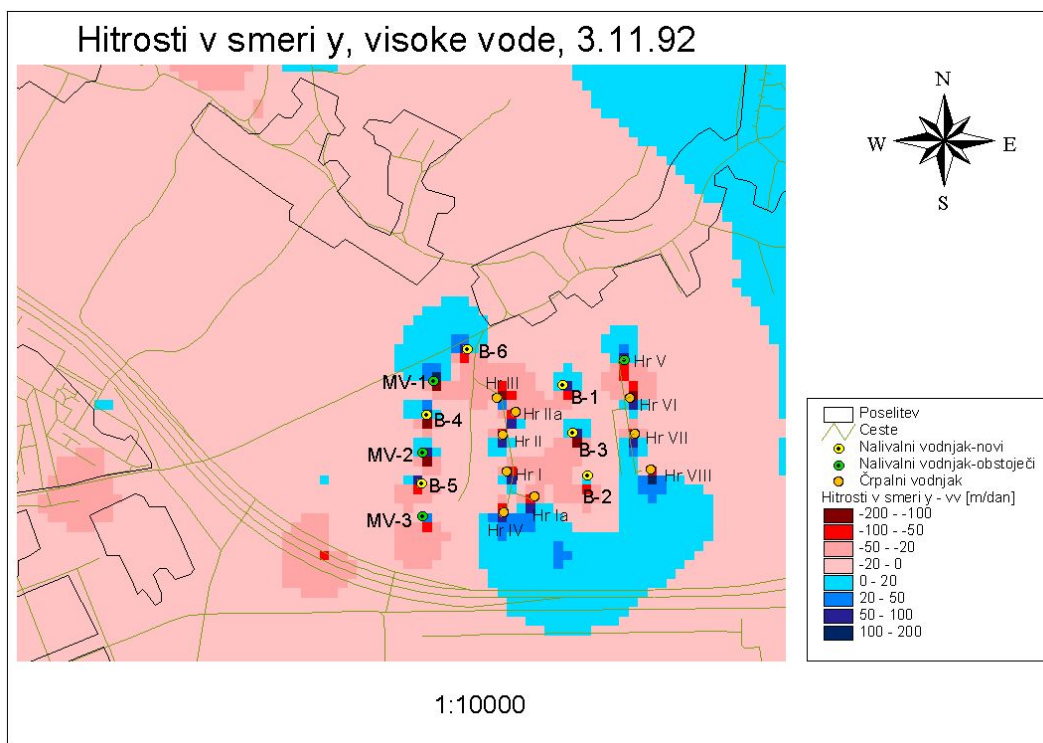
Slika 45: Območje vpliva nalivanja na gladino podtalnice v obdobju nizkih vod.



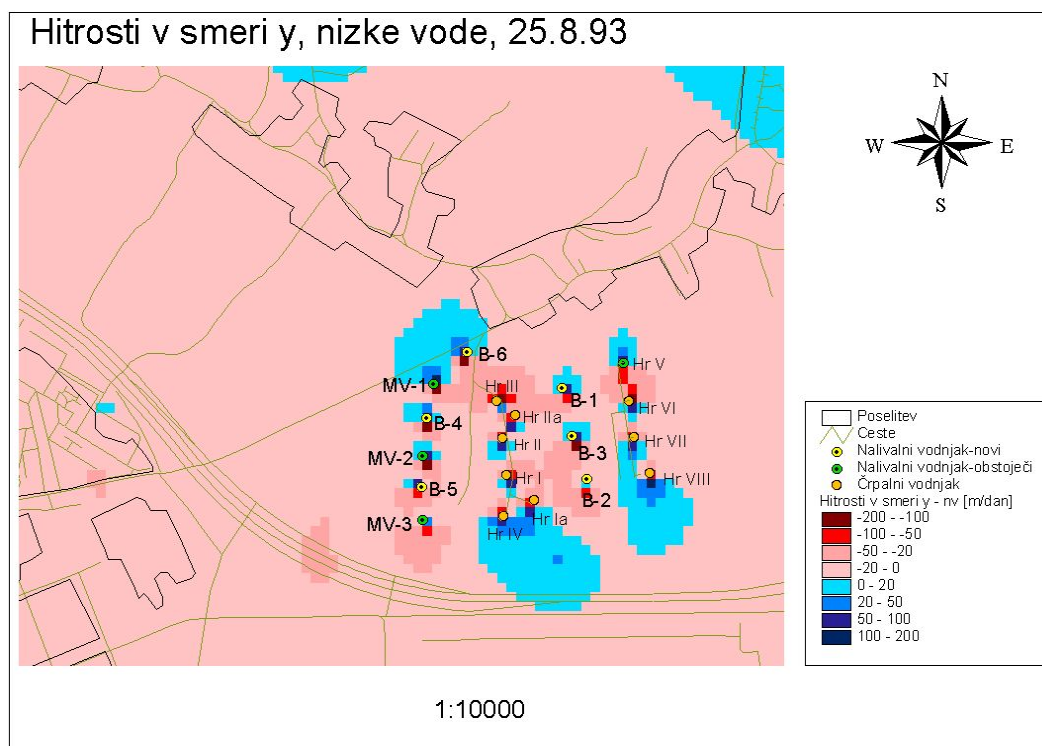
Slika 46: Hitrosti v smeri x v obdobju visokih vod, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.



Slika 47: Hitrosti v smeri x v obdobju nizkih vod, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.

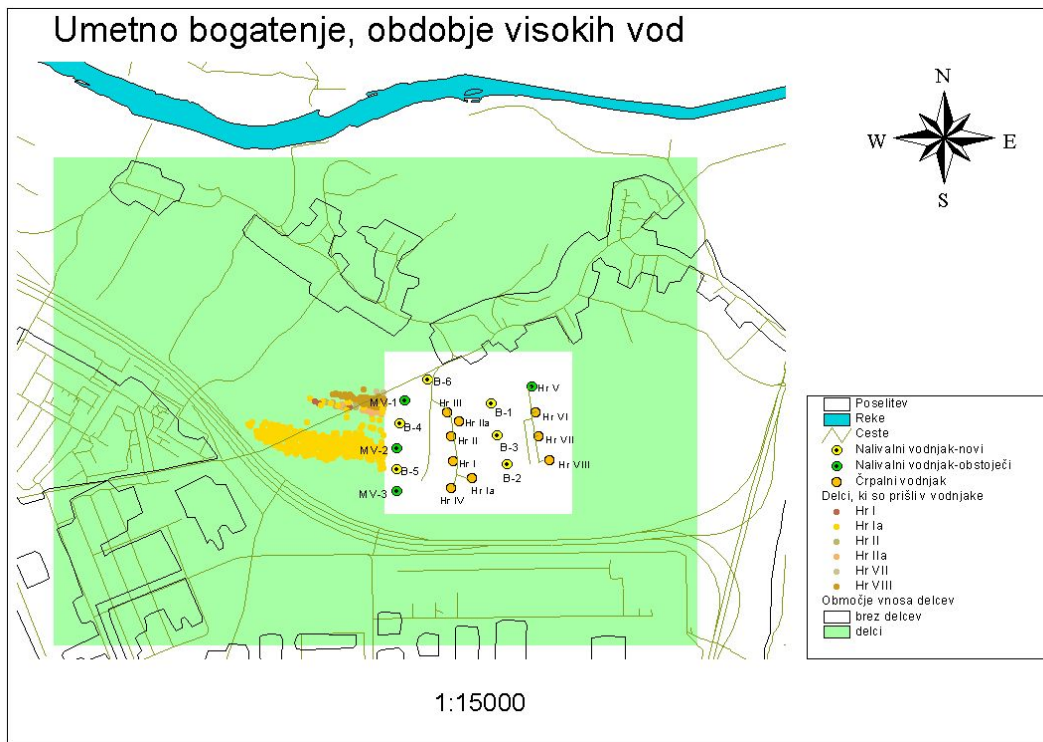


Slika 48: Hitrosti v smeri y v obdobju visokih vod, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.

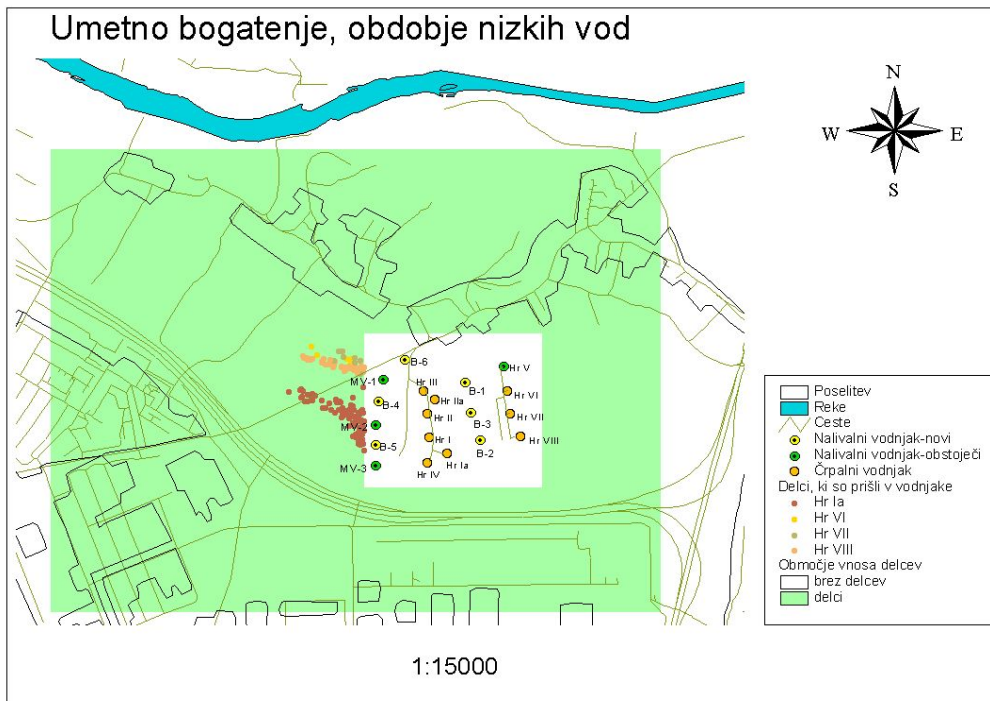


Slika 49: Hitrosti v smeri y v obdobju nizkih vod, pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.

