

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Podiplomski program Gradbeništvo
Hidrotehnična smer

Kandidat:

Simon Kač

Matematični model podzemne vode na območju Medloga v spodnji Savinjski dolini in simulacija umetnega bogatenja

Magistrska naloga št. 206

Mentor:

prof. dr. Boris Kompare

Somentor:

doc. dr. Mihael Brenčič

Ljubljana, 24. 9. 2009

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
fgg@fgg.uni-lj.si



PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

MAGISTRSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

SIMON KAČ

**Matematični model podzemne vode na območju Medloga v
Spodnji Savinjski dolini in simulacija umetnega bogatenja**

Magistrsko delo štev.: 206

**Groundwater model of aquifer in Medlog in Spodnja Savinjska
dolina and simulation of artificial recharge**

Master of Science Thesis No.: 206

Mentor:
prof. dr. Boris Kompare

Predsednik komisije:
prof. dr. Maja Četina

Somentor:
doc. dr. Mihael Brenčič

Član:

Ljubljana, 24.9.2009

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **SIMON KAČ** izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom:
**»MATEMATIČNI MODEL PODZEMNE VODE NA OBMOČJU MEDLOGA V
SPODNJI SAVINJSKI DOLINI IN SIMULACIJA UMETNEGA BOGATENJA«.**

Podpis: _____

Ljubljana, 24.9.2009

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 519.61/.64:556.3:628.11(043.3)

Avtor: Simon Kač, univ.dipl.inž.vod.kom.inž.

Mentor: prof. dr. Boris Kompare, univ.dipl. inž.grad. (mentor),

Somentor: doc. dr. Mihael Brenčič, univ.dipl. inž.geol. (somentor)

Naslov: Matematični model podzemne vode na območju Medloga v Spodnji Savinjski dolini in simulacija umetnega bogatenja

Obseg in oprema: 92 str., 15 pregl., 48 sl.

Ključne besede: podzemna voda, Spodnja Savinjska dolina, Medlog, matematični model podzemne vode, PMWIN, umetno bogatenje, vodnjaki

Izvleček

Magistrsko delo obravnava matematično modeliranje podzemne vode na območju vodonosnika Spodnje Savinjske doline med naseljema Žalec in Celje. V okviru magistrskega dela je bil izdelan tridimenzionalni napovedovalni model podzemne vode na obravnavanem območju. Model je bil izdelan s programskim paketom Procesing Modflow for Windows (PMWIN). Za izdelavo modela so bili uporabljeni podatki iz literature, podatki iz arhiva javnega podjetja Vodovod – kanalizacija, d.o.o. ter iz Agencije RS za okolje. V nadaljevanju je bil model umerjen glede na meritve gladin podzemne vode. Z modelom so bile izvedene stacionarne simulacije črpanja trenutno maksimalnih količin in črpanja povečanih količin podzemne vode iz vodnjakov v Medlogu (v sušnih razmerah) ter simulaciji dveh variant uporabe umetnega bogatenja na območju vodnjakov v Medlogu. Izvedene simulacije so pokazale, da je trenutne količine črpanja podzemne vode iz vodnjakov mogoče povečati ter da je umetno bogatenje primeren postopek za povečanje izdatnosti vodnjakov v Medlogu.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:556.3:628.11(043.3)
Author: Simon Kač, univ.dipl.inž.vod.kom.inž.
Supervisor: prof. dr. Boris Kompare, univ.dipl. inž.grad. (supervisor)
Co-supervisor: doc. dr. Mihael Brenčič, univ.dipl. inž.geol. (co-supervisor)
Title: Groundwater model of aquifer in Medlog in Spodnja Savinjska dolina and simulation of artificial recharge
Notes: 92 p., 15 tab., 48 fig.
Key words: groundwater, Spodnja Savinjska dolina, Medlog, groundwater model, PMWIN, well, artificial groundwater recharge

Abstract

The master thesis deals with groundwater modelling in the area of aquifer in Spodnja Savinjska dolina between Žalec and Celje. As a part of the thesis the three-dimensional predictive groundwater model of that area was developed. It was developed with the programme package Processing Modflow for Windows (PMWIN). For the development the data from the literature and the archives of the public company Vodovod – kanalizacija d.o.o. and Agencija RS za okolje were used. Further the model was calibrated by the measurements of groundwater levels. The model helped to carry out the steady-state simulations of the groundwater extraction of temporary maximum quantities, the extraction of increased quantities of groundwater from the wells in Medlog in dry conditions and the simulations of two possible variants of usage of artificial recharge of groundwater in the area of the wells in Medlog. The simulations have shown that the temporary quantities of the groundwater extraction from the wells can be increased and that the artificial recharge of the groundwater is an appropriate process for increasing the rates of flow of the wells in Medlog.

ZAHVALA

Hvala vsem, ki ste mi pri izdelavi te magistrske naloge pomagali in mi stali ob strani.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Namen magistrskega dela	1
1.2	Modeliranje podzemne vode.....	3
1.3	Zakaj ustvariti model podzemne vode?	3
1.4	Zasnova cilja modeliranja (namen modeliranja).....	4
1.5	Postopek modeliranja.....	4
1.6	Kratka predstavitev programa PMWIN	7
1.7	Umetno bogatenje podzemne vode.....	8
2	PODZEMNA VODA V SPODNJI SAVINJSKI DOLINI.....	11
2.1	Zgodovina izkoriščanja podzemne vode na območju Medloga.....	11
2.2	Črpanje podzemne vode v Medlogu in poraba vode v Celju.....	11
2.3	Problematika vodnega vira Medlog	14
2.4	Poraba vode v Celju	15
2.5	Hidrogeološke karakteristike vodonosnika Spodnje Savinjske doline	16
2.6	Primernost vode iz reke Savinje za umetno bogatenje	18
3	MODEL PODZEMNE VODE V SPODNJI SAVINJSKI DOLINI	22
3.1	Konceptualni model	22
3.2	Umerjanje modela.....	38
3.3	Simulacija povečanja črpanja podzemne vode iz vodnjakov v Medlogu	45
3.4	Simulacija različnih variant umetnega bogatenja	63
3.5	Razširjeni model	75
4	DISKUSIJA REZULTATOV	87
4.1	Umerjanje modela.....	87
4.2	Preveritev prve hipoteze	88
4.3	Preveritev druge hipoteze	91

4.4	Preverjanje rezultatov prvotnega modela z razširjenim modelom.....	92
4.5	Priporočila za nadaljnji razvoj modela podzemne vode na območju Spodnje Savinjske doline	93
5	ZAKLJUČEK	95
6	POVZETEK.....	98
7	SUMMARY.....	99
	VIRI IN LITERATURA:.....	100
	PRILOGE.....	104

KAZALO SLIK

Slika 1: Diagram poteka modeliranja podzemne vode	5
Slika 2: Prikaz zajema podzemne vode v Medlogu (Vodovod – kanalizacija, 1998)	13
Slika 3: Gibanje koncentracij nitratov v vodnjakih v Medlogu od 2001 do 2006 (Vodovod – kanalizacija, 2006)	15
Slika 4: Gibanje porabe pitne vode v Celju v obdobju od 1960 do 2008 (Vodovod – kanalizacija, 2009)	16
Slika 5: Gibanje koncentracij nitratov v Savinji v obdobju od 2001 do 2005 (Jesenovec, 2008)	20
Slika 6: Grafični prikaz vodne bilance modela	23
Slika 7: Prikaz predpostavljenih koeficientov hidravlične prepustnosti gornjega sloja	24
Slika 8: Grafični prikaz geometrije modela: a) geometrija zemeljskega površja, b) geometrija meje med bolj in slabše prepustnim delom vodonosnika, c) geometrija neprepustne podlage	27
Slika 9: Prikaz robnih pogojev modela	28
Slika 10: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Žalec V-5272 (Uhan, 2008)	30
Slika 11: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Arja vas 1500 (Uhan, 2008)	30
Slika 12: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Levec 1772 (Uhan, 2008)	31
Slika 13: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Medlog 1730 (Uhan, 2008)	31
Slika 14: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Medlog 1941 (Uhan, 2008)	32
Slika 15: Vodostaji reke Savinje na vodomerni postaji 6120-Medlog (Ulaga, 2008)	33
Slika 16: Vodostaji reke Ložnice na vodomerni postaji 6630 – Ložnica I (ARSO, 2008)	34
Slika 17: Mesečne količine padavin, izmerjene na meteorološki postaji št. 268, Medlog v letih od 2003 do 2006 (Uhan, 2008)	36
Slika 18: Količine zajete vode iz vodnjakov v Medlogu (Vodovod – kanalizacija, 2008)	37
Slika 19: Koeficienti hidravlične prepustnosti zgornjega sloja, po ročnem umerjanju	39
Slika 20: Primerjava hidroizohips, izmerjenih (črne) in izračunanih (modre) gladin za obdobje od 14. do 18. avgusta 2000	40
Slika 21: Meritve gladin podzemne vode, ki so bile uporabljene za umerjanje modela	41

Slika 22: Območja umerjanja hidravlične prevodnosti strug.....	42
Slika 24: Grafični prikaz izračunanih in izmerjenih gladin v piezometrih.....	44
Slika 25: Primerjava izračunanih in izmerjenih gladin v piezometrih.....	44
Slika 26: Primerjava izračunanih gladin podzemne vode s statičnim (modre hidroizohipse) in dinamičnim (rdeče hidroizohipse) modelom v avgustu 2003.....	46
Slika 27: Vodna bilanca modela pri trenutno maksimalnih količinah črpanja iz vodnjakov (s sivo so označene količine črpanja) v avgustu 2003	48
Slika 28: Stanje gladin na območju vodnjakov ob trenutnih maksimalnih količinah črpanja (pri sočasnem črpanju iz vseh vodnjakov v sušnih razmerah) v avgustu 2003	49
Slika 29: Vodna bilanca modela pri trenutno maksimalnih količinah črpanja iz vodnjakov (s sivo so označene količine črpanja) za leto 2003	50
Slika 30: Prečni in podolžni prerez vodnjaka A ob črpanju 35 l/s v avgustu 2003	51
Slika 31: Prečni in podolžni prerez vodnjaka B ob črpanju 32 l/s v avgustu 2003	51
Slika 32: Prečni in podolžni prerez vodnjaka D ob črpanju 10 l/s v avgustu 2003	52
Slika 33: Prečni in podolžni prerez vodnjaka E ob črpanju 42 l/s v avgustu 2003.....	52
Slika 34: Prečni in podolžni prerez vodnjaka G ob črpanju 50 l/s v avgustu 2003	53
Slika 35: Prečni in podolžni prerez vodnjaka F ob črpanju 15 l/s v avgustu 2003.....	53
Slika 36: Vodna bilanca modela pri povečanih količinah črpanja iz vodnjakov (s sivo so označene količine črpanja) v maju 2003.....	55
Slika 37: Vodna bilanca modela pri povečanih količinah črpanja iz vodnjakov (s sivo so označene količine črpanja) v avgustu 2003	56
Slika 38: Vodna bilanca modela pri povečanih količinah črpanja iz vodnjakov (s sivo so označene količine črpanja) v avgustu 2003	57
Slika 39: Hidroizohipse gladin podzemne vode ob povečanih količinah črpanja iz vodnjakov v avgustu 2003	58
Slika 40: Primerjava gladin v primeru brez črpanja (zelene konture), ob trenutnem maksimalnem črpanju (modre konture) ter povečanih količinah črpanja (rdeče konture) v avgustu 2003	59
Slika 41: Prečni in podolžni prerez vodnjaka A ob črpanju 22 l/s v avgustu 2003	60
Slika 42: Prečni in podolžni prerez vodnjaka B ob črpanju 16 l/s v avgustu 2003	60
Slika 43: Prečni in podolžni prerez vodnjaka D ob črpanju 10 l/s v avgustu 2003	61
Slika 44: Prečni in podolžni prerez vodnjaka E ob črpanju 65 l/s v avgustu 2003.....	61

Slika 45: Prečni in podolžni prerez vodnjaka G ob črpanju 60 l/s v avgustu 2003	62
Slika 46: Prečni in podolžni prerez vodnjaka F ob črpanju 30 l/s v avgustu 2003	62
Slika 47: Prikaz območja nalivalnega vodnjaka z drenažami (modra polja) za umetno bogatenje	65
Slika 48: Vodna bilanca simulacije umetnega bogatenja z nalivalnim vodnjakom v avgustu 2003	67
Slika 49: Prikaz gladin podzemne vode na območju vodnjakov pri simulaciji umetnega bogatenja skozi nalivalni vodnjak z drenažo ter prereza skozi vodnjak A v avgustu 2003	68
Slika 50: Prikaz tokovnic podzemne vode na območju vodnjakov A, B, C in D pri simulaciji umetnega bogatenja skozi nalivalni vodnjak z drenažo v avgustu 2003	69
Slika 51: Vodna bilanca modela v primeru bogatenja podzemne vode z vodnjakom C v avgustu 2003	71
Slika 52: Prikaz gladin podzemne vode na območju vodnjakov A, B in C ob umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakom C in prečni ter podolžni prerez skozi vodnjak C v avgustu 2003	71
Slika 53: Prikaz tokovnic podzemne in infiltrirane vode na območju vodnjakov ob umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakoma B in C v marcu 2003.....	72
Slika 54: Prikaz tokovnic infiltrirane vode na območju vodnjakov A, B in C ob umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakom C v avgustu 2003.....	72
Slika 55: Vodna bilanca modela v primeru bogatenja podzemne vode z vodnjakoma B in C v avgustu 2003	73
Slika 56: Prikaz gladin podzemne vode na območju vodnjakov ob umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakoma B in C ter prerez skozi vodnjak C v avgustu 2003.....	74
Slika 57: Prikaz tokovnic infiltrirane vode na območju vodnjakov ob umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakoma B in C v avgustu 2003.....	74
Slika 58: Vodna bilanca simulacije povečanih količin črpanja v avgustu 2003.....	76
Slika 59: Območje razširjenega modela s prikazom robnih pogojev	77
Slika 60: Srednji mesečni vodostaji rek izmerjenih na vodomernih postajah na območju modela v letu 2003 (Uлага, 2008)	78
Slika 61: Odseki rek z umerjeno hidravlično prevodnostjo strug.....	80
Slika 63: Prikaz izračunanih in izmerjenih gladin podzemne vode v letu 2003.....	82

Slika 64: Primerjava izračunanih in izmerjenih gladin podzemne vode v letu 2003.....	82
Slika 65: Hidroizohipse podzemne izračunane z razširjenim in s prvotnim modelom vode v avgustu 2003.	83
Slika 66: Volumetrična vodna bilanca razširjenega modela za leto 2003 pri trenutnih količinah črpanja.....	84
Slika 67: Volumetrična vodna bilanca razširjenega modela za leto 2003 pri povečanih količinah črpanja.....	85
Slika 68: Volumetrična vodna bilanca razširjenega modela za leto 2003.	86

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Maksimalne količine načrpane vode iz posameznih vodnjakov. (Vodno dovoljenje št. 35527-24/2005-4).....	12
Preglednica 2: Rezultati preiskav vode iz reke Savinje, merilno mesto Medlog, šifra postaje 6120. (Jesenovec, 2008).....	19
Preglednica 3: Poreklo podatkov uporabljenih za izdelavo modela	26
Preglednica 4: Podatki o lokaciji piezometrov (ARSO, 2008).....	29
Preglednica 6: Podatki o lokaciji vodnjakov (Vodovod – kanalizacija, 2008)	38
Preglednica 7: Prikaz trenutnih in želenih količin črpanja podzemne vode v Medlogu.....	45
Preglednica 8: Primerjava med želenim povečanjem količin načrpane vode iz vodnjakov in povečanimi količinami, ki so določene z modelom za razmere v avgustu 2003	54
Preglednica 9: Količine črpanja iz posameznega črpalnega vodnjaka ob uporabi umetnega bogatenja.....	66
Preglednica 10: Maksimalne količine črpanja iz posameznega črpalnega vodnjaka ob uporabi umetnega bogatenja – izračunane z modelom in avgust 2003.....	66
Preglednica 11: Količine načrpane vode iz vodnjakov pri infiltraciji 30 l/s vode v vodnjak C in avgust 2003	70
Preglednica 12: Mesečne količine padavin ter vrednosti potencialne in efektivne evapotranspiracije v letu 2003	79
Preglednica 13: Trenutne, dovoljene, želene ter z modelom določenih maksimalnih količin črpanja iz vodnjakov v Medlogu	89
Preglednica 14: Gladine v vodnjakih in piezometrih Levec 1772 in Medlog 1730 ob simulaciji različnih količin črpanja.....	90
Preglednica 15: Primerjava rezultatov prvotnega modela in razširjenega modela	93
Preglednica 16: Maksimalne količine črpanja vode iz vodnjakov in maksimalne količine letno zajete vode	95

FIGURE INDEX

Fig. 1: Flow chart of the groundwater modeling process	5
Fig. 2: Groundwater extraction in Medlog (Vodovod – kanalizacija, 1998)	13
Fig. 3: Concentration of Nitrate in groundwater pumped from wells in Medlog from 2001 to 2006 (Vodovod – kanalizacija, 2006).....	15
Fig. 4: Consumption of drinking water in Celje from 1960 till 2008.....	16
Fig. 5: Concentration of Nitrate in Savinja river from 2001 till 2005 (Jesenovec, 2008)	20
Fig. 6: Water budget of the model	23
Fig. 7: Estimated hydraulic conductivity coefficients of the upper layer	24
Fig. 8: Geometry of the model: a) geometry of landscape, b) geometry of boundary between the aquifer layers, c) geometry of watertight base.....	27
Fig. 9: Boundary conditions of the model	28
Fig. 10: Groundwater level and trend in borehole Žalec V-5272 (Uhan, 2008).....	30
Fig. 11: Groundwater level and trend in borehole Arja vas 1500 (Uhan, 2008)	30
Fig. 12: Groundwater level and trend in borehole Levec 1772 (Uhan, 2008).....	31
Fig. 13: Groundwater level and trend in borehole Medlog 1730 (Uhan, 2008)	31
Fig. 14: Groundwater level and trend in borehole Medlog 1941 (Uhan, 2008)	32
Fig. 15: Water level in river Savinja on measuring spot 6120-Medlog (Ulaga, 2008)	33
Fig. 16: Water level in river Ložnica on measuring spot 6630 – Ložnica I (Ulaga, 2008)	34
Fig. 17: Rainfall measurement on measuring spot no. 268, Medlog from 2003 till 2006 (Uhan, 2008)	36
Fig. 18: Quantities of extracted water from wells in Medlog (Vodovod – kanalizacija, 2008)	37
Fig. 19: Hydraulic conductivity of the upper layer after the manual calibration.....	39
Fig. 20: Relation between contours of observed (black) and calculated (blue) groundwater levels from 14 th till 18 th august 2000	40
Fig. 21: Groundwater level data, used for model calibration	41
Fig. 22: Areas of the riverbed hydraulic conductance calibration	42
Fig. 23: Results of the parameter optimization process.....	43

Fig. 24: Relation between observed and calculated groundwater level.....	44
Fig. 25: Relation between observed and calculated groundwater level.....	44
Fig. 26: Relation between groundwater level calculated made by steady – state (blue contours) and transient (red contours) simulation in august 2003	46
Fig. 27: Water budget at the present pumping rates from the wells in august 2003.....	48
Fig. 28: Groundwater level on the area of wells in Medlog at the present pumping rates (at simultaneous pumping from all the wells) in august 2003	49
Fig. 29: Water budget at the present pumping rates from the wells (pumping rates are marked in grey) in year 2003	50
Fig. 30: Cross-section of the well A at pumping rate 35 l/s in august 2003.....	51
Fig. 31: Cross-section of the well B at pumping rate 32 l/s in august 2003	51
Fig. 32: Cross-section of the well D at pumping rate 10 l/s in august 2003.....	52
Fig. 33: Cross-section of the well E at pumping rate 42 l/s in august 2003	52
Fig. 34: Cross-section of the well G at pumping rate 50 l/s in august 2003.....	53
Fig. 35: Cross-section of the well F at pumping rate 15 l/s in august 2003	53
Fig. 36: Water budget at higher groundwater pumping rates (pumping rates are marked in grey) in may 2003	55
Fig. 37: Water budget at higher groundwater pumping rates (pumping rates are marked in grey) in august 2003	56
Fig. 38: Water budget at higher groundwater pumping rates (pumping rates are marked in grey) in august 2003	57
Fig. 39: Groundwater level on the area of wells in Medlog at the higher pumping rates in august 2003	58
Fig. 40: Comparison of groundwater levels at no exploitation (green contours), at preset (blue contours) and higher (red contours) exploitation quantities in august 2003.....	59
Fig. 41: Cross-section of the well A at pumping rate 22 l/s in august 2003.....	60
Fig. 42: Cross-section of the well B at pumping rate 16 l/s in august 2003	60
Fig. 43: Cross-section of the well D at pumping rate 10 l/s in august 2003.....	61
Fig. 44: Cross-section of the well E at pumping rate 65 l/s in august 2003	61
Fig. 45: Cross-section of the well G at pumping rate 60 l/s in august 2003.....	62
Fig. 46: Cross-section of the well F at pumping rate 30 l/s in august 2003	62

Fig. 47: Area of infiltration well with infiltration drainage (blue cells) for artificial groundwater recharge	65
Fig. 48: Water budget of artificial recharge simulation with infiltration through infiltration well in august 2003	67
Fig. 49: Groundwater level on the area of wells at artificial recharge simulation through infiltration well and cross-section of the well A in august 2003	68
Fig. 50: Groundwater path lines on the area of wells A, B, C and D at simulation of artificial recharge trough infiltration well with drainage in august 2003	69
Fig. 51: Water budget of artificial recharge simulation through well C in august 2003	71
Fig. 52: Groundwater level contours on the area of wells A, B, C at artificial recharge simulation through well C in august 2003	71
Fig. 53: Infiltration water and groundwater path lines on the area of wells at artificial recharge simulation through wells B and C in March 2003	72
Fig. 54: Infiltration water path lines on the area of wells A, B, C at artificial recharge simulation through well C in august 2003	72
Fig. 55: Water budget of artificial recharge simulation through wells B and C in august 2003	73
Fig. 56: Groundwater level contours on the area of wells at artificial recharge simulation through wells B and C in august 2003	74
Fig. 57: Infiltration water path lines on the area of wells at artificial recharge simulation through wells B and C in august 2003	74
Fig. 58: Water budget simulation at higher pumping rates in august 2003	76
Fig. 59: Area of the extended model with boundary conditions.....	77
Fig. 60: Monthly average water levels of the rivers on the model area in year 2003 (Uлага, 2008)	78
Fig. 61: River reaches with calibrated hydraulic riverbed conductance.....	80
Fig. 62: Values of horizontal hydraulic conductance of the upper layer	81
Fig. 63: Calculated and observed groundwater heads in year 2003	82
Fig. 64: Comparison of calculated and observed groundwater heads in year 2003	82
Fig. 65: Groundwater contours calculated with extended and primary model in august 2003	83
Fig. 66: Volumetric water budget of the extended model for year 2003 at current pumping rates	84

Fig. 67: Volumetric water budget of the extended model for year 2003 at higher pumping rates	85
Fig. 68: Volumetric water budget of the extended model for year 2003	86

TABLE INDEX

Table 1: Maximum quantities of the extracted groundwater from the wells. (Vodno dovoljenje št. 35527-24/2005-4).....	12
Table 2: Results of analyses of water from river Savinja; sampling spot Medlog, measuring station no. 6120. (Jesenovec, 2008).....	19
Table 3: Origin of data used for model development	26
Table 4: Location data of the observation boreholes (ARSO, 2008).....	29
Table 5: Location data of the river measuring spots (ARSO, 2008)	34
Table 6: Location data of the wells (Vodovod – kanalizacija, 2008).....	38
Table 7: Present and desired pumping rates of groundwater in Medlog	45
Table 8: Comparison between desired and model – calculated maximum pumping rates in august 2003	54
Table 9: Pumping rates from the wells with artificial recharge.....	66
Table 10: Maximum pumping rates from the wells with artificial recharge – calculated with model in august 2003	66
Table 11: Pumping rates from the wells at infiltration rate 30 l/s through well C in august 2003	70
Table 12: Monthly values of rainfall, potential evapotranspiration end effective evapotranspiration.....	79
Table 13: Present, allowed, desired and maximum calculated pumping rates from wells in Medlog.....	89
Table 14: Groundwater levels in wells and boreholes at simulating different pumping rates..	90
Table 15: Comparison of results between primary and extended groundwater model	93
Table 16: Maximal pumping rates and exploitation quantities from the wells per year	95

1 UVOD

1.1 Namen magistrskega dela

Vodovodni sistem Celje potrebuje za oskrbo vseh svojih porabnikov v normalnih razmerah okoli 260 l/s pitne vode. Če vodni viri v Vitanju in na Frankolovem delujejo nemoteno, potem se potrebe po črpanju vode v vodarni Medlog ne pojavijo. Vendar imajo vitanjski in frankolovski vodni viri to slabo stran, da ob dežju hitro zakalijo, zaradi česar jih je potrebno ponavadi izključiti iz sistema. V takem primeru se prične črpati podzemna voda iz Medloga. Potrebe po medloški vodi se pojavijo tudi v poletnih mesecih, ko poraba vode zaradi suše naraste. V takšnih razmerah zraste skupna poraba vode v vodovodnem sistemu Celje tudi nad 300 l/s.