Učinkovitost »vodne zavese« je lepo vidna pri rezultatih sledenja delcev (sliki 48 in 49). V vse vodnjake je prišlo znatno manj delcev, v nekatere celo nobeden. Močno izstopata le vodnjaka Ia in VIII, ki sta na južni strani vodarne (Tabela 3). Kljub temu pa je skupno število delcev znatno nižje, kot če ne bi nalivali.



Slika 50: Začetne lokacije delcev, ki so prišli v črpalne vodnjake v obdobju visokih vod pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.

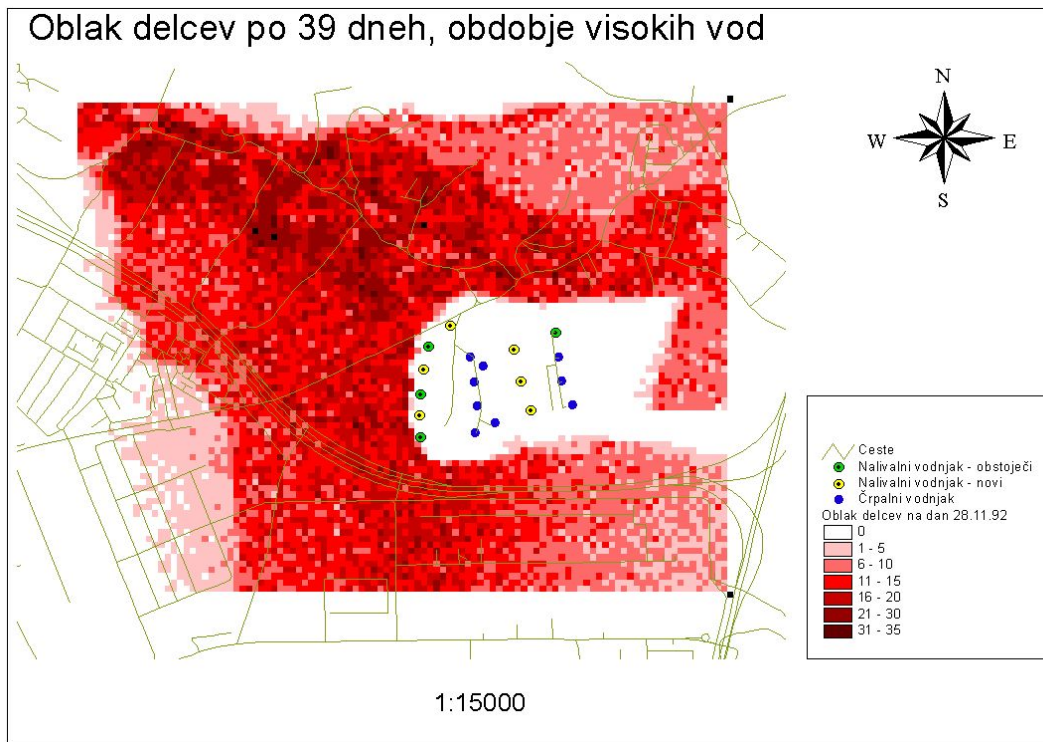


Slika 51: Začetne lokacije delcev, ki so prišli v črpalne vodnjake v obdobju nizkih vod pri nalivanju 640 l/s in črpanju 540 l/s.

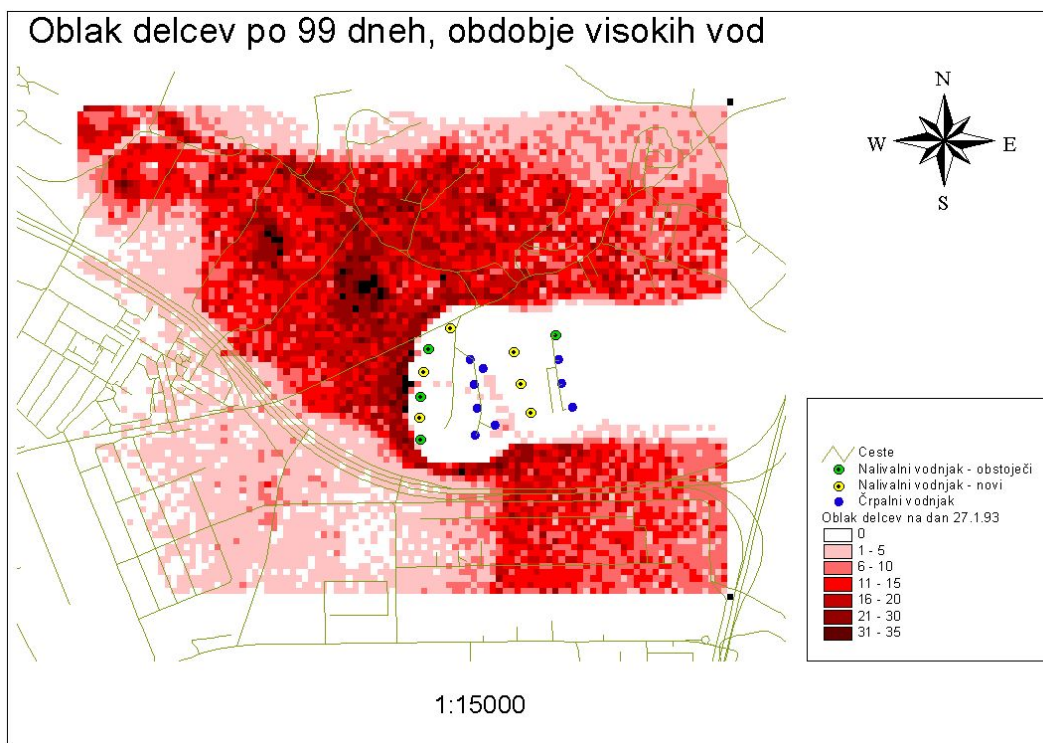
Tabela 3: Učinkovitost bogatenja kot zaščite pred potencialnim onesnaženjem.

vodnjak	Število delcev, ki so prišli v vodnjak			
	Visoke vode		Nizke vode	
	Brez bogatenja	Z bogatenjem	Brez bogatenja	Z bogatenjem
Hrastje I	1781	3	2000	0
Hrastje Ia	1022	382	1102	91
Hrastje II	2627	10	2756	0
Hrastje IIa	1700	28	1616	0
Hrastje III	1351	0	1351	0
Hrastje IV	1799	0	2140	0
Hrastje VI	1356	0	1660	6
Hrastje VII	109	3	119	8
Hrastje VIII	874	71	839	42
vsota	12619	497	13583	147

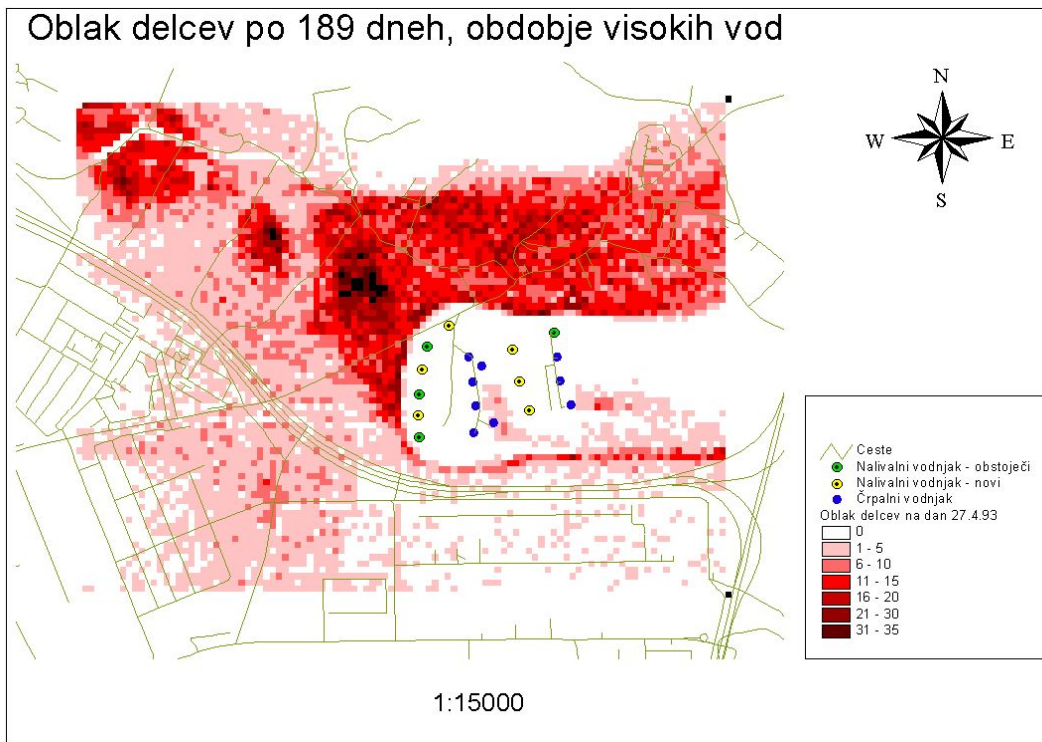
Pri potovanju oblaka onesnaženja v obdobju visokih vod sistem nalivalnih vodnjakov odrine večino delcev. Čez prvo linijo nalivalnih vodnjakov pride le nekaj delcev med vodnjakoma MV-2 in B5 (slika 53), medtem ko jih največ pride na območje vodarne z južne strani, v vodnjak Ia in VIII. Vendar se to zgodi šele kasneje, ko je pravega obdobja visokih vod že konec (slika 54). To velja tudi za delce, ki pridejo v vodnjak VIII z vzhodne strani. V obdobju nizkih vod uspe prva linija vodnjakov zadržati vse delce (slike 55-58). V vodnjak Ia zopet pridejo delci z južne strani (slika 56). Nekaj pa jih pride v zadnjo linijo črpalnih vodnjakov z vzhodne strani (sliki 57 in 58). V obeh obdobjih je opazno območje velikih hitrosti pretakanja podtalnice na jugu, kjer delce hitro odnaša naprej.