Skupna izdatnost vodnjakov v Medlogu znaša približno 180 l/s. Za zanesljivejšo oskrbo vodovodnega sistema Celje bi želel upravljavec črpališč v Medlogu povečati črpanje iz vodnjakov v skupni količini za približno 100 l/s. Za odobritev povečanih količin črpanja s strani Agencije RS za okolje je potrebno predhodno z matematičnim modelom preveriti vplive, ki bi jih ta ukrep imel na podzemno vodo.

V medloški podzemni vodi že od leta 1983 dalje ugotavljajo povišane koncentracije nitratov, ki so posledica intenzivne kmetijske proizvodnje na celotnem prilivnem območju vodnega vira. Težavo s povišanimi koncentracijami nitratov v vodovodnem omrežju Celja upravljavec vodovoda rešuje z mešanjem vod iz Vitanja in Frankolovega z medloško vodo.

Obe težavi, ki jih ima upravljavec vodovoda Celje z vodnim virom Medlog, bi bilo mogoče rešiti z uporabo umetnega bogatenja podzemne vode z vodo iz bližnje Savinje. S tem postopkom bi se znižale koncentracije nitratov v načrpani vodi, povečala pa bi se izdatnost vodnjakov. V preteklosti je bila izdelana študija umetnega bogatenja podzemne vode za potrebe črpališč pitne vode v Medlogu. Pred odločitvijo o izvedbi predlaganih rešitev umetnega bogatenja bi bilo potrebno z matematičnim modelom simulirati predlagane rešitve.

1.1.1 Material in metode

Za izvedbo v uvodu navedenih simulacij je potrebna izdelava napovedovalnega matematičnega modela podzemne vode, ki obsega območje vodonosnika Spodnje Savinjske doline med Žalcem in Celjem. Za izdelavo modela je potrebno zbrati čim več razpoložljivih podatkov o vodonosniku (hidrogeološke karakteristike vodonosnika), nivojih podzemne vode, vodotokih na območju modeliranja, padavinah, infiltraciji ter ostalih elementih, ki vplivajo na podzemno vodo ter jih analizirati. Na podlagi zbranih podatkov je potrebno izdelati matematični model s programskim paketom Processing Modflow for Windows (PMWIN) in ga umeriti na podlagi pridobljenih meritev nivojev podzemne vode. S tako izdelanim modelom bo mogoče izvesti zastavljene simulacije. Pri izdelavi modela bodo upoštevane ugotovitve predhodnikov, ki so se ukvarjali s podzemno vodo na območju Medloga in z umetnim bogatenjem.

1.1.2 Hipoteza in pričakovani rezultati

Z modelom želim potrditi naslednji hipotezi:

- povečane količine črpanja iz posameznih vodnjakov ne bodo bistveno vplivale na naravni tok podzemne vode;
- umetno bogatenje podzemne vode je ustrezen rešitev za povečanje izdatnosti vodnjakov v Medlogu ter za znižanje koncentracij nitratov in drugih onesnažil v načrpani vodi, saj voda iz Savinje, ki je manj obremenjena z nitrati, odrine onesnaženo podzemno vodo.

Z izdelavo matematičnega modela bom skušal ugotoviti, kakšen je vpliv posameznih rešitev (povečanje črpanja, umetno bogatenje) na tok podzemne vode in ali postavljeni hipotezi držita. Na osnovi dobljenih rezultatov bom skušal podati predlog najustrežnejše rešitve za uporabo umetnega bogatenja podzemne vode in napovedati, na kakšen način bo umetno bogatenje vplivalo na izdatnost vodnjakov ter na vodonosnik.

1.2 Modeliranje podzemne vode

Model je vsak postopek, s katerim posnemamo naravne pojave oziroma dejansko stanje. Poznamo *fizične modele*, ki tok podzemne vode simulirajo direktno (laboratorijski rezervoarji s peskom) in *matematične modele*, ki fizične procese simulirajo posredno, in sicer s pomočjo matematičnih izrazov (enačb). Matematični modeli so sestavljeni iz osnovne enačbe in izrazov, ki opisujejo robne pogoje in začetne pogoje (če gre za nestacionarni model – časovna odvisnost). Rešujejo se z analitičnimi ali numeričnimi metodami. V primeru uporabe analitične metode se mora dejansko stanje poenostavljati, kar pogosto vodi v netočnost rezultatov (manj poenostavljanj in predpostavljaj podaja bolj kompleksen model). Zato je uporaba numeričnih metod primernejša, ponavadi pa tudi enostavnejša (lažje je ustvariti numerični kot analitični model).

Matematični model se z računalnikom rešuje s pomočjo sklopa ukazov, ki tvorijo *računalniški program* oziroma *kodo*. Računalniški program je splošen (napisan enkrat) in je uporaben za več različnih primerov, medtem ko se model nanaša na točno določen problem in vključuje set robnih pogojev, začetnih pogojev, določene parametre, mrežo vozlišč in hidrološke obremenitve.

Model predstavlja osnovo za zajete informacije in služi za testiranje idej o delovanju sistema. Dobro modeliranje poveča zanesljivost rezultatov.
(Nartnik, 2004)

1.3 Zakaj ustvariti model podzemne vode?

Modeliranje podzemne vode je namenjeno predvsem napovedovanju posledic določenih dejanj, ki se lahko zgodijo v sistemu podzemne vode v nekem hidrološkem (časovnem) obdobju.

Poznamo modele z različnimi nameni:

- *napovedovalni model (predictive model)*: služi za napovedovanje dogodkov (potrebno umerjanje);
- *interpretativni model (interpretive model)*: služi kot osnova za preučevanje dinamike sistema podzemne vode in sortiranja oziroma organiziranja podatkov (umerjanje modela ni potrebno);
- *splošni model (generic model)*: služi za analize toka podzemne vode v hipotetičnih hidroloških sistemih. Koristen je kot okvirna pomoč z nasveti za določeno območje (umerjanje ni potrebno).

Modeliranje podzemne vode je zelo primerno za povezovanje in organiziranje podatkov, potrebno se je zavedati, da ni samo sebi zadostno, temveč je le ena od komponent hidrološkega raziskovanja.

(Nartnik, 2004)

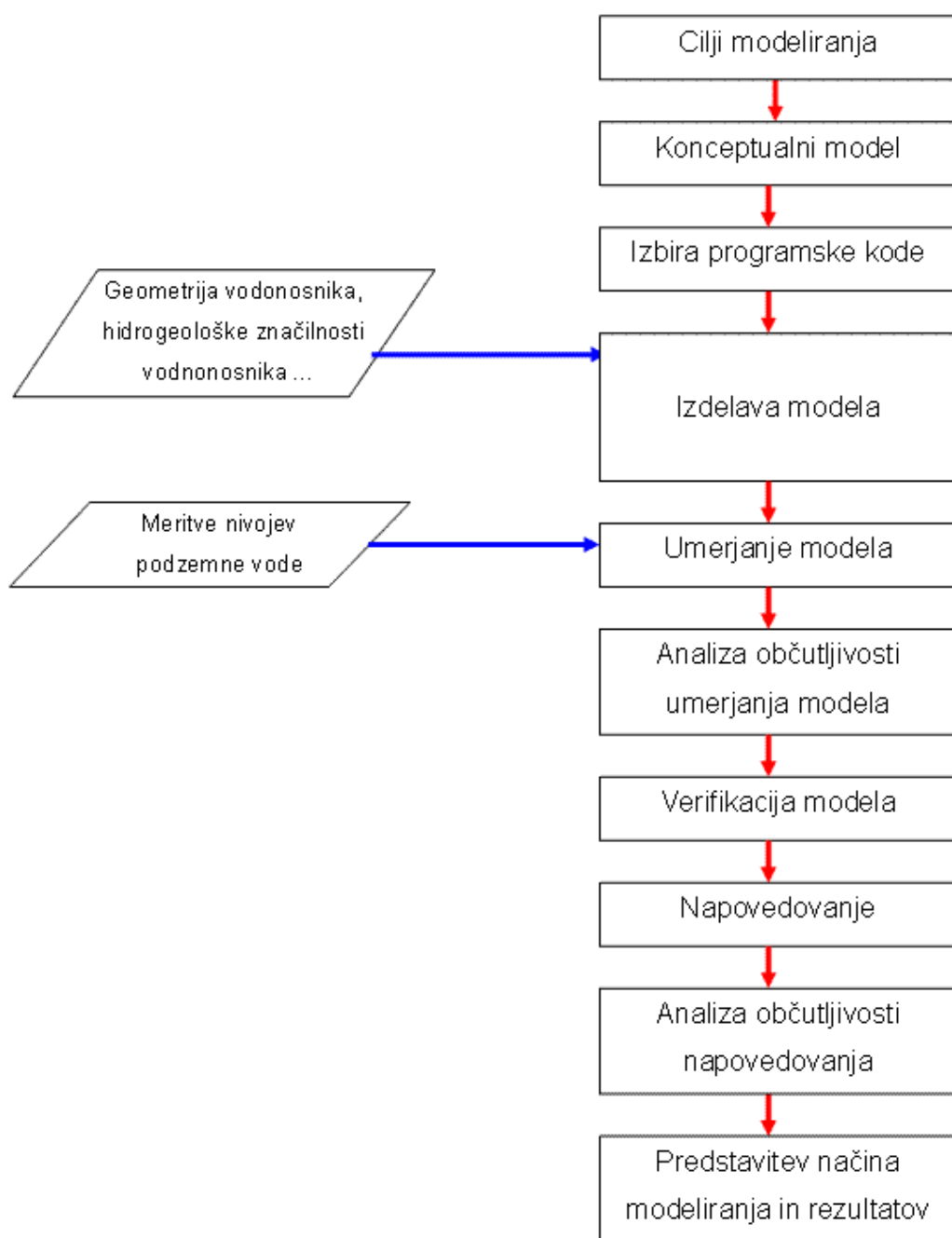
1.4 Zasnova cilja modeliranja (namen modeliranja)

Pri modeliranju se mora najprej določiti namen (cilj) modeliranja, ki je bistvenega pomena za nadaljnje korake. Na podlagi namena in odgovorov na vprašanja "*Kakšen tip modela potrebujemo?, Kaj želimo z modelom spoznati?, Ali je model najboljša pot za razrešitev problemov?, Ali je primernejši analitični ali numerični model?*" izberemo obsežnost modela (stacionarni ali nestacionarni, enodimenzionalni ali dvodimenzionalni ali tridimenzionalni model, analitični ali numerični ...).

(Nartnik, 2004)

1.5 Postopek modeliranja

Postopek modeliranja pri natančni definiciji cilja modeliranja in izbiri numeričnega modela je prikazan na sliki 1, v nadaljevanju pa so obrazložene posamezne faze postopka.



Slika 1: Diagram poteka modeliranja podzemne vode

Fig. 1: Flow chart of the groundwater modeling process

1. *Zasnova cilja modeliranja* – definicija ciljev in namen modeliranja.
2. *Razvoj konceptualnega modela* – identifikacija hidrostratigrafskih enot in pogojev (robnih, začetnih) v sistemu. Podatki o vodonosniku so potrebni za določanje

vrednosti parametrov vodonosnika in hidroloških obdobij. Priporočen je ogled terena, da se izognemo subjektivnim odločitvam.

3. *Izbira matematičnih enačb in računalniškega programa (programske kode)* – računalniški program je sestavljen iz algoritma, ki numerično rešuje matematični model. Preveriti je potrebno, ali izbrani matematični izrazi in računalniški program točno opisujejo fizične procese v naravi, ki jih želimo modelirati.
4. *Izdelava modela* – konceptualni model preoblikujemo v obliko, primerno za modeliranje. Tu je potrebno izdelati mrežo modela, izbrati časovne korake, oblikovati robne in začetne pogoje ter vnesti začetne vrednosti parametrov za vodonosnik in hidrološka obdobja.
5. *Umerjanje modela* – umerjanje modela na osnovi izmerjenih gladin in pretokov podzemne vode je namenjeno temu, da se rezultati, dobljeni z modelom, ujemajo z izmerjenimi vrednostmi v naravi.
6. *Analiza občutljivosti umerjanja* – analiza občutljivosti se izvede z namenom, da se ugotovi negotovost umerjenega modela. Robni pogoji in vrednosti parametrov ter njihova prostorska in časovna porazdeljenost so lahko namreč zaradi vpliva negotovosti, ki je posledica nezmožnosti točnega umerjanja, napačne.
7. *Potrditve (verifikacija) modela* – namen tega koraka je ustvariti večje zaupanje v model. Tu se izvede simulacija z umerjenimi vrednostmi parametrov in obremenitvami.
8. *Napovedovanje* – v tem koraku se s simulacijo ugotavlja odziv modela na prihodnje dogodke (napovedovanje vedenja sistema podzemne vode). Model se zažene z umerjenimi vrednostmi parametrov in obremenitvami. Netočnost napovedovanja narašča z netočnim umerjanjem modela.
9. *Analiza občutljivosti napovedovanja* – analiza se izvede, da se ugotovi vpliv netočnih vrednosti parametrov na napovedovanje.
10. *Predstavitev načina modeliranja in rezultatov* – dobra predstavitev modela in rezultatov sta bistvenega pomena za dosego uspeha in razumljivosti pri uporabnikih oziroma naročnikih modela.
11. *Pregled rezultatov napovedi čez nekaj časa* – rezultati, ki napovedujejo stanje v prihodnosti, se čez nekaj let pregledajo in primerjajo z izmerjenimi vrednostmi, ki so

takrat že na voljo. S tem se ugotavlja, če so bile napovedi pravilne. Točnost napovedi kaže, da je model primeren za obstoječi problem.

12. *Preoblikovanje modela* – običajno napovedane vrednosti za prihodnost odstopajo od izmerjenih, kar vodi v spremembe konceptualnega modela ali spremembe parametrov modela.

(Nartnik, 2004)

1.6 Kratka predstavitev programa PMWIN

Matematični model podzemne vode bo – kot že rečeno – izdelan s programskim paketom PMWIN (Procesing Modflow for Windows). Programski paket PMWIN je zasnovan za programsko okolje MS WINDOWS. Prvotno je bil namenjen raziskovanju priobalnega območja severne Nemčije. Na začetku je služil samo modeliranju toka podzemne vode na osnovi programske kode MODFLOW, s časom pa so razvijalci programa pričeli vključevati oz. združevati v kompletni sistem za simulacijo sistema podzemne vode še različne dodatne programske pakete (modele oz. pakete). Sedaj je v programski paket PMWIN poleg programa MODFLOW (McDonald in Harbaugh, 1988, 1996) za simulacijo toka podzemne vode in različnih hidroloških obremenitev (vodnjaki, bogatenje, reke in jezera ...) vključen tudi:

- model advekcijskega transporta PMPATH (Chiang in Kinzelbach, 1994, 1998), vključeni pa so tudi
- modeli za simulacijo transporta raztopin
 - MT3D (Zheng, 1990),
 - MT3DMS (Zheng in Wang, 1998) in
 - MOC3D (Konikow, 1996)
- ter inverzna modela (programa za umerjanje modelov oziroma prilagajanje vrednosti parametrov)
 - PEST (Doherty, 1994) in
 - UCODE (Poeter in Hill, 1998).

Programski paket PMWIN (oziroma vključene aplikacije) je tridimenzionalni model, ki za numerično reševanje uporablja metodo končnih razlik s poljem vozlišč centriranih blokov.

Model, narejen s tem programskim paketom, ima lahko do 80 slojev (plasti), v vsakem sloju pa je lahko do 250.000 celic. V simulaciji je možno uporabiti do 1000 časovnih obdobj. Rezultati, ki jih dajejo modeli programskega paketa, so v numerični obliki in lahko vsebujejo: piezometrične višine, relativna znižanja gladine podzemne vode, pritoke in odtok v posameznih celicah, posedanje in zgoščevanje tal, Darcyjeve hitrosti, koncentracije in masne bilance. Programski paket PMWIN poleg zgoraj omenjenih programov vključuje tudi različna orodja, ki uporabniku omogočajo predstavitev rezultatov tudi v slikovni obliki, izvoz rezultatov za nadaljnjo obdelavo, digitalizacijo točk, interpoliranje in izračun vrednosti iz posameznih točk v ostale celice. Na voljo so še orodja za izračun vodne bilance, generiranje heterogenih polj oz. ustvarjanje stohastičnih modelov ter orodje za risanje diagramov oziroma krivulj, ki predstavljajo rezultate simulacije v odvisnosti od časa.

Poleg programa v programu Modflow bom izmed programov iz paketa PMWIN uporabil tudi program PEST (inverse modeling). Program PEST služi avtomatičnemu umerjanju modela. Odvisno od izbranega tipa slojev in parametrov program PEST išče ustrezen set parametrov, za katere je vsota kvadratov odklonov ($\sum \sigma^2$) med izračunanimi vrednostmi in izmerjenimi vrednostmi v opazovalnih vrtinah najmanjša.

(Chiang, W. - H. in Kienzelbach, W., 2003)

Za uporabo paketa PMWIN so na voljo navodila za uporabo, in sicer: 3D-groundwater modeling with PMWIN : a simulation system for modeling groundwater flow and pollution (2003). Navodila za programski paket PMWIN je v slovenski jezik v svoji seminarski nalogi prevedel Miha Nartnik.

1.7 Umetno bogatenje podzemne vode

Umetno bogatenje podzemne vode bi lahko definirali kot človekov namerni vnos površinske vode v vodonosnik. Tak vnos je podoben naravnemu bogatenju podzemne vode s padavinami ali infiltracijo skozi obrežni vodonosnik iz površinskih vod, le da je umetno bogatenje s strani

človeka kontroliran proces. Kontrolirati je mogoče količino, kvaliteto, lokacijo, in časovni razpored bogatenja. Z umetnim bogatenjem je mogoče doseči različne cilje, kot so:

- Kontrola regionalnega hidrološkega režima. Z umetnim bogatenjem vplivamo na dvig gladin podzemne vode, kar pomeni da lahko z spreminjanjem nivojev podzemne vode kontroliramo gibanje podzemne vode in vplivamo na kvaliteto podzemne vode – aktivna zaščita podzemne vode.
- Skladiščenje vode. Zaradi poroznosti vodonosniki lahko vodo v vodonosnik infiltriramo in jo po določenem času iz njega črpamo. Pri tem postopku prihaja do izgub infiltrirane vode, saj podzemna voda nikoli ne miruje in če infiltrirane vode ne uporabimo, le ta počasi odteka z območja bogatenja. Ker pa so hitrosti gibanja podzemne vode relativno majhne, je z primernim upravljanjem mogoče uspešno načrpati večino infiltrirane vode.
- Kontrola kvalitete vode. Z infiltracijo površinske vode v vodonosnik se ta med gibanjem skozi vodonosnik kot rezultat hidrodinamične disperzije meša z naravno podzemno vodo. Z infiltracijo vode z boljšo kvaliteto, kot je kvaliteta podzemne vode, lahko tako izboljšamo kvaliteto načrpane vode. Z infiltracijo vode slabše kvalitete, pa lahko izkoristimo vodonosnik kot počasni filter, ki izboljša kvaliteto infiltrirane vode. Z filtracijo infiltrirane vode skozi nezasičeni del vodonosnika se odstranjujejo in uničujejo mikroorganizmi.

(Bear, 2007)

V večini primerov se umetno bogatenje uporablja za doseganje več ciljev. Primerna je na območjih, kjer je na voljo dovolj obsežen proden vodonosnik za sprejem infiltriranih količin vode in zadostnih količin površinske vode. Možnih je več načinov umetnega bogatenja. Izbira je odvisna od kakovosti surove vode in geoloških lastnosti vodonosnika. Vodo za umetno bogatenje lahko zajamemo direktno iz površinskega vodnega vira, ali pa jo črpamo iz obrežnega vodonosnika. S tako pridobljeno vodo lahko umetno bogatimo podzemno vodo z uporabo:

- infiltracijskih bazenov ali polj,
- negativnih (nalivalnih) vodnjakov,
- horizontalnih galerij in vodnjakov.

Vodnjake, iz katerih črpamo vodo za oskrbo prebivalcev s pitno vodo, postavljamo med zajem površinske vode in infiltracijski objekt tako, da je možno napajanje iz obeh smeri. Prednost umetnega bogatenja je v tem, da nam omogoča črpanje večjih količin vode iz podzemne vode na manjšem območju in da nam omogoča kontrolo vhodne in izhodne vode. Negativna stran pa je, da so razlike v temperaturi pri načrpani vodi višje kot pri naravni podzemni vodi.

Umetno bogatenje nam omogoča še dodatno varovanje vodnega vira, saj ga lahko uporabimo v smislu aktivne zaščite vodnega vira. S pravilno postavitvijo infiltracijskih vodnjakov ali polj lahko preprečimo, da bi v črpalne vodnjake pritekala onesnažena podzemna voda.

(Rus, 1985)

2 PODZEMNA VODA V SPODNJI SAVINJSKI DOLINI

2.1 Zgodovina izkoriščanja podzemne vode na območju Medloga

Mesto Celje se je od davne preteklosti do začetka 20. stoletja napajalo iz vodnjakov in izvirov v svoji okolici. Za rojstno leto celjskega vodovoda velja letnica 1908, ko je bil zgrajen vodovod iz Vitanja, kjer so našli dva vrelca, ki bi naj pokrivala potrebe mesta še za prihodnjih petdeset let. Vendar količine niso zadoščale tako dolgo. Pomanjkanje vode je bilo vedno večje, to je še posebno čutil okupator, ki je imel v mestu številno vojaštvo. Na osnovi predhodnih raziskav so nemški strokovnjaki leta 1943 zgradili prvi vodnjak (A) v Medlogu z drenažo in ga povezali z mestnim omrežjem. Zaradi pomanjkanja vode so bili leta 1968 zgrajeni vodnjaki B, C in D. V letih 1975–1977 je bilo ponovno zelo občutno pomanjkanje vode, zato sta bila zgrajena v Medlogu še vodnjaka E in F. Leta 1986 je bil zgrajen zadnji vodnjak – vodnjak H z zmogljivostjo 8 l/s, ki pa ni bil dolgo v uporabi in je bil leta 2003 zaradi izgradnje avtocestnega priključka Celje zahod opuščen.