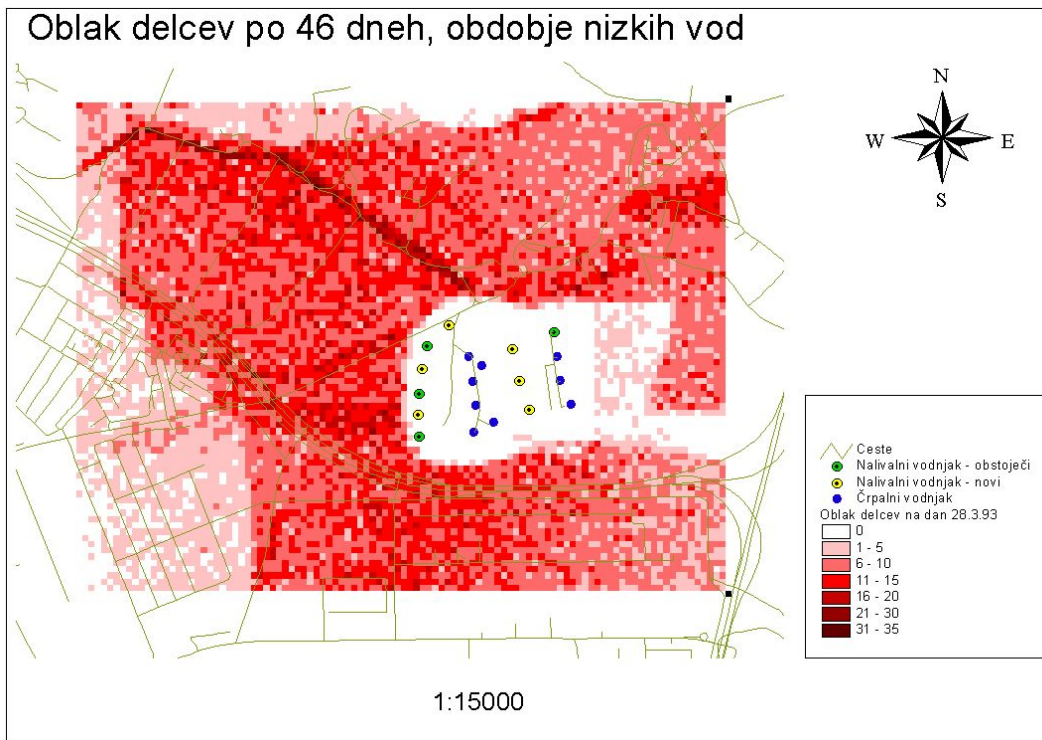
Slika 52: Oblak onesnaženja 39 dni od začetka simulacije, visoke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.



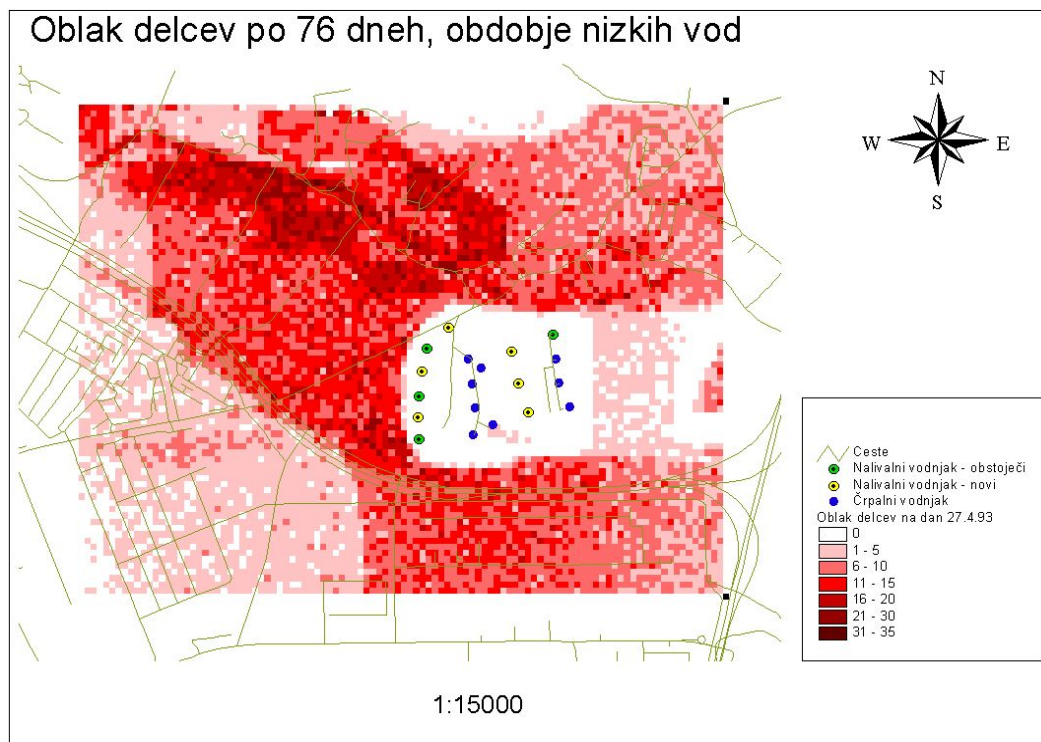
Slika 53: Oblak onesnaženja 99 dni od začetka simulacije, visoke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.



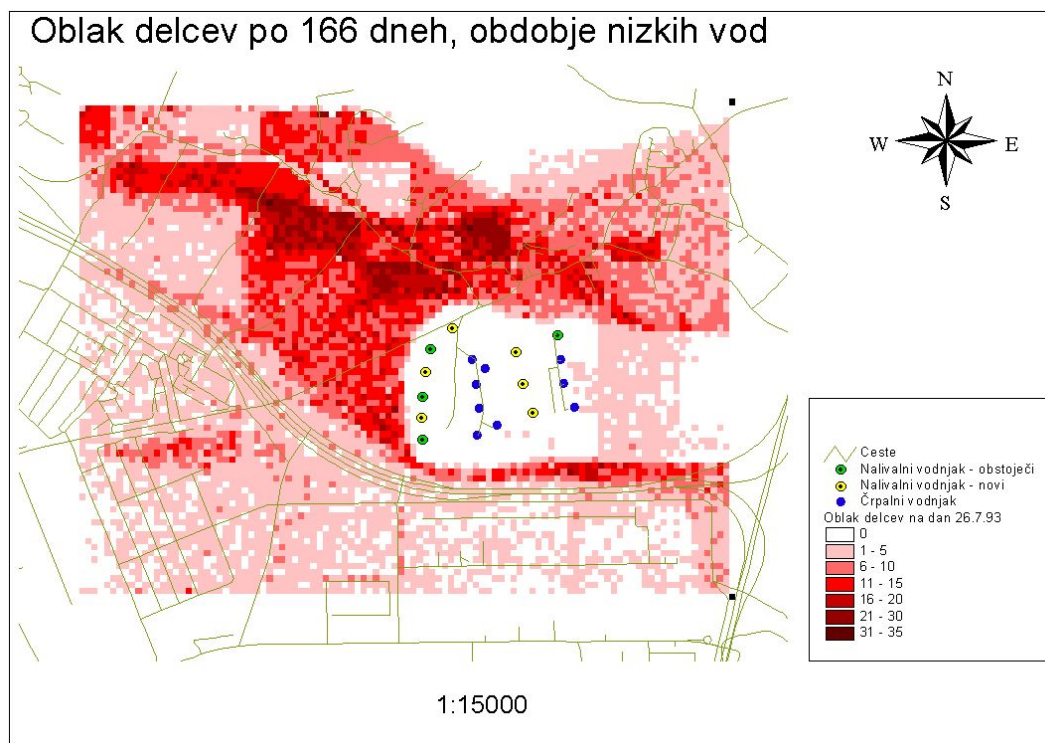
Slika 54: Oblak onesnaženja 189 dni od začetka simulacije, visoke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.



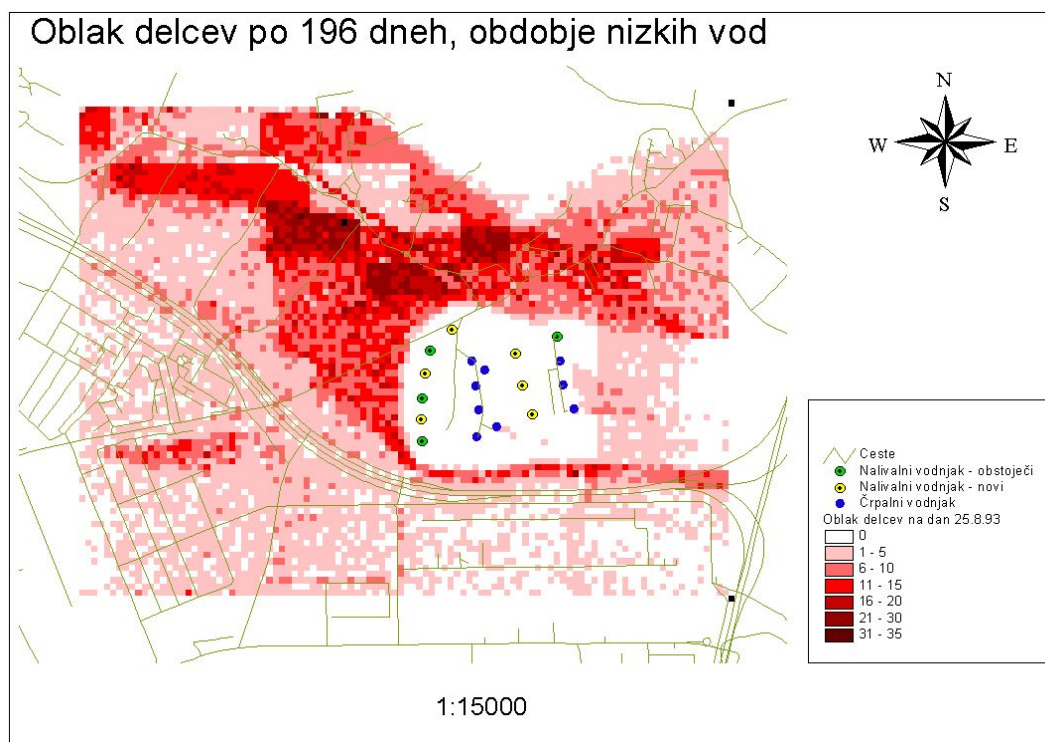
Slika 55: Oblak onesnaženja 46 dni od začetka simulacije, nizke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.



Slika 56: Oblak onesnaženja 76 dni od začetka simulacije, nizke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.



Slika 57: Oblak onesnaženja 166 dni od začetka simulacije, nizke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.



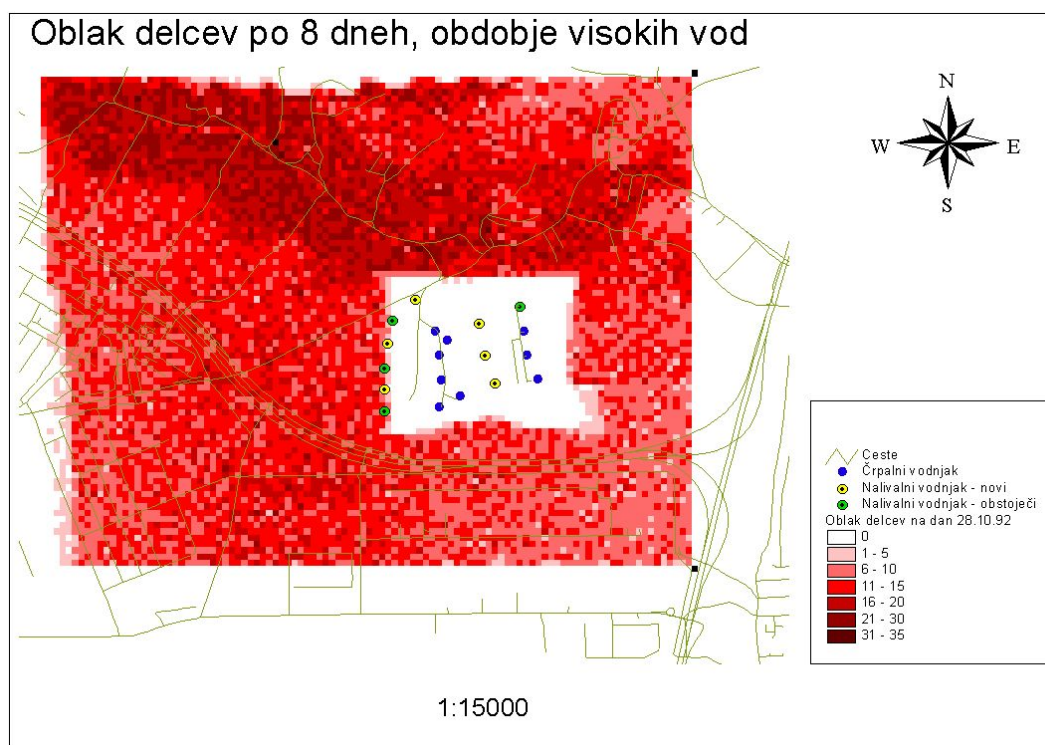
Slika 58: Oblak onesnaženja 196 dni od začetka simulacije, nizke vode, nalivanje 640 l/s, črpanje 540 l/s.

Glede na dobljene rezultate lahko zaključimo, da smo z umetnim bogatenjem zaščitili vodarno pred onesnaženjem. Seveda pa se postavi vprašanje, kaj se zgodi, če z bogatenjem prenehamo? Do tega bi lahko prišlo, če bi bila voda za bogatenje onesnažena ali pa v primeru okvare črpalk za zajem vode za bogatenje oziroma pri izpadu električne energije.

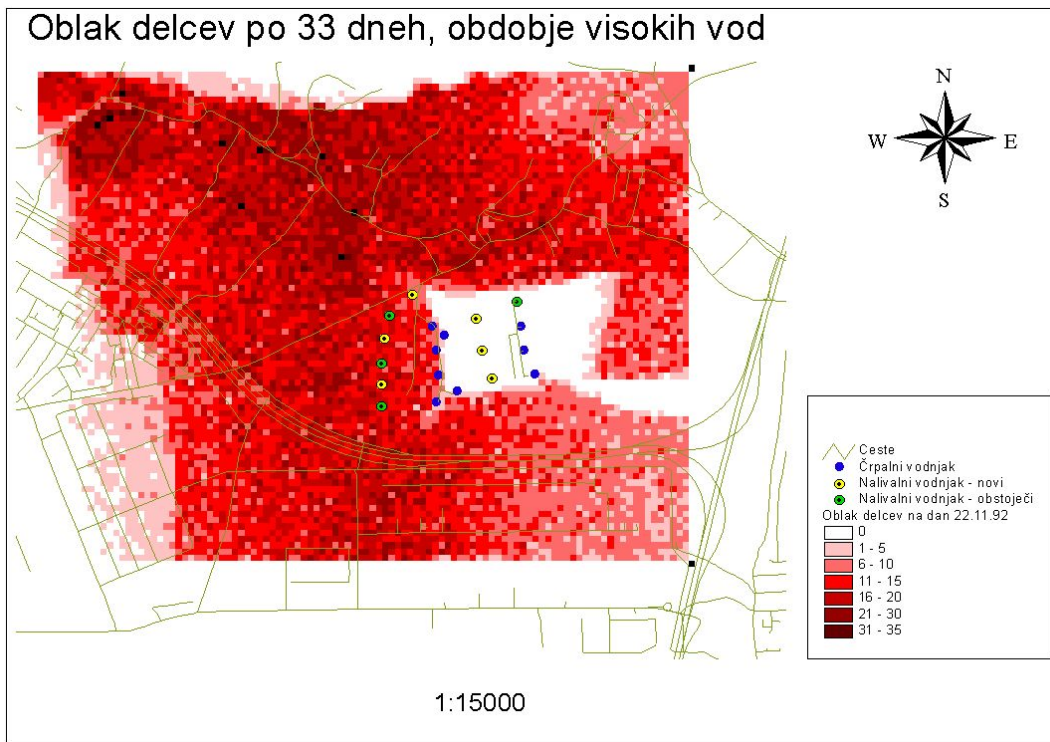
Tudi to možnost sem preizkusil z modulom za sledenje delcev. V času visokih vod sem z nalivanjem prenehal 20.10.92. Na ta dan sem v model vstavil tudi delce in nato spremljal premikanje oblaka onesnaženja. Po 8-ih dneh so delci prišli do prve linije nalivalnih vodnjakov (slika 59), do prve linije črpalnih pa so delci prišli po 33-ih dneh od prenehanja nalivanja (slika 60). V času nizkih vod je bil čas potovanja delcev pričakovano nekaj dni krajši, ker so hitrosti pretakanja manjše. Z nalivanjem sem prenehal 10.2.93 in vstavil delce. Do prve linije nalivalnih vodnjakov so delci prišli po 11-ih dneh (slika 61), do prve linije črpalnih pa po 36 dneh (slika 62).

Torej imamo v skrajnem primeru, če je onesnaženje na dan prenehanja z nalivanjem oddaljeno od nalivalnih vodnjakov cca 50 metrov, dober teden dni časa, da zopet začnemo z nalivanjem, ob tem pa vodarna nemoteno obratuje.

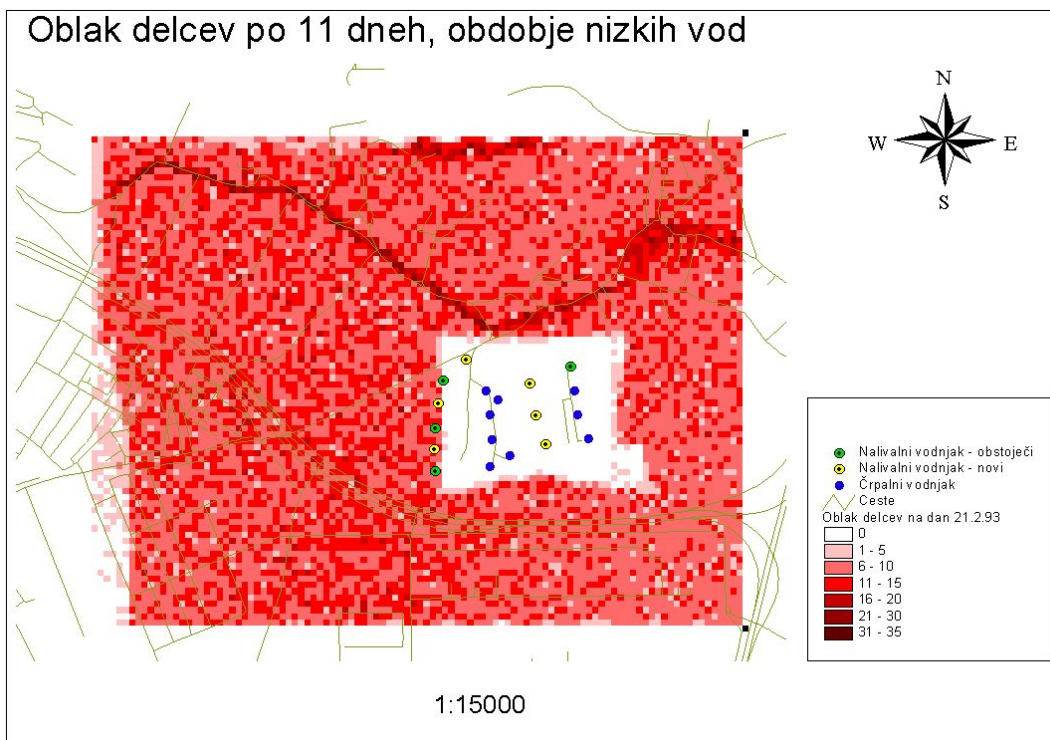
Ker vodo za bogatenje zajemamo direktno ali pa posredno (obrežni filtrat) iz Save, je zanesljivost zaščite z bogatenjem odvisna le od trenutnega onesnaženja Save. Po drugi strani pa je tudi celotni vodonosnik Ljubljanskega polja v veliki meri odvisen od kakovosti savske vode (Slika 63), poleg tega pa še od mestnih dejavnosti. Če onesnaženje pride po Savi, gre hitro naprej in nato lahko zopet začnemo s črpanjem. Tudi čez obrežni filtrat gre onesnaženje hitro mimo in potem lahko začnemo s črpanjem in nalivanjem ter tako spet zaščitimo vodarno pred prihajajočim onesnaženjem.