(Volfand, 1998)

2.2 Črpanje podzemne vode v Medlogu in poraba vode v Celju

2.2.1 Opis vodovodnega omrežja Celje

Javno podjetje Vodovod – kanalizacija, d.o.o. upravlja vodovodni sistem, iz katerega se oskrbuje z vodo približno 59.000 prebivalcev občin Celje, Vojnik, Štore in Žalec. Vodovodni sistem Celje je zasnovan krožno. Gravitacijsko doteka v sistem približno 200 l/s vode iz Vitanja in 50 l/s vode iz vrtine Toplice na Frankolovem. Preostalih potrebnih 50–100 l/s pitne vode se v času pomanjkanja zadostnih količin vode iz vitanjskih virov in Frankolovega črpa iz črpališč v Medlogu.

(Volfand, 1998)

2.2.2 Medloški vodni vir

Podzemna voda v Medlogu se po potrebi črpa iz sedmih vodnjakov (vodnjaki A, B, C, D, E, F, G). Maksimalne količine načrpane vode do omejene z vodnim dovoljenjem št. 35527-24/2005-4, ki ga je izdalo Ministrstvo za okolje in prostor. Maksimalne dovoljene količine črpanja vode iz posameznih vodnjakov so prikazane v preglednici 1. Pred vstopom v vodovodno omrežje se načrpana podzemna voda čisti v čistilni napravi, ki obsega naslednje postopke:

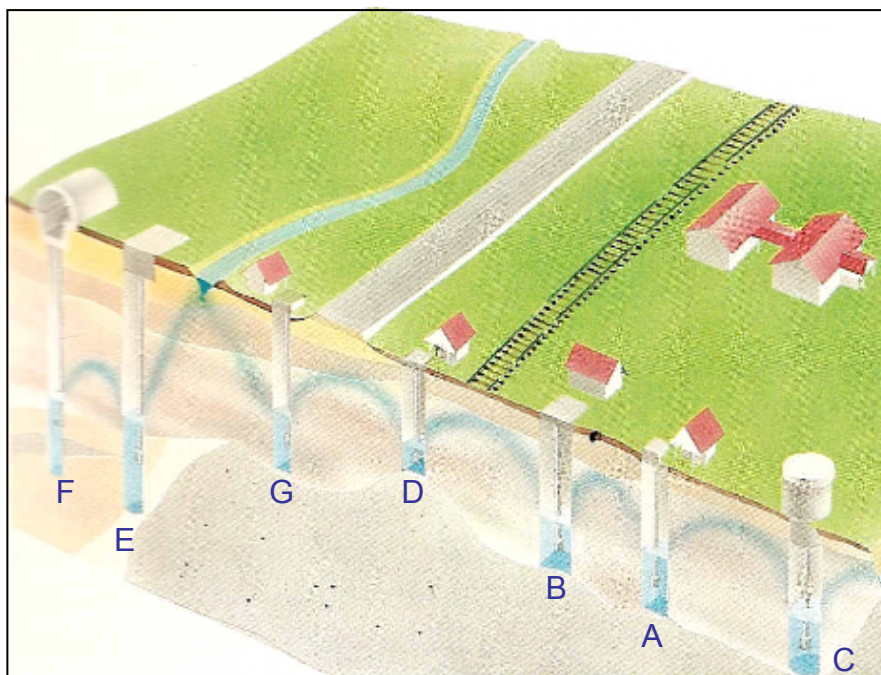
- ozoniranje,
- filtracijo s hitrimi peščenimi filtri,
- filtracijo z aktivnim ogljem,
- kloriranje s plinskim klorom.

Preglednica 1: Maksimalne količine načrpane vode iz posameznih vodnjakov. (Vodno dovoljenje št. 35527-24/2005-4).

Table 1: Maximum quantities of the extracted groundwater from the wells. (Vodno dovoljenje št. 35527-24/2005-4).

Vodnjak	A	B	C	D	E	F	G	skupaj
dovoljeno v vodnem dovoljenju [l/s]	35	32	10	10	60	15	50	212
trenutni maksimalni odvzem [l/s]	35	32	10	10	42	15	50	194
maksimalni letni odvzem po vodnem dovoljenju [1000 m ³]	225	90	5	85	800	5	90	1.300

V postopku čiščenja se iz surove vode odstranjujejo pesticidi, topila ter mangan in železo, ki se pojavljata v vodi iz vodnjakov G, E in F. Pred vstopom vode v vodovodno omrežje se vsa načrpana voda preventivno klorira s plinskim klorom. Slika 2 prikazuje zajem podzemne vode v Medlogu.



Slika 2: Prikaz zajema podzemne vode v Medlogu (Vodovod – kanalizacija, 1998)

Fig. 2: Groundwater extraction in Medlog (Vodovod – kanalizacija, 1998)

V medloški podzemni vodi že od leta 1983 dalje ugotavljajo povišane koncentracije nitratov, ki so posledica intenzivne kmetijske proizvodnje na celotnem prilivnem območju vodnega vira. Glede na zadostne količine vode iz Vitanja in vrtine Toplice na Frankolovem, se lahko v času stabilnih vremenskih razmer brez padavin oskrbuje z vodo iz vitanjskih vodnih virov in Frankolovega celotno stanovanjsko območje mesta, vključno z industrijskimi območji. Črpališča v Medlogu v takšnih razmerah ne obratujejo. V deževnem obdobju ob pomanjkanju zadostnih količin vode iz Vitanja in Frankolovega, se z medloško podzemno vodo oskrbuje le še del industrijskega območja. Stanovanjska območja mesta in preostali del industrijskega območja pa se v takšnih obdobjih oskrbuje z mešano vodo – vodo iz Vitanja in Frankolovega, ki se ji po potrebi dodaja medloška podzemna voda.

Vsi vodnjaki so v stalni pripravljenosti in jih je mogoče v primeru potreb takoj vključiti v obratovanje. Takšna pripravljenost celotnega sistema črpališč v Medlogu je nujno potrebna zaradi nestabilnosti vitanjskih vodnih virov v času intenzivnejših oziroma dolgotrajnejših padavin (problem povišane kalnosti) ali v primeru suše.

(Vodovod – kanalizacija, 2006)

2.3 Problematika vodnega vira Medlog

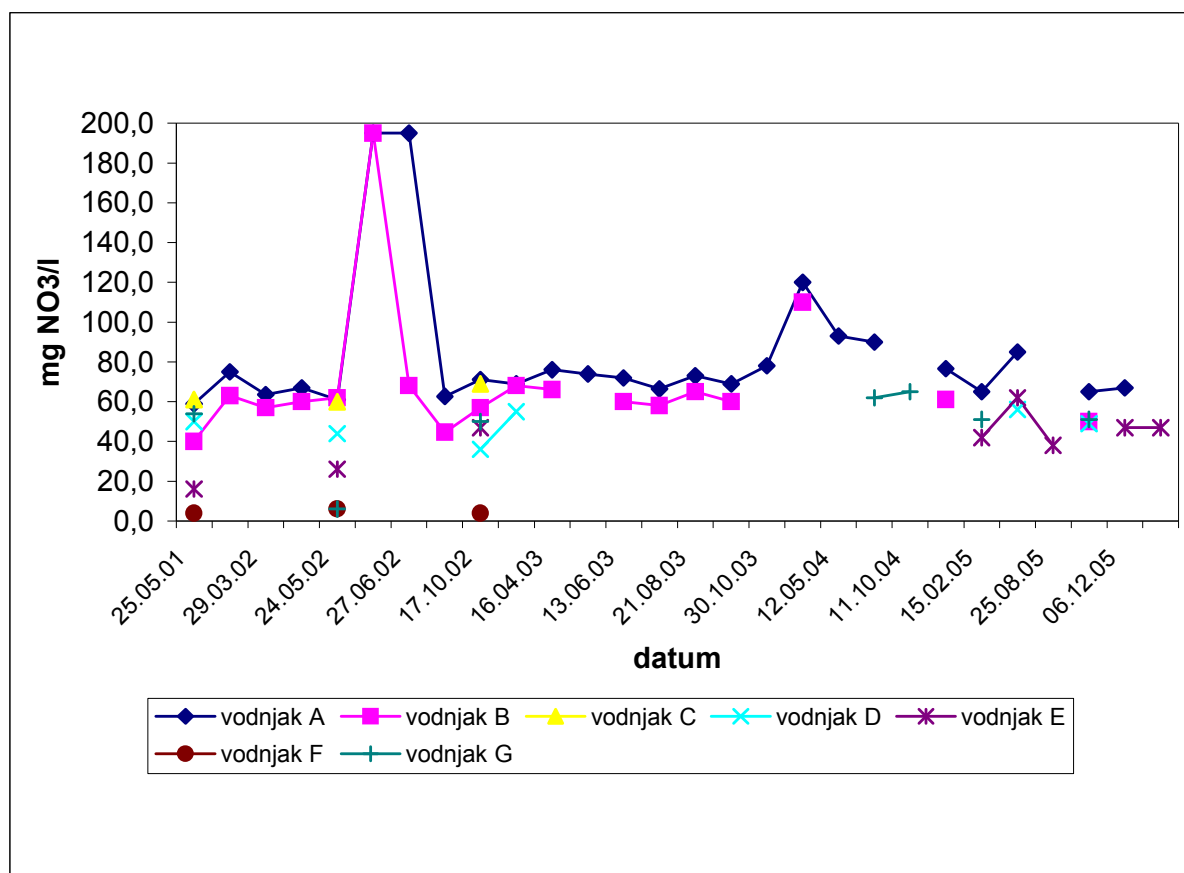
V letu 1978 so v enem od medloških vodnjakov ugotovili zelo visoke količine mangana. Z izgradnjo vodarne Medlog in z uvedenim čiščenjem vode z ozonacijo in filtriranjem skozi hitre filtre je bil problem mangana v letu 1983 odpravljen.

V začetku devetdesetih let so v medloški vodi zaznali povišano vsebnost nitratov. Pojav nitratov v podzemni vodi v Medlogu ni nobena posebnost, saj je znano, da se prevelika vsebnost nitratov v pitni vodi pojavlja povsod, kjer se za pitno vodo uporablja podzemna voda iz predelov z intenzivno kmetijsko proizvodnjo. Problem nitratov v celjskem vodovodu je še vedno aktualen. Gibanje koncentracij nitratov v obdobju od leta 2001 do leta 2005 je prikazano na sliki 3. Zaradi intenzivne kmetijske proizvodnje se v pitni vodi pojavljajo tudi pesticidi. Mejne vrednosti za koncentracijo nitratov v pitni vodi po Pravilniku o pitni vodi (Ur. l. RS št. 19/2004) znašajo 50 mg NO₃/l, za pesticide pa 10 µg/l.

Problem povišanih koncentracij nitratov v vodovodnem omrežju je bil začasno rešen tako, da se vodovod Celje v glavnem napaja z vodo iz virov Vitanje in Frankolovo, ki ne vsebujeta nitratov. Čista medloška voda, ki je obremenjena z nitrati, je namenjena izključno industrijskemu območju v tehnološke namene. Omrežje za oskrbo gospodinjstev, ki se je prej oskrbovalo z medloško vodo, se oskrbuje z mešano vodo, ki nastane z mešanjem medloške in vitanjske vode. Voda se meša preko povezovalnega cevovoda. V mešanici so vrednosti nitratov v dovoljenih mejah. Povišane koncentracije nitratov v omrežju se lahko pojavijo le ob daljšem sušnem obdobju, ko se zmanjša izdatnost ostalih virov in pri močnem deževju, ko je zaradi kaljenja potrebno vire z območja Vitanja in Frankolovega izključiti iz uporabe. V obeh primerih se potrebne količine vode črpajo iz vodnjakov v Medlogu.

Previsoka vrednost nitratov na omrežju vodovoda Celje je kljub mešanju vode še vedno problem, ki zahteva strokovni nadzor in rešitve.