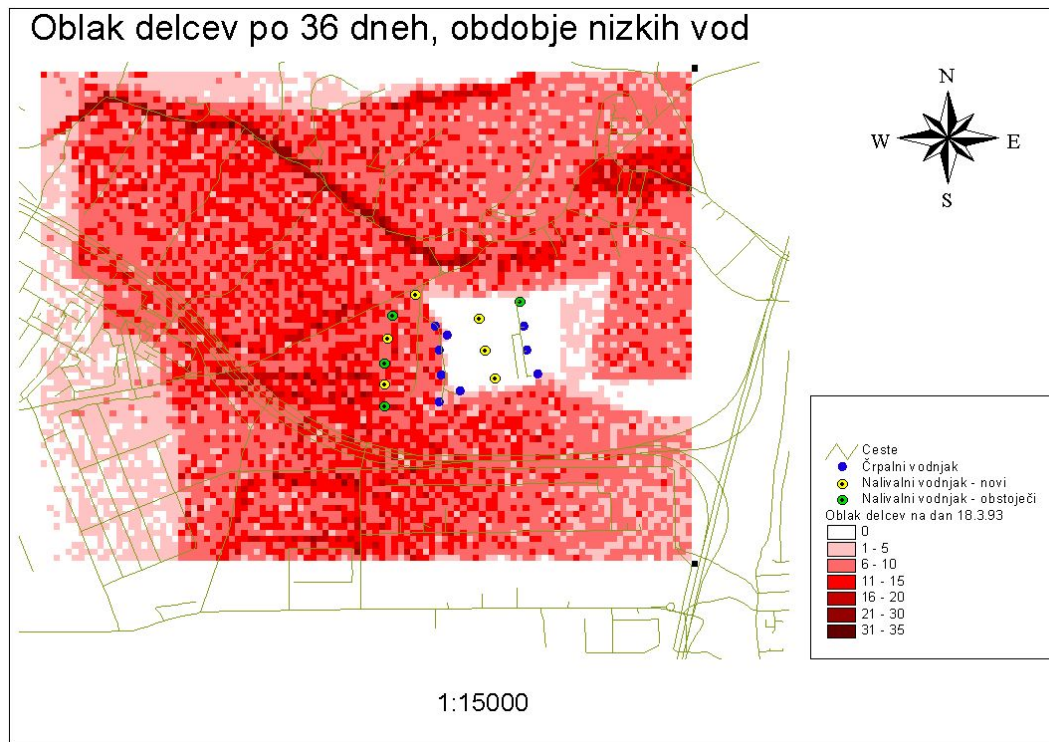
Slika 59: Oblak onesnaženja po 8 dneh po prenehanju nalivanja, obdobje visokih vod.



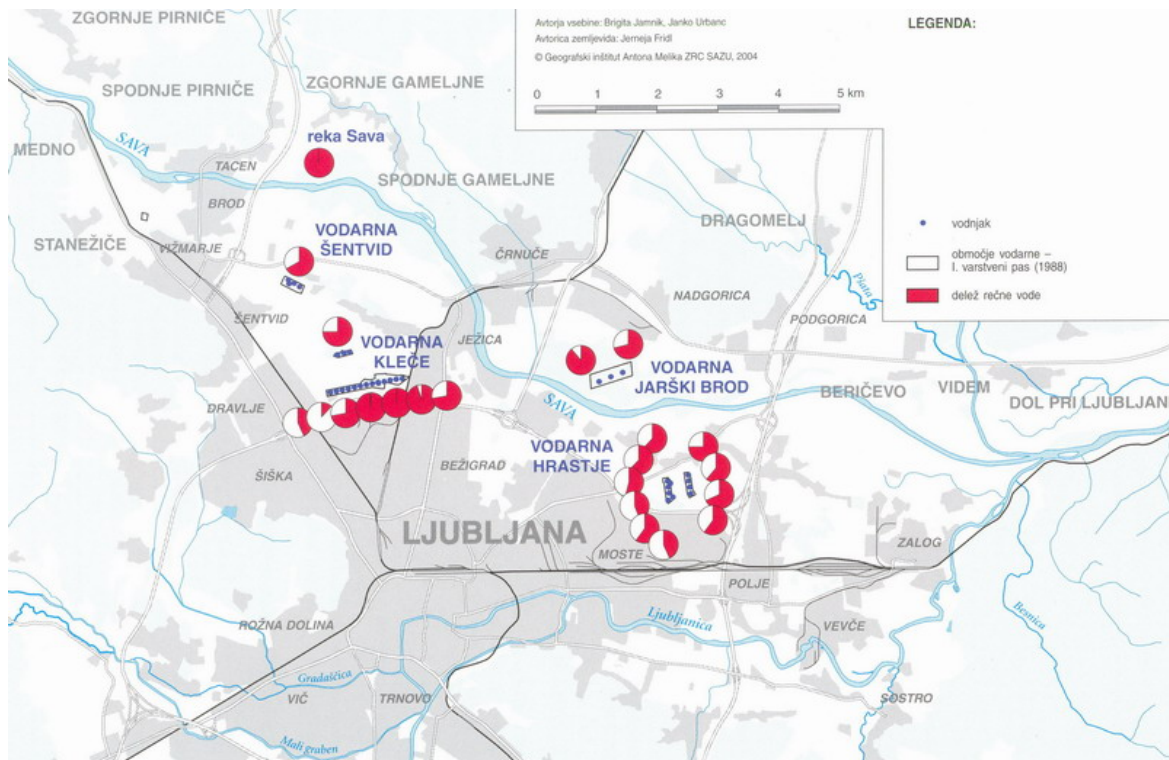
Slika 60: Oblak onesnaženja po 33 dneh po prenehanju nalivanja, obdobje visokih vod.



Slika 61: Oblak onesnaženja po 11 dneh po prenehanju nalivanja, obdobje nizkih vod.



Slika 62: Oblak onesnaženja po 36 dneh po prenehanju nalivanja, obdobje nizkih vod.



Slika 63: Deleži savske vode v opazovanih vodnjakih na podlagi izotopske sestave kisika v vodi (Auersperger, P., et al, 2005).

5 OCENA STROŠKOV OBRATOVANJA

Stroški so izračunani iz porabe električne energije in potrebnih sredstev za pripravo vode. Preračunani so iz enourne količine načrpane vode in izraženi v SIT/m³. Narejena je primerjava stroškov med današnjim črpanjem in črpanjem z bogatenjem. Vodo za pranje filtrov sem zanemaril. Za črpalke v vodarni je vzeta specifična poraba energije obstoječe črpalke v vodarni. V izračunu ni upoštevan strošek za uporabo omrežja.

Podatki:

- cena 1 tone koagulanta: 85680 SIT
- cena 1 kWh električne energije v času male tarife: 8,42 SIT
- cena 1 kWh električne energije v času velike tarife: 15,93 SIT
- cena 1kg aktivnega oglja: 1800 SIT

Količina načrpane vode za bogatenje v eni uri: 640 l/s = 2304 m³/h

Količina načrpane vode v vodarni v eni uri: 540 l/s = 1890 m³/h

Specifična poraba električne energije:

- Črpalke za zajem obrežnega filtrata E=0,16 kWh/m³
- Črpalke za črpanje iz drenaže E=0,088 kWh/m³
- Črpalke za zajem Save E=0,07 kWh/m³
- Motorji koagulacije E=0,056 kWh/m³
- Motorji flokulacije E=0,0009 kWh/m³
- Črpalni vodnjaki (obstoječi) E=0,25 kWh/m³

Količina potrebnega koagulanta

$$640 \text{ l/s} \cdot 48 \text{ mg/l} = 640 \cdot 3600 \text{ l/h} \cdot 48 \cdot 10^{-6} \text{ kg/l} = 110,6 \text{ kg/h} \quad (80)$$

Strošek koagulanta

$$110,6 \text{ kg/h} \cdot 85,68 \text{ SIT/kg} = 9476 \text{ SIT/h} \quad (81)$$

$$\frac{9476 \text{ SIT/h}}{2304 \text{ m}^3/\text{h}} = 4,11 \text{ SIT/m}^3$$

Poraba aktivnega oglja (82).

$$\text{CUR} = 0,0033 \text{ g GAC} / \text{l vode} = 0,0033 \text{ kg GAC} / \text{m}^3 \text{ vode}$$

$$0,0033 \text{ kg GAC/m}^3 \text{ vode} \cdot 2304 \text{ m}^3/\text{h} = 7,6 \text{ kg GAC/h} \quad (82)$$

Strošek aktivnega oglja (83).

$$7,6 \text{ kg GAC/h} \cdot 1800 \text{ SIT/kg GAC} = 13680 \text{ SIT/h} \quad (83)$$

Tabela 4: Strošek električne energije.

	Spec. poraba	Črpanje	Strošek MT	Strošek VT
Porabnik	[kWh/m ³]	m ³ /h	SIT/h	SIT/h
črpalka filtrat	0,16	2304	3103,95	5872,44
črpalka drenaža	0,088	2304	1707,17	3229,84
črpalka za zajem Save	0,07	2304	1357,98	2569,19
motorji koagulacije	0,056	2304	1086,38	2055,35
motorji flokulacije	0,0009	2304	17,46	33,03
črpalka v vodarni	0,25	1980	4167,90	7885,35

Tabela 5: Skupni stroški načrpane vode v vodarni.

Od predlaganih rešitev je strošek načrpanega m^3 vode najnižji pri zajemu obrežnega filtrata z drenažo. Do razlike med zajemom obrežnega filtrata z drenažo ali z vodnjaki pride zaradi različne specifične porabe črpalk. Dejanska izvedba zajema filtrata z drenažo pa bi bila zelo zahtevna zaradi obsežnih zemeljskih del, ki bi bila potrebna za položitev drenaže. Posledično bi bila cena izvedbe predvidoma dražja od izgradnje vodnjakov.

Strošek predpriprave vode za nalivanje močno odstopa navzgor pri direktnem zajemu vode iz Save, ker so uporabljeni še potrebni postopki čiščenja (koagulacija s flokulacijo, aktivno oglje).