(Vodovod – kanalizacija, 2008)

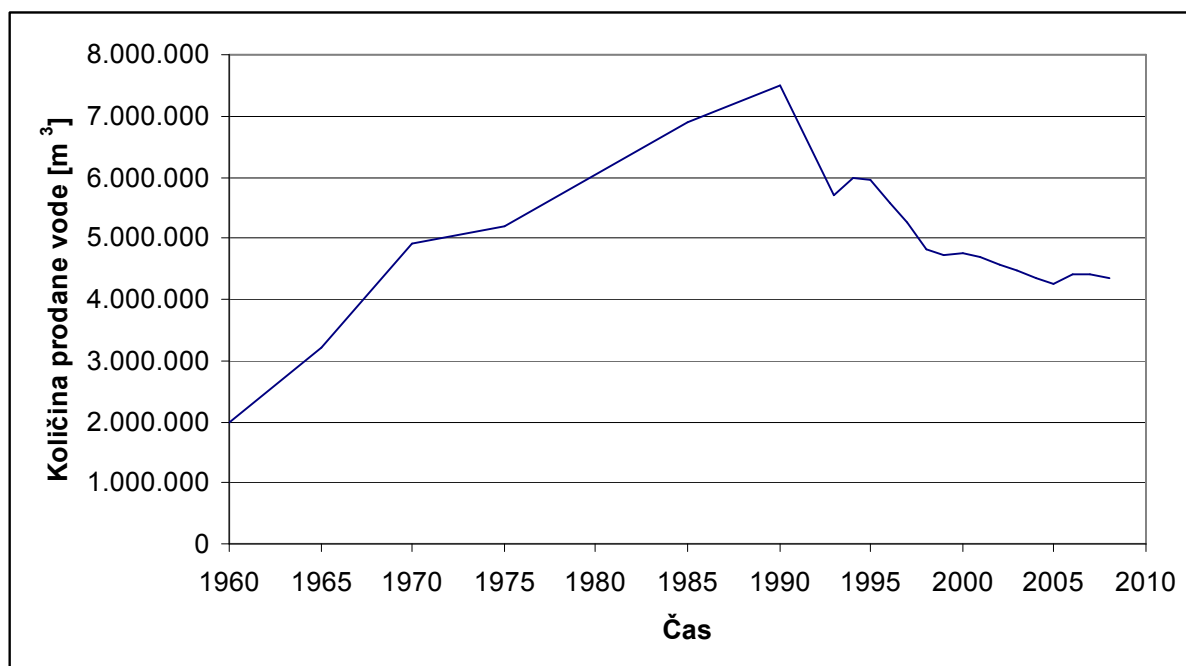


Slika 3: Gibanje koncentracij nitratov v vodnjakih v Medlogu od 2001 do 2006 (Vodovod – kanalizacija, 2006)

Fig. 3: Concentration of Nitrate in groundwater pumped from wells in Medlog from 2001 to 2006 (Vodovod – kanalizacija, 2006)

2.4 Poraba vode v Celju

V zadnjem desetletju je prodaja vode v Celju upadla. Na sliki 4 vidimo, da se je od leta 1990 prodaja vode precej zmanjšala. Vzroka za upad sta dva. Prvi je prestrukturiranje gospodarstva, drugi pa varčevanje z vodo v gospodinjstvih. Podobno se dogaja v razviti Evropi, ki odklanja miselnost o čim večji porabi vode in o zagotavljanju novih in novih vodnih virov. Nadomešča jo zavest o nujnem zavarovanju obstoječih vodnih virov, o sanaciji obstoječih sistemov, ki naj bi preprečili nesmotrne izgube vode in o racionalni porabi te naravno omejene dobrine.



Slika 4: Gibanje porabe pitne vode v Celju v obdobju od 1960 do 2008 (Vodovod – kanalizacija, 2009)

Fig. 4: Consumption of drinking water in Celje from 1960 till 2008

2.5 Hidrogeološke karakteristike vodonosnika Spodnje Savinjske doline

Celjska kotlina je geološko vzeto, pogreznjena gruda, ki jo na severu, zahodu in jugu omejujejo prelomi, le na vzhodu mehko prehaja na sotelsko stran. Zahodni del kotline zapira Dobroveljska planota kot odrastek višje Menine, na jugu so mejniki kopaste gore Posavskega hribovja z najvišjo Čemšeniško planino in tisočaki Kisovcem, Mrzlico in Gozdnikom. Obzorje na severu zapirajo tudi nad tisočmetske, vendar malo bolj oddaljene gore med Paškim Kozjakom in Bočem.

(Gaberšček, 1988)

2.5.1 Karakteristike vodonosnika v Medlogu

Debelina prodnega nanosa v Medlogu je od 3,5 do 18 m. Na širšem območju Medloga imamo na severnem delu opraviti z zaprtim vodonosnikom, ki v smeri proti Savinji preide v odprti vodonosnik. Tako je južnejši del vodonosnika bolj izpostavljen vplivom onesnaženja kot severni. Krovna nepropustna plast je tanka in predstavlja slabo zaščito podzemne vode pred onesnaženjem s površja. Koeficient prepustnosti variira med 10^{-3} in 10^{-4} m/s. Efektivna poroznost vodonosnika pa je 0,2. Podzemna voda se nahaja razmeroma plitvo, to je povprečno 2 m pod površino. Zaradi opisanih lastnosti vodonosnika v Medlogu je potrebno pozorno načrtovati umetno bogatenje, saj obstaja nevarnost, da bi se gladina podzemne vode preveč dvignila in bi se s tem preveč skrajšala pot infiltriranim padavinam. Padavine s kmetijskih površin spirajo hranilne snovi, kar bi tako pomenilo bistveno poslabšanje kvalitete podzemne vode.

(Rismal, 1986)

Območje zajetij na območju Medloga se glede na hidrogeološke pogoje deli na dva dela, in sicer na območje stare vodarne med cesto in strugo Savinje, kjer so bili skopani prvi vodnjaki, ter novo črpališče, ki leži severno od ceste in na območju letališča. Na območju stare vodarne se nahajajo štirje kopani vodnjaki. Vodonosna plast je tu debela od 1,1 m do 5,7 m in je zelo prepustna. Pod prepustnimi peščeno-prodnimi sedimenti ležijo terciarni neprepustni sedimenti. Na desnem bregu Savinje je terciarni laprovec in tuf na površini, proti severu pa tone pod kvartarni zasip. Tako visoka lega nepropustne podlage povzroča, da v času visokega vodostaja Savinja direktno zateka v kvartarno – prodni zasip, iz katerega se napajajo vodnjaki. V času nizkega vodostaja je gladina podtalne vode približno 2 m pod površino, ob visokih vodah pa se močno približa koti terena. Območje novih vodnjakov obsega ravničasto ozemlje med Medlogom in Levcem (severno od ceste). Zapolnjeno je s kvartarnimi in terciarnimi sedimenti. Raziskave so pokazale, da se nahaja med cesto in severnim obrobjem kotline večja depresija oziroma staro rečno korito, ki je zarezano v terciarno nepropustno podlago in zasuto s peščeno-prodnim zasipom. Nepropustna podlaga je na območju novih vodnjakov G, E in F približno 5 do 18 m globoko.

(Gaberšček, 1988)

2.5.2 Primernost vodonosnika v Medlogu za umetno bogatenje

Umetno bogatenje podzemne vode na območju Medloga bi bilo smiselno uporabiti za doseganje dveh ciljev. Prvi cilj je povečanje izdatnosti vodnjakov na območju Medloga, saj je vodonosnik na tem območju razmeroma plitev in so zaradi tega količine črpanja podzemne vode precej omejene. Drugi cilj pa je izboljšanje kvalitete podzemne vode, predvsem znižanje koncentracij nitratov v načrpani vodi.

Možnosti za uporabo umetnega bogatenja v Medlogu so bile v preteklosti že analizirane in sicer v naslednjih dokumentih:

- Rus, A., 1985. Umetno bogatenje podzemne vode za vodovod Celje. Diplomsko delo.
- Rismal, M., 1986. Študija umetnega bogatenja podzemne vode za povečanje zmogljivosti črpališč vodovoda Celja v Medlogu.

Institut za zdravstveno hidrotehniko (IZH) iz Ljubljane je izvedel v Medlogu tudi pilotne preizkuse umetnega bogatenja podzemne vode v Medlogu z vodo iz reke Savinje.

Rezultati navedenih raziskav in analiz so pokazali, da je podzemna voda v Medlogu primerna za uporabo umetnega bogatenja kot načina priprave pitne vode. V nadaljevanju bom najprej povzel predlagano rešitev iz leta 1985 in primerjal biološke ter kemijske parametre vode iz reke Savinje iz let 1985 in 2004.

V nadaljevanju bom povzel že predlagane rešitve uporabe umetnega bogatenja na področju Medloga in k temu dodal še svoje predloge glede novih možnosti uporabe umetnega bogatenja oz. sprememb že predlaganih rešitev.

2.6 Primernost vode iz reke Savinje za umetno bogatenje

Agencija RS za okolje (v nadaljevanju ARSO) je posredovala rezultate kemijskih in bioloških analiz vode iz reke Savinje v letih od 2001 do 2005 na vzorčnem mestu Medloga. Preglednica 2 prikazuje kemijske in bakteriološko stanje glede na izbrane parametre v obdobju od 2001 do

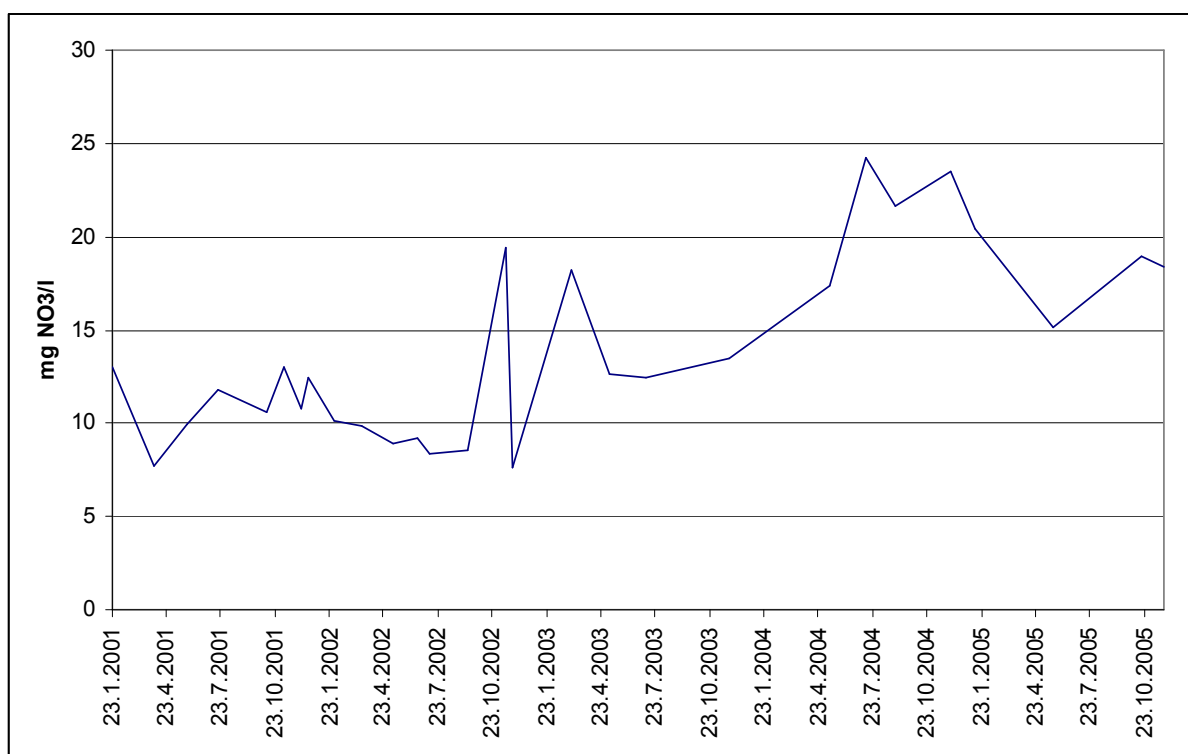
2005. Za primerjavo so dodani podatke o maksimalnih izmerjenih koncentracijah v letu 1984, ko je bila izdelana študija umetnega bogatenja s strani IZH.

Preglednica 2: Rezultati preiskav vode iz reke Savinje, merilno mesto Medlog, šifra postaje 6120. (Jesenovec, 2008).

Table 2: Results of analyses of water from river Savinja; sampling spot Medlog, measuring station no. 6120. (Jesenovec, 2008)

Parameter	enota	max. 1984	max. (2001–2004)	povprečje (2001–2004)	MDK
temperatura zraka	°C	21	29,2	15,807	
temperatura vode	°C	18,1	25,4	12,731	
barva	mgPt/l	6	13,3	5,722	
pH	-	8,2	8,8	8,179	> 6,5 in < 9,5
električna prevodnost (25 0C)	µS/cm	310	524	420	2500
kisik	mg O ₂ /l	10,8	20,5	13,2	5
nasičenost s kisikom	%	117,8	186	126,0	
suspendirane snovi po sušenju	mg/l	28,4	25,6	7,01	
suspendirane snovi po žarjenju	mg/l	22,0	23,2	5,62	
filtrirane izparine po sušenju	mg/l	266	295	247	
filtrirane izparine žar. ostane	mg/l	195	209	163	
filtrirane izparine žar. izguba	mg/l	71	106	85	
KPK s KMnO ₄	mg O ₂ /l	2,5	2,9	1,95	
KPK s K ₂ Cr ₂ O ₇	mg O ₂ /l	8,5	11	7,21	
BPK ₅	mg O ₂ /l	2,7	4,5	2,55	
TOC	mg C/l		4,5	2,18	
TOC sed.	%		4,2	3,07	
skupni dušik TN	mg N/l		5,5	3,39	
amonij	mg NH ₄ /l	0,08	5,34	0,48	0,5
nitriti	mg NO ₂ /l	0,11	0,18	0,10	0,5
nitрати	mg NO ₃ /l	9,80	24,25	14,20	50
fosfor (skupno)	mg PO ₄ /l	0,12	0,26	0,140	
celotni fosfor – nefiltriran	mg PO ₄ /l		0,27	0,18	
skupne koliformne bakterije	MPN/l	380.000	90.000	42.444	0
koliformne bakterije fekalnega izvora	MPN/100ml		9.000	2.476	0
streptokoki fekalnega izvora	MPN/100ml		1.600	428	

Po primerjavi podatkov o kakovosti vode iz Savinje iz leta 1984 in podatkov iz obdobja 2001–2005 ugotovim, da so se maksimalne izmerjene vrednosti v večini primerov povečale (od leta 1984 do danes). Višje pa so predvsem koncentracije dušikovih spojin, še posebej nitrata in amonija, ter fosforja. Koncentracije nitratov v Savinji (glej sliko 5) so nižje kot v podzemni vodi, kjer v vodnjaku A znaša povprečna koncentracija nitratov 65 mg/l. Zmanjšala se je količina koliformnih bakterij, in to kar za 76 %. Sklepam lahko, da je voda iz Savinje obremenjena predvsem z emisijami iz kmetijstva in naseljenih območij z neurejenim odvajanjem in čiščenjem odpadnih voda.



Slika 5: Gibanje koncentracij nitratov v Savinji v obdobju od 2001 do 2005 (Jesenovec, 2008)

Fig. 5: Concentration of Nitrate in Savinja river from 2001 till 2005 (Jesenovec, 2008)

Glede na podatke o kakovosti vode lahko zaključim, da bi z infiltracijo vode iz Savinje lahko znižali koncentracije nitratov v načrpani podzemni vodi. Koncentracije nitratov v vodi iz Savinje so namreč približno trikrat nižje kot v podzemni vodi, kar bi pomenilo, da bi se z infiltracijo vode iz Savinje v podzemno vodo zaradi redčenja, koncentracije nitratov v načrpani vodi znižale. Pred infiltracijo pa bil bilo potrebno vodo iz Savinje primerno obdelati.

Predvsem so problematični suspendirani delci, ki bil lahko povzročali mašenje infiltracijskih vodnjakov. Zato bi bilo potrebno pred infiltracijo iz surove vode odstraniti suspendirane snovi z sedimentacijo na lamelnem usedalniku, filtracijo skozi hitre peščene filtre. Po filtraciji bi se voda še aerirala, kar bi zagotovilo, da bi imel infiltrat zadostno količino raztopljenega kisika za oksigenacijo podzemne vode. Postopek predpriprave vode, je torej takšen kot bil predlagan v letu 1985 (oz. je le-tega potrebno še nadgraditi).

3 MODEL PODZEMNE VODE V SPODNJI SAVINJSKI DOLINI

3.1 Konceptualni model

Model za potrebe te magistrske naloge je bil izdelan s programskim paketom PMWIN, in sicer gre za napovedovalni tridimenzionalni matematični model podzemne vode na območju Spodnje Savinjske doline.

3.1.1 Območje modela

Območje modeliranja za naš model obsega vodonosnik Spodnje Savinjske doline med naseljema Žalec in Celje. Meje modela na jugu predstavlja struga reke Savinje, na severu pa meja vodonosnika, ki jo določa gričevnat svet, ob katerem se končajo aluvialne vodonosne plasti. Na vzhodu je meja vodonosnika postavljena na sotočje Ložnice s Savinjo, na zahodu pa je meja modela v višini naselja Žalec.

Območje modela je pravokotne oblike (dolžine 6.500 m in širine 3.800 m) in se tako nahaja med naslednjima skrajnika točkama v Gauss-Krügerjevem koordinatnem sistemu:

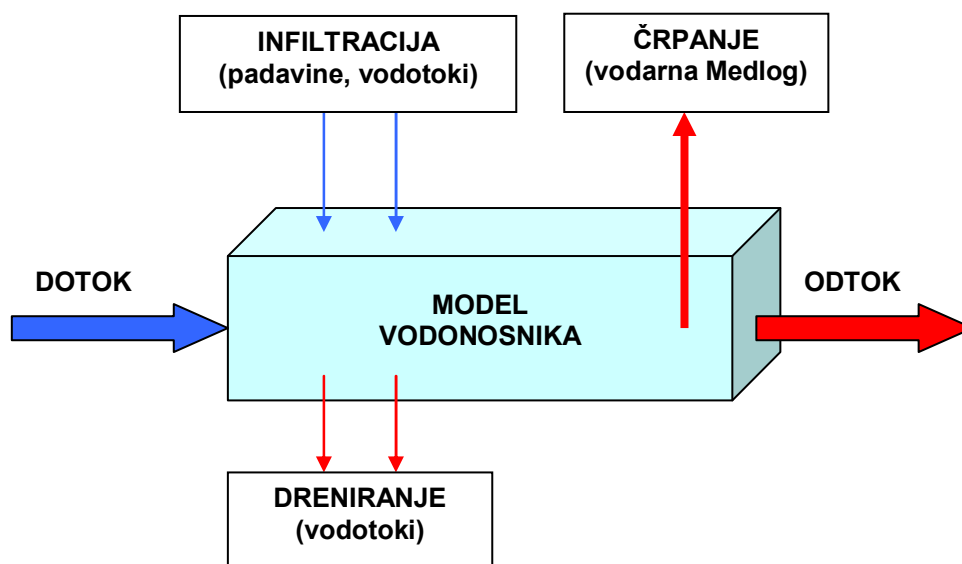
- Koordinate skrajne jugozahodne točke:
 - X: 512.895,
 - Y: 120.765.
- Koordinate skrajne severovzhodne točke
 - X: 519.395,
 - Y: 124.565.

Območje modela je grafično prikazano v prilogi A.

Velikost osnovne celice modela meri 25×25 m. Na mestih, kjer se nahajajo vodnjaki, pa je mreža zgoščena tako, da so celice razdeljene na devet manjših z velikostjo posamezne celice $8,33 \times 8,33$ m.

3.1.2 Vodna bilanca

Vodna bilanca modela je prikazana na sliki 6. Predstavljeni so ključni elementi, ki vplivajo na gladino podzemne vode na območju vodonosnika, ki je predmet modeliranja.



Slika 6: Grafični prikaz vodne bilance modela

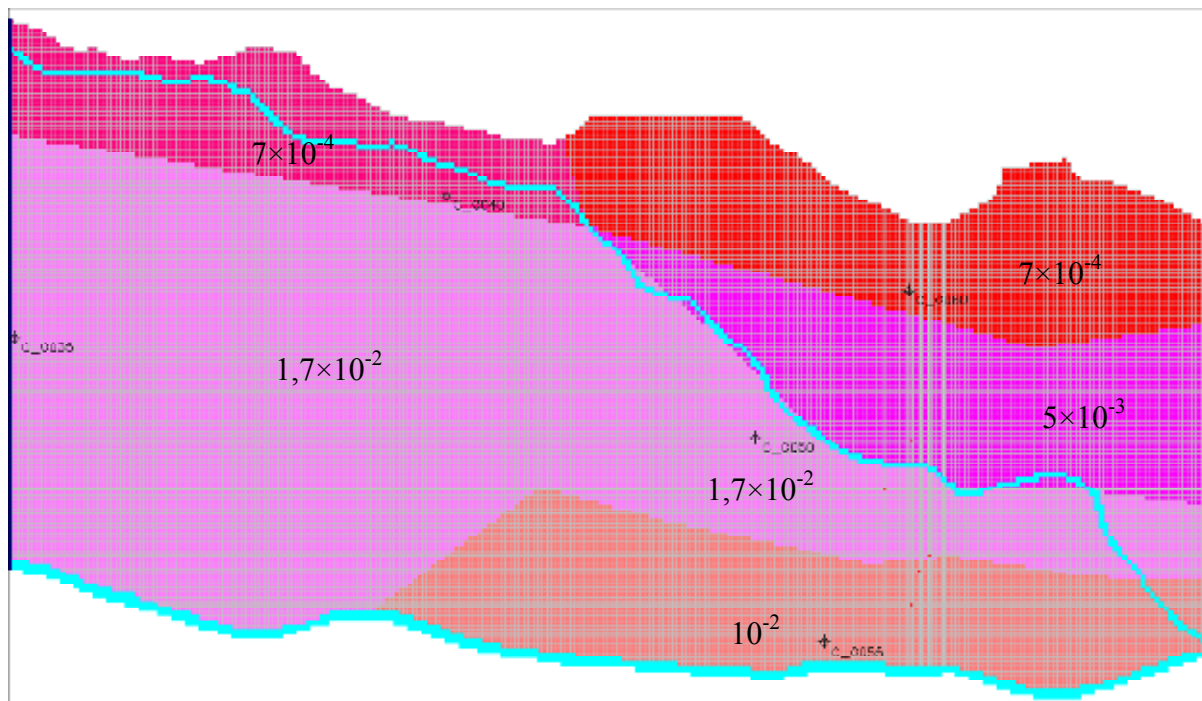
Fig. 6: Water budget of the model

3.1.3 Geološka zgradba modela

Glede na pridobljene podatke bom vodonosnik obravnaval kot vodonosnik z dvema slojema, saj je razlika med hidravlično prepustnostjo zgornjega in spodnjega sloja zelo velika. Koeficienti hidravlične prepustnosti za spodnji slabše prepustni sloj znašajo okoli 10^{-5} m/s, medtem ko se v zgornjem boljše prepustnem sloju gibljejo med 2×10^{-2} m/s in 5×10^{-5} m/s. Hidravlična prepustnost gornjega sloja je največja na območju med Savinjo in Ložnico, od reke Ložnice proti severu pa upada. (Drobne in Mencej, 1984).

Koeficientov prepustnosti vodonosnika zahodno od območja vodnjakov in ob severnem robu vodonosnika v razpoložljivi literaturi in virih nisem zasledil, zato sem vrednosti predpostavil, kot so prikazane na sliki 8, in jih nato korigiral v postopku umerjanja modela. Geološka karta

območja modela je priložena v prilogi C. Za vertikalni koeficient prepustnosti sem predpostavil, da je enak po celotnem območju modela in da znaša 10^{-4} m/s.