Strošek načrpanega m^3 vode je pri vseh predlaganih ukrepih seveda višji kot, če teh ukrepov ne bi bilo. Vendar se moramo zavedati, da si s tem zagotovimo dolgoročno zanesljivost in varnost obratovanja vodarne. Pri obstoječem stanju črpanja je strošek izračunan ob predpostavki, da je kvaliteta načrpane vode ustrezna. Dejansko stanje je ravno nasprotno, v lanskem letu je prišlo še do večjega onesnaženja (Urbanc, J., *et al*, 2004) in večino vodnjakov je bilo treba ustaviti. Rezultat tega je bil, da je bilo na koncu leta porabljeno le cca 2/3 načrtovane porabe električne energije na odjemnem mestu vodarne. Posledično so vodarne, ki so nadomestile vodarno Hrastje porabile več električne energije kot je bilo napovedano. Penali za neporabljeno energijo so skoraj enaki ceni male tarife (cca 6 SIT/kWh), pri prekomerni porabi pa se cena kWh poveča še za določen znesek (cca 2,5 SIT). Če upoštevamo še te posredne stroške, so dejanski stroški načrpanega m^3 vode močno večji. Zavedati pa se moramo, da je najdražji m^3 vode tisti, ki ga nimamo takrat, ko ga potrebujemo.

6 ZAKLJUČEK

Varna oskrba s pitno vodo je opredeljena kot nemotena oskrba z zadostnimi količinami kakovostne vode za zadovoljevanje potreb uporabnikov.

Za nemoteno oskrbo mesta Ljubljane s pitno vodo je potrebno ustrezno zaščititi obstoječa črpališča. To nalogo so v preteklosti zadovoljivo opravljala vodovarstvena območja. Vendar ta danes, zaradi vsepovsod prisotne kemizacije okolja v urbanih središčih in kmetijskih površinah, niso več učinkovita. Najbolj ogrožena vodarna na Ljubljanskem polju je trenutno vodarna Hrastje. Če se ne bo nič spremenilo, jo bo treba opustiti in poiskati nadomestni vir pitne vode drugje.

V nalogi je predstavljen način zaščite, ki omogoča nadaljnje obratovanje vodarne. Pri tem bi zajeli savsko vodo (direktno ali posredno iz obrežnega filtrata), ki že sedaj napaja vodonosnik Ljubljanskega polja. Analize savske vode kažejo, da je voda v zadovoljivem stanju, analize obrežnega filtrata pa so še boljše, saj je voda le mikrobiološko oporečna. To vodo bi prečrpali na območje vodarne, kjer bi jo ustrezno pripravili za umetno bogatenje. S tem bi bil preprečen škodljiv vpliv okoliških dejavnosti, ki onesnažijo podtalnico na poti do vodarne. Tako bi dejansko pridobili nadzor nad količino in kakovostjo vstopajoče vode na ožjem območju vodarne. Z nalivanjem vode nazaj v podtalje bi dosegli lokalno spremembo toka podtalnice in s tem na nek način upravljali s podtalnico na ožjem območju vodarne. Za zagotovitev zadostne zaščite bi bilo treba nalivati okrog 15 % več vode, kot bi jo kasneje načrpali. Na ta način bi vodarno zaščitili pred onesnaženjem in omogočili njeno nadaljnje nemoteno obratovanje.

Takšna rešitev problema kakovosti podtalnice ima še nekaj prednosti pred iskanjem novega vira pitne vode. Uporabljena bi bila vsa obstoječa infrastruktura in sprememba koncepta vodovodnega sistema ne bi bila potrebna. Na območju vodarne zelo dobro poznamo hidrogeološke razmere, drugje pa bi bilo potrebno to še raziskati. Poleg tega bi lahko zmanjšali vodovarstvena območja. Po potrebi pa bi lahko na enostaven način povečali

zmogljivost črpanja vodarne in se tako prilagodili trenutnim potrebam oskrbe mesta s pitno vodo.

Razumljivo je tak način zaščite dražji od obstoječega. Razliko v obratovalnih stroških predstavljajo stroški zajema in priprave vode za umetno bogatenje. Zaradi nizkih obratovalnih stroškov in enostavne izvedbe je zajem obrežnega filtrata z vodnjaki najboljša izmed treh predstavljenih rešitev. Vendar pa je povečanje stroškov načrpanega kubičnega metra vode v primerjavi s končno ceno vode zelo majhno. Pri tem se moramo zavedati, da si s tako zaščito za malo denarja »kupimo« zanesljivost oskrbe s pitno vodo.

7 VIRI

7.1 Uporabljeni viri

- Aljtoski, M.E., 1973. Hidrogeološki priručnik. Beograd, Građevinska knjiga: str. 479-557
- American Water Works Association, American Society of Civil Engineers, 1997. Water Treatment Plant Design. New York, San Francisco, Washington D.C., Auckland, Bogota, Caracas, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, Montreal, New Delhi, San Juan, Singapore, Sydney, Tokyo, Toronto, McGRAW-HILL: 806 str.
- Agencija republike Slovenije za okolje, 2002. Podatki o kakovosti reke Save za leto 2002.
- Asano, T. (ur), 1985. Artificial Recharge of groundwater. Boston, London, Sydney, Wellington, Durban, Toronto, Butterworth publishers: 767 str.
- Auersperger, P., Čenčur Curk, B., Jamnik, B., Janža, M., Kus, J., Prestor, J., Urbanc, J., 2005. Dinamika podzemne vode. V: Rejec Brancelj, I., Smrekar, A., Kladnik, D. (ur.). Podtalnica Ljubljanskega polja. Ljubljana, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU: str. 39-61.
- Brilly, M., 2002. Varnost vodnih virov za oskrbo z vodo mesta Ljubljane. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 127-137.
- DHI Water and Environment, 1999a. MIKE SHE Water Movement, User Manual. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija: 254 str.
- DHI Water and Environment, 1999b. MIKE SHE Water Quality, User Manual. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija: 92 str.
- DHI Water and Environment, 1999c. MIKE SHE Pre- and Postprocessing, User Manual. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija: 355 str.
- DHI Water and Environment, 1999d. MIKE SHE Pre- and Postprocessing, User Guide. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija: 113 str.
- DHI Water and Environment, 1999e. MIKE SHE Advection-Dispersion, User Guide and Technical Reference Manual. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija: 72 str.

- DHI Water and Environment, 1999f. MIKE SHE Particle Tracking, Users Manual and Technical Reference Manual. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija: 17 str.
- DHI Water and Environment, 1999g. MIKE SHE Lessons. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija: 90 str.
- Fowler, L.C., 1996. Operation and Maintenance of Ground Water Facilities. New York, American Society of Civil Engineers: str. 101-130.
- Horvat, B., 2004. Aktivna zaščita podtalnice. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 42 str.
- Jamnik, B., 2000a. Poročilo o kakovosti podtalnice med črpalnim poskusom v vodarni Jarški prod. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija, TIS-razvojna služba: 10 str.
- Jamnik, B., 2000b. Pregled možnih načinov oskrbe s pitno vodo iz vodarne Hrastje v prihodnje. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija, TIS-razvojna služba: 12 str.
- Jonson, A.I., Pyne, D.G. 1994. Artificial recharge of Ground water, II. Proceedings of the Second International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, Walt Disney World Swan, Florida, 17.7.-22.7.1994, American Society of Civil Engineers: 913 str.
- JP VO-KA, 2000. Podatki o višinah gladine podtalnice v piezometru Obrije od leta 1992 do 1997.
- Kompare, B., 2002. Aktivna zaščita vodarne Hrastje. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 25-36.
- Kristensen, M., Andersson, U., Sorensen, H., Refsgaard, A., Gustavsson, L., 2000a. Model podtalnice Ljubljanskega polja in Ljubljanskega Barja, Končno poročilo. JP Vodovod-Kanalizacija: 24 str.
- Kristensen, M., Andersson, U., Sorensen, H., Refsgaard, A., Gustavsson, L., 2000b. Water Resources Management Model for Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje, Final Report. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija: 439 str.
- Leuthold, A., Lussi, G., 1988. Zürichs Grundwasser, Wasserversorgung Zürich, Abteilung der Industriellen Betriebe, 1988/8,2 Auflage.
- Lin, S., 2001. Public Water Supply. V: Water and Wastewater Calculations Manual. New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto, McGRAW-HILL: str. 307-473.

- Mencej, Z., Malešič, U., 2003. Hidrogeološke razmere na širšem območju vodarne Jarški brod. Dragomer, JP Vodovod-Kanalizacija: 6 str.
- Meško, B., 2003. Analiza učinkovitosti tehnoloških postopkov pridobivanja pitne vode mesta Ormož. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Visoka šola za zdravstvo.
- Pravilnik o pitni vodi (Ur.l. RS, št. 19/2004).
- Rismal, M., 1995. Čiščenje pitne vode. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 152 str.
- Rismal, M., Kopač, I., 2000. Riverbank filtration as pre-treatment of river water for artificial recharge of groundwater for drinking water supply of the city of Maribor. V: International Riverbank Filtration conference, Dusseldorf, Nemčija, 2.-4. november 2000.
- Rismal M., 2002a. Zemlja in rečna voda namesto kemije. V: časopis Delo, priloga Znanost, 11.3.2002, str. 4-5.
- Rismal, M., 2002b. Pitna voda Ljubljane potrebuje pred onesnaževanjem varnejšo zaščito. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 37-50.
- Rus, A., 1985. Umetno bogatenje podtalnice za vodovod Celje. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 74 str.
- Schmidt, C. K., Lange, F. T., Brauch, H. J., Kuhn, W., 2003. Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany. V: <http://www.tzw.de/pdf/bankfiltration.pdf> (1.4.2005).
- Schmoelzer H., 2002. Managing water quality by artificial groundwater recharge. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 11-15.
- Urbanc, J., Janža, M., Prestor, J., Strojjan, M., Bizjak, M., 2004. Ugotavljanje izvora in dinamike širjenja onesnaženja podzemne vode s trikloretenom na območju med savsko cesto in črpališčem Hrastje v Ljubljani. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija: 24 str.
- Vuković, M., Soro, A., 1990. Hidraulika bunara, Teorija i praksa. Beograd, Građevinska knjiga: str. 205-258.

7.2 Ostali viri

- Bračič-Železnik B., 2002a. Kje so meje rabe in izkoriščanja podtalnice vodonosnika Ljubljanskega polja in barja. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 117-126
- Bračič-Železnik, B., 2002b. 110 let javne oskrbe s pitno vodo izkoriščanje in zaščita podtalnice Ljubljanskega polja. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 175-187.
- Breznik M., 1969. Podtalnica Ljubljanskega polja in možnost njenega povečanega izkoriščanja. V: Geologija 12, 1969: str. 165-184.
- Breznik M., 1982. Novi vodni viri Ljubljane, zmanjšanje sedanjih varstvenih pasov. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hidrotehnična smer, Katedra za splošno inženirsko hidrotehniko, Laboratorij za mehaniko tekočin: 118 str.
- Breznik M., 1993a. Bodočnost Ljubljanskega vodovoda, I.del. Poročilo. Ljubljana: 96 str.
- Breznik M., 1993b. Ocena raziskovalne naloge Mestnega sekretariata za izobraževanje, raziskovalno dejavnost, kulturo in šport, Aktivna zaščita pitne podtalnice Ljubljanskega polja za vodovod Ljubljana. Ljubljana: 22 str.
- Brilly, M., Jamnik B., 2002. Zaščita podtalnice ljubljanskega polja. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 163-174.
- Gspan, M., Jamnik, B., Bračič-Železnik, B., 2001. Analiza možnih količin črpanja na Ljubljanskem polju. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija, TIS-razvojna služba: 10 str.
- Gspan, M., Grabar, G., Bračič-Železnik, B., Jamnik, B., Virant, J., Anžič, P., 2003. Potencialni novi viri pitne vode za Mestno občino Ljubljana. Ljubljana, JP Vodovod-Kanalizacija, TIS-razvojna služba: 27 str.
- Jamnik, B., 2002c. Oskrba s pitno vodo v Ljubljani – Kako naprej?. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 139-150.

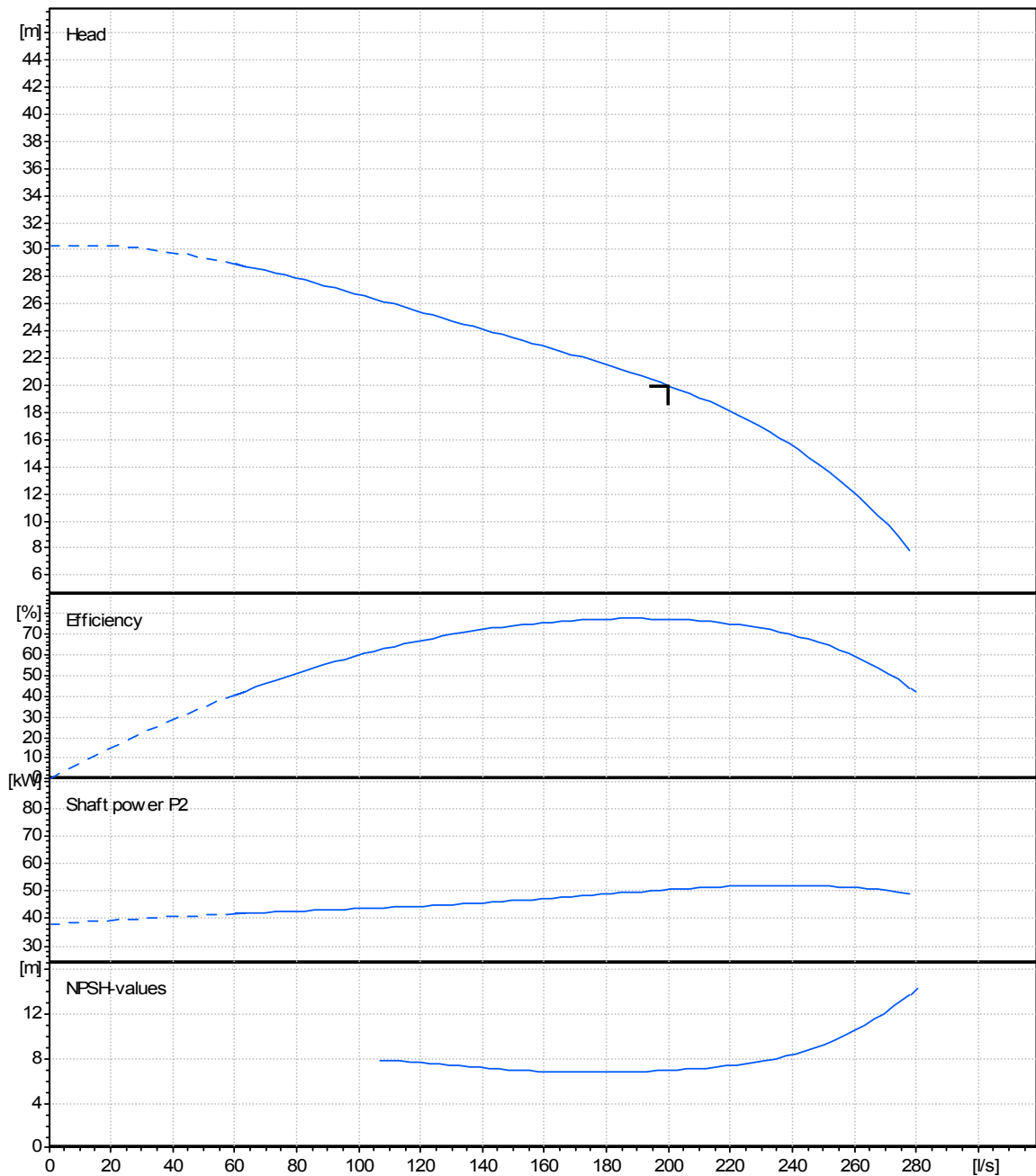
- Jamnik, B., 2002d. Javna oskrba mesta Ljubljane s pitno vodo včeraj, danes in jutri. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 189-196.
- Kompare, B., Rismal, M., 1996. Problematika zaščite podtalnice, če poteka avtocesta po ožjem ali vplivnem območju vodovodnega črpališča. V: 3. Slovenski kongres o cestah in prometu, Bled, 13.-15. november 1996; Zbornik, str. 325-336.
- Mencej, Z., Kmetec, M., 1997. Raziskave za nadomestitev vodarne Hrastje raziskave na Ljubljanskem polju, I.faza, črpalne vrtine MV-1, MV-2 in MV-3 v Hrastju. Dragomer, JP Vodovod-Kanalizacija: 9 str.
- Nartnik, M., 2004. Modeliranje podtalnice Ljubljanskega polja. Ljubljana. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 121 str.
- Peklaj, E., 1992. Predčiščenje površinske savske vode za umetno bogatenje podtalnice. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 112 str.
- Prestor, J., Urbanc J., Janža M., 2002. Problematika zaščite virov pitne vode na Ljubljanskem polju. V: Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani, Ljubljana, 19.9.2002; Zbornik, str. 17-24.
- Rejec Brancelj, I., Smrekar, A., Kladnik, D. (ur.), 2005. Podtalnica Ljubljanskega polja. Ljubljana, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU: 251 str.
- Rismal, M., Kompare, B., Knific, J., Peklaj, E., 1992. Aktivna zaščita pitne podtalnice Ljubljanskega polja za Vodovod Ljubljana. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za zdravstveno hidrotehniko: 54 str.
- Rismal, M., 2002c. Pomagajmo ji s Savo. V: časopis Delo, priloga Znanost, 4.11..2002, str. 12-13.

8 PRILOGE

Priloga A: Karakteristike črpalke

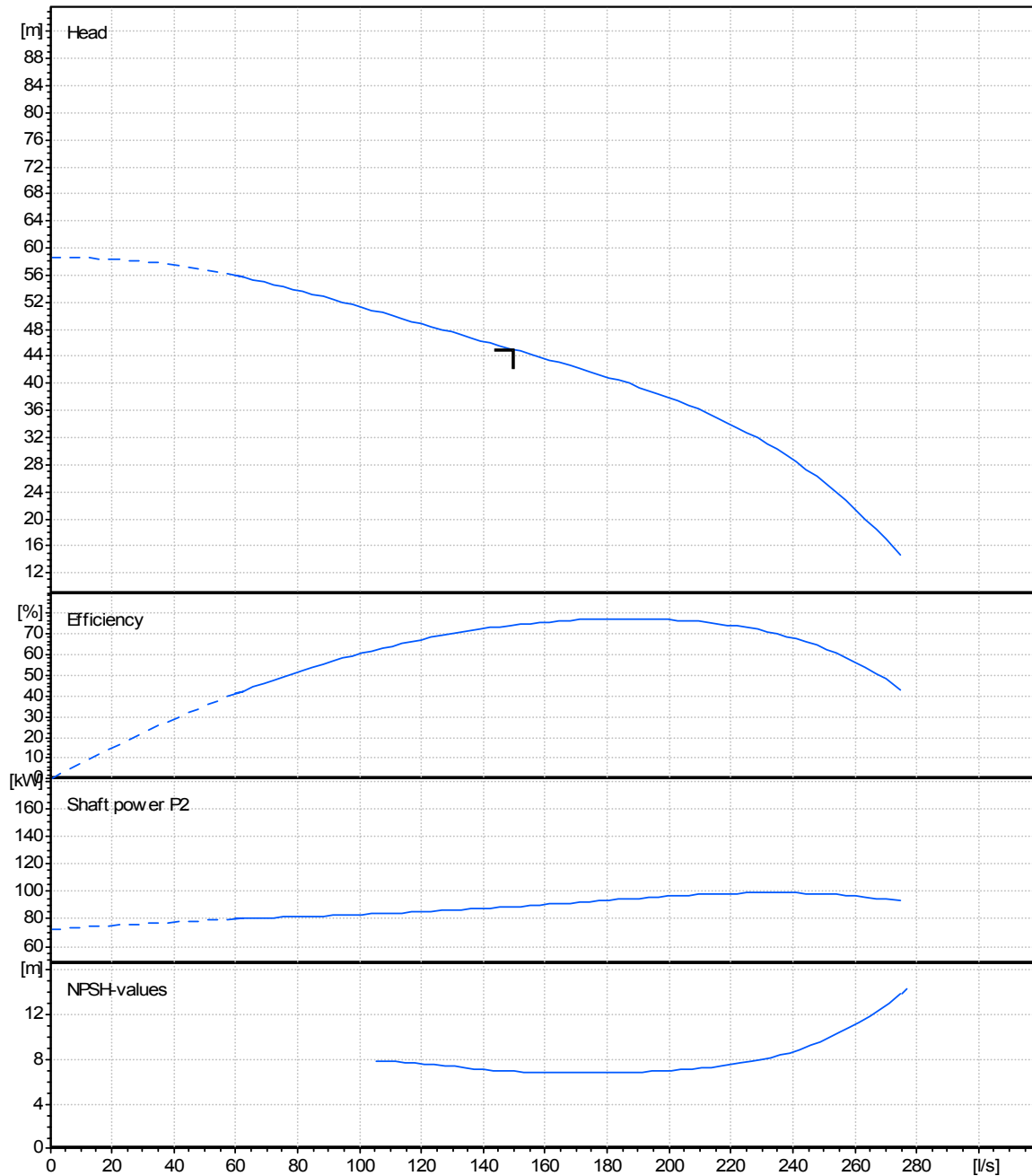
Priloga A1: Črpalke za zajem Save:

Q=215 l/s	H= 19 m	$\eta = 0,78$	$P_{gr}= 84 \text{ kW}$	$E=0,07 \text{ kWh/m}^3$
-----------	---------	---------------	-------------------------	--------------------------



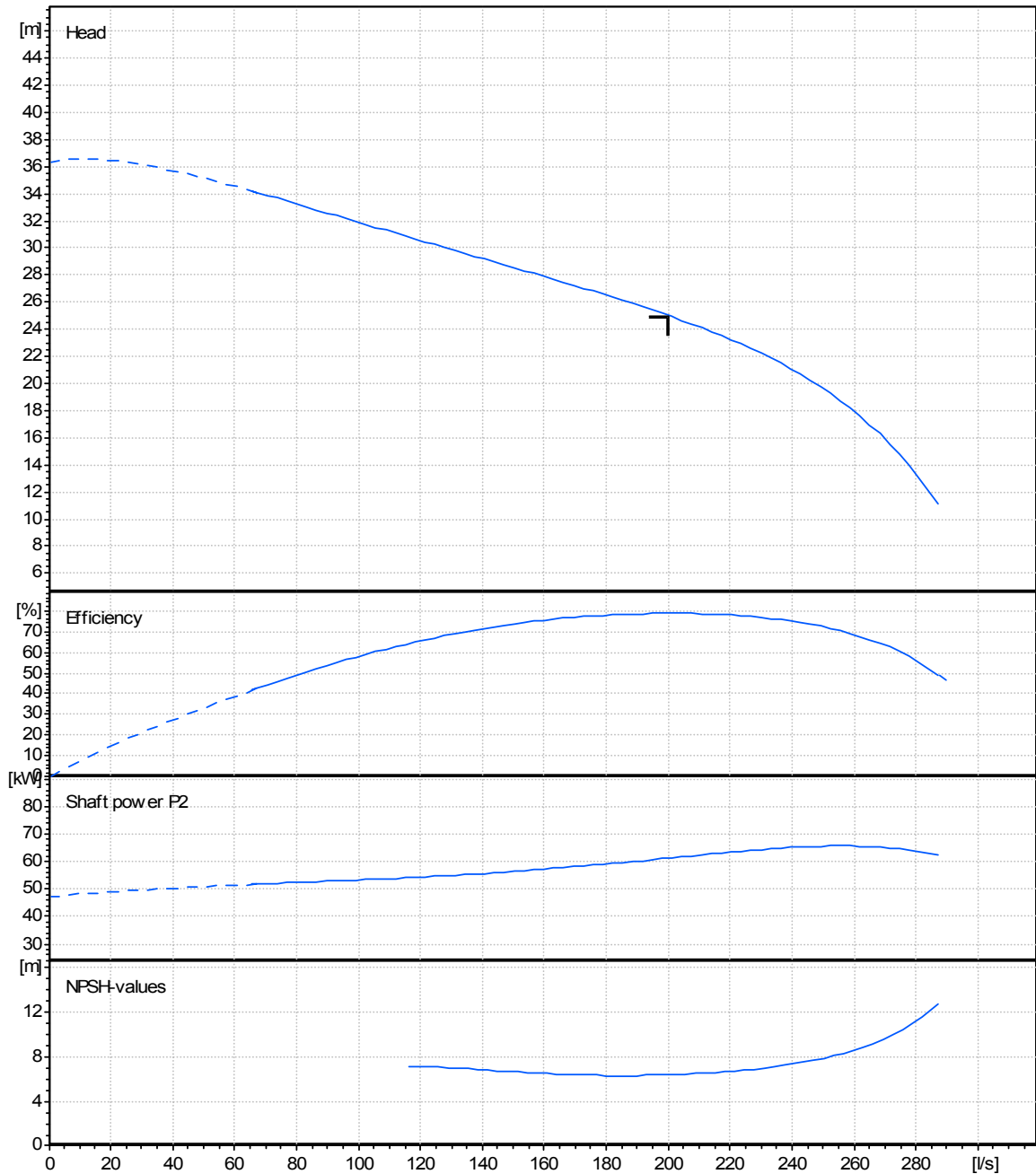
Priloga A2: Črpalke za zajem obrežnega filtrata z vodnjaki:

$Q=160$ l/s	$H= 44$ m	$\eta = 0,79$	$P_{gr}= 84$ kW	$E=0,16$ kWh/m ³
-------------	-----------	---------------	-----------------	-----------------------------



Priloga A3: Črpalke za zajem obrežnega filtrata z drenažo:

$Q=215 \text{ l/s}$	$H= 23 \text{ m}$	$\eta = 0,79$	$P_{gr}= 63 \text{ kW}$	$E=0,088 \text{ kWh/m}^3$
---------------------	-------------------	---------------	-------------------------	---------------------------



Priloga B: Analize kakovosti obrežnega filtrata in savske vode.

Priloga B1: Analiza kvalitete obrežnega filtrata (Jamnik, B., 2000a)

JA 5 oddaljenost od levega brega Save cca 25 m

Podtalnica		datum odvzema				
parameter	enota	12.10.1999	14.10.1999	15.10.1999	18.10.1999	20.10.1999
pH		7,55	7,58	7,63	7,64	7,58
elektroprevodnost	uS/cm	429	429	428	421	427
motnost	NTU	4,11	2,93	2,16	1,67	8,28
kalcij	mg/l	68,2	68,3	68,6	67,7	68,4
magnezij	mg/l	13,7	13,6	13,5	13,4	14
trdota	oN	12,7	12,7	12,7	12,6	12,8
kalij	mg/l	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
natrij	mg/l	1,9	1,9	2,1	2,1	2,4
NO ₃	mg/l	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
NO ₂	mg/l	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
NH ₄	mg/l	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
klorid	mg/l	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6
sulfat	mg/l	13,8	13,8	13,9	13,6	13,5
krom 6+	ug/l	<3	<3	<3	<3	<3
cink	ug/l	11	<1	<1	<1	3,8
kadmij	ug/l	0,07	<0,05	0,07	<0,05	<0,05
svinec	ug/l	<1	<1	<1	<1	<1
baker	ug/l	<1	<1	<1	<1	<1
nikelj	ug/l	<1	<1	<1	<1	<1
Bor	mg/l	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
TOC	mg/l	0,65	0,35	0,5	0,53	0,79
E. Coli	MPN v 100ml	2,2	0	2,2	0	0
S. kolif. Bakt	MPN v 100ml	2,2	0	2,2	0	0
S. št. aerob bakt.	22 °C v 1ml	40	<10	<10	<10	40
S. št. aerob bakt.	37 °C v 1ml	<10	<10	<10	<10	<10

Priloga B2: Analiza kvalitete obrežnega filtrata (Jamnik, B., 2000a)

JA 6 oddaljenost od levega brega Save cca 200 m

Podtalnica		datum odvzema				
parameter	enota	12.10.1999	14.10.1999	15.10.1999	18.10.1999	20.10.1999
pH		7,45	7,43	7,45	7,45	7,45
elektroprevodnost	uS/cm	426	432	426	426	426
motnost	NTU	0,792	0,242	0,792	0,792	0,792
kalcij	mg/l	63,6	68,6	63,6	63,6	63,6
magnezij	mg/l	13,5	13,7	13,5	13,5	13,5
trdota	°N	12	12	12	12	12
kalij	mg/l	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
natrij	mg/l	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
NO3	mg/l	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
NO2	mg/l	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
NH4	mg/l	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
klorid	mg/l	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
sulfat	mg/l	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4
krom 6+	ug/l	<3	<3	<3	<3	<3
cink	ug/l	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
kadmij	ug/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
svinec	ug/l	<1	<1	<1	<1	<1
baker	ug/l	<1	<1	<1	<1	<1
nikelj	ug/l	<1	<1	<1	<1	<1
Bor	mg/l	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
TOC	mg/l	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
E. Coli	MPN v 100ml	0	0	0	0	0
S. kolif. Bakt	MPN v 100ml	0	0	0	0	0
S. št. aerob bakt.	22 °C v 1ml	10	220	<10	<10	30
S. št. aerob bakt.	37 °C v 1ml	<10	<10	<10	<10	12

	Obstoječe stanje [SIT/h]		Zajem Save [SIT/h]		Zajem obrežnega filtrata z vodnjaki [SIT/h]		Zajem obrežnega filtrata z drenažo [SIT/h]	
	MT	VT	MT	VT	MT	VT	MT	VT
Zajem vode	0	0	1357,98	2569,19	3103,95	5872,44	1707,17	3229,84
Koagulant	0	0	9746	9746	0	0	0	0
Koagulacija	0	0	1086,38	2055,35	0	0	0	0
Flokulacija	0	0	17,46	33,03	0	0	0	0
Ogljeni filter	0	0	13680	13680	0	0	0	0
Črpanje v vodarni	4167,90	7885,35	4167,90	7885,35	4167,90	7885,35	4167,90	7885,35
SKUPAJ	4167,90	7885,35	30055,72	35968,93	7271,85	13757,79	5875,07	11115,19
Spec. strošek[SIT/m ³]	2,11	3,98	15,18	18,17	3,67	6,95	2,97	5,61
Razlika [SIT/m ³]	0	0	13,07	14,18	1,57	2,97	0,86	1,63
Razlika v %	0	0	621	356	74	74	41	41