Slika 7: Prikaz predpostavljenih koeficientov hidravlične prepustnosti gornjega sloja

Fig. 7: Estimated hydraulic conductivity coefficients of the upper layer

Efektivno poroznost vodonosnika sem povzel po avtorjih prejšnjih matematičnih modelov na obravnavanem območju (Brenčič, 2002), ki so uporabili vrednost 0,2, ter predpostavil, da je enaka po celotnem območju modela. Podatkov o specifičnem uskladišenju in specifični izdatnosti, ki sta potrebna za izdelavo dinamičnega modela v razpoložljivih virih in literaturi za obravnavano območje ni bilo navedenih. Za specifično skladiščenje sem glede na priporočila v navodilih za uporabo programa PMWIN predpostavil vrednost $0,001 \text{ m}^{-1}$. Specifična izdatnost je praviloma nižja od efektivne poroznosti, zato sem glede na priporočila iz literature (Todd in Mays, 2005) za specifično izdatnost predpostavil nekoliko nižjo vrednost kot za efektivno poroznost vodonosnika, in sicer 0,16. Za specifično skladiščenje in izcejanje sem predpostavil, da se na območju modela ne spreminjata.

3.1.4 Geometrija vodonosnika na obravnavanem območju

Podatki o geometriji vodonosnika so povzeti po naslednjih virih:

1. Ježek, R., 1977: Študija ureditve Savinje: Študija stabilnosti korita reke Savinje v km 24,580 – 38,079.
2. Brenčič, M., Janža, M., 2002: Vpliv izgradnje bencinskega servisa na zahodni celjski obvoznici na podzemno vodo vodonosnika vodarne Medlog Levec.
3. Brenčič, M., 1998: Strokovne podlage za zaščito virov pitne vode vzdolž priključka Celje zahod.

Največ podatkov o geometriji vodonosnika se nahaja v študiji o stabilnosti korita Savinje, v kateri so priloženi hidrogeološki profili obravnavanega območja in karte z vrisanimi plastnicami nepropustne podlage ter plastnicami meje med bolj in slabše prepustnim slojem. Preostala dva vira z vidika geometrije vodonosnika povzemata podatke iz že omenjene študije. V obdobju od leta 1977 so bile na območju Medloga izdelane številne vrtine, vendar hidrogeološki podatki niso nikjer zbrani, oz. ni teh podatkov nisem uspel najti.

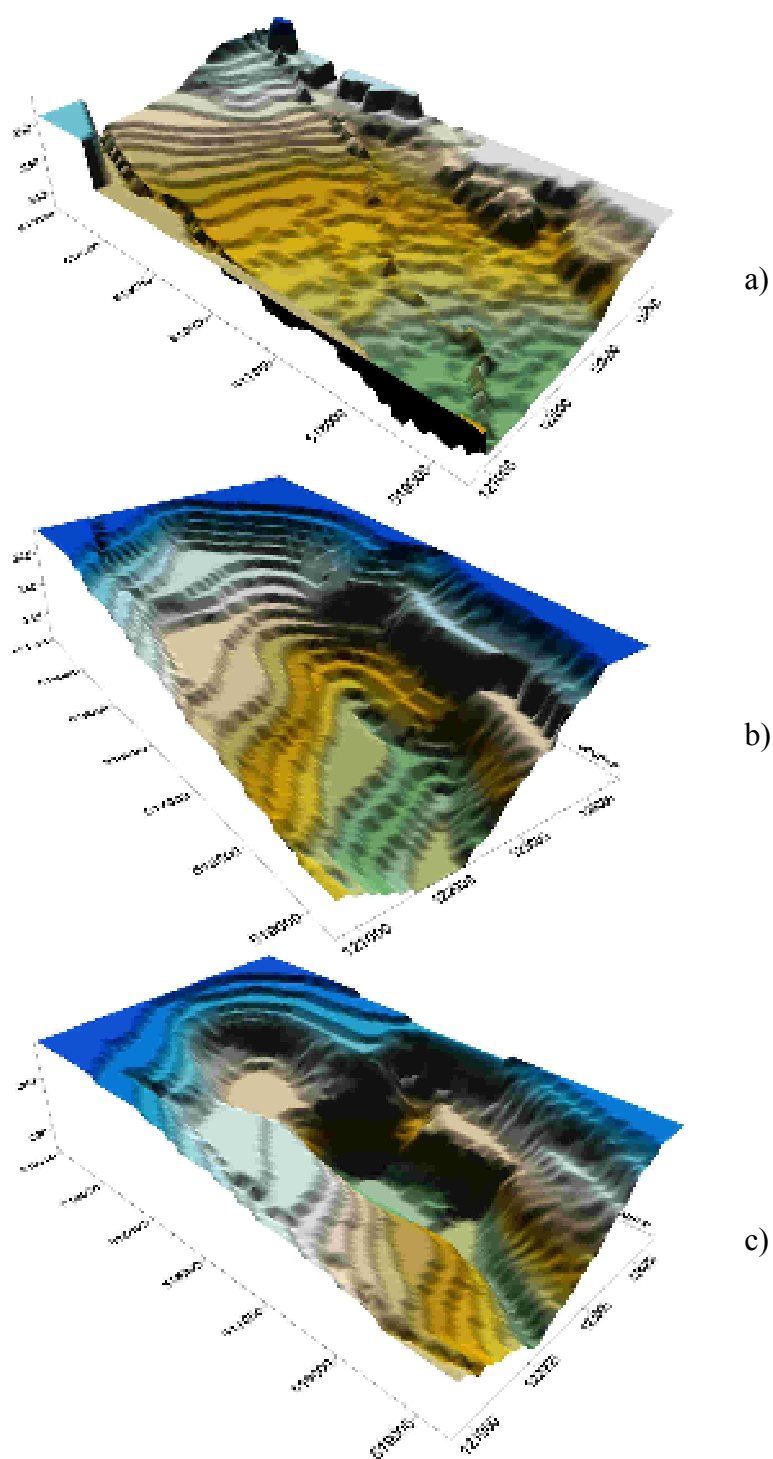
Podatke o geometriji vodonosnika sem zbral in uredil s pomočjo programov »AutoCad« in »ArcView«. Izohipse posameznih slojev vodonosnika so prikazane v prilogi B. Poreklo podatkov uporabljenih za izdelavo modela je prikazano v preglednici 3.

Preglednica 3: Poreklo podatkov uporabljenih za izdelavo modela

Table 3: Origin of data used for model development

Vrsta podatka	Vir podatki
meje vodonosnika	ARSO, WFS ARSO, http://gis.arso.gov.si .
višine nepropustne podlage	Študija stabilnosti korita reke Savinje v km 24,580–38,079, HDP Brno, Polytechna – Hydroprojekt.
višine meje med dvema slojema vodonosnika	Študija stabilnosti korita reke Savinje v km 24,580–38,079, HDP Brno, Polytechna-Hydroprojekt.
višine površja	Temeljni topografski načrt v merilu 1 : 5000.
vodotoki	ARSO, WFS ARSO, http://gis.arso.gov.si ; Študija stabilnosti korita reke Savinje v km 24,580–38,079, HDP Brno, Polytechna-Hydroprojekt.

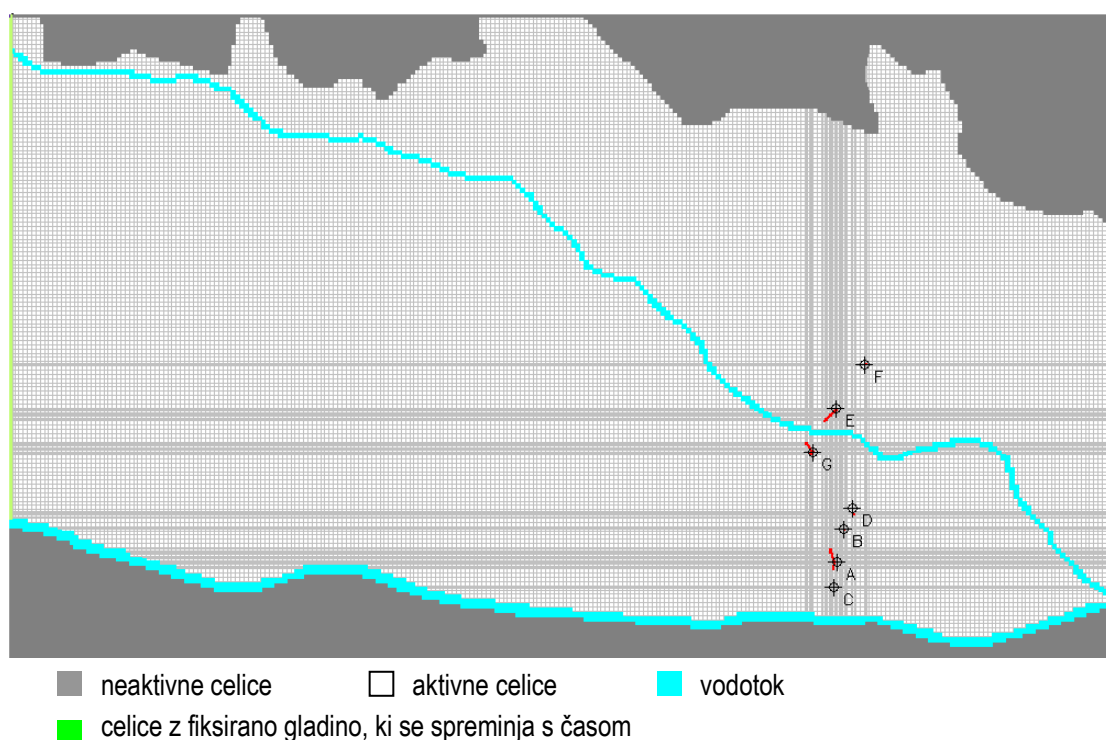
Podatke sem v model prenesel tako, da sem v program »PMWIN« uvozil kot podlage opisane podatke v obliki *.DXF datotek. Posamezne datoteke s plastnicami različnih slojev sem nato digitaliziral z uporabo orodja »Digitizer« v programu »PMWIN«. Ekvidistanca plastnic nepropustne podlage, plastnic meje med obema slojema vodonosnika ter plastnic površja, ki sem jih uporabil za izdelavo modela, znaša 1 m. Podatki po vnosu v Program »PMWIN« so prikazani na sliki 7.



Slika 8: Grafični prikaz geometrije modela: a) geometrija zemeljskega površja, b) geometrija meje med bolj in slabše prepustnim delom vodonosnika, c) geometrija neprepustne podlage
Fig. 8: Geometry of the model: a) geometry of landscape, b) geometry of boundary between the aquifer layers, c) geometry of watertight base

3.1.5 Robni pogoji

Robna pogoja modela na zahodni in vzhodni strani območja modeliranja predstavljajo celice s stalno gladino. Na južnem robu modela predstavlja robni pogoj reka Savinja na severnem robu pa rob vodonosnika. Robni pogoji so prikazani v sliki 9. Stalna gladina v robnih celicah je bila določena na osnovi karte gladin podzemne vode. Najpodrobnejša karta gladin podzemne vode na obravnavanem območju je bila izdelana v sklopu izdelave študije stabilnosti rečnega dna reke Savinje. Vendar se je na območju Medloga v osemdesetih letih z različnimi posegi spreminjala struga Savinje, kar je vplivalo na povezavo med Savinjo in podzemno vodo. Tako sem kot osnovo za določitev gladin v celicah s fiksno gladino uporabil najnovejšo karto s karakterističnim stanjem gladin podzemne vode, ki jo je izdelala ARSO in sicer za obdobje od 12 do 18 avgusta leta 2000. Karta gladin je prikazana v prilogi D.



Slika 9: Prikaz robnih pogojev modela

Fig. 9: Boundary conditions of the model

Ekvidistanca med hidroizohipsami na karti gladin iz avgusta leta 2000 znaša 5 m, zato sem pred vnosom podatkov izvedel interpolacijo hidroizohips in jih uvozil v program PMWIN, kjer sem z uporabo orodja »Digitizer« pripravil vhodno datoteko z začetnimi gladinami.

3.1.6 Nivo podzemne vode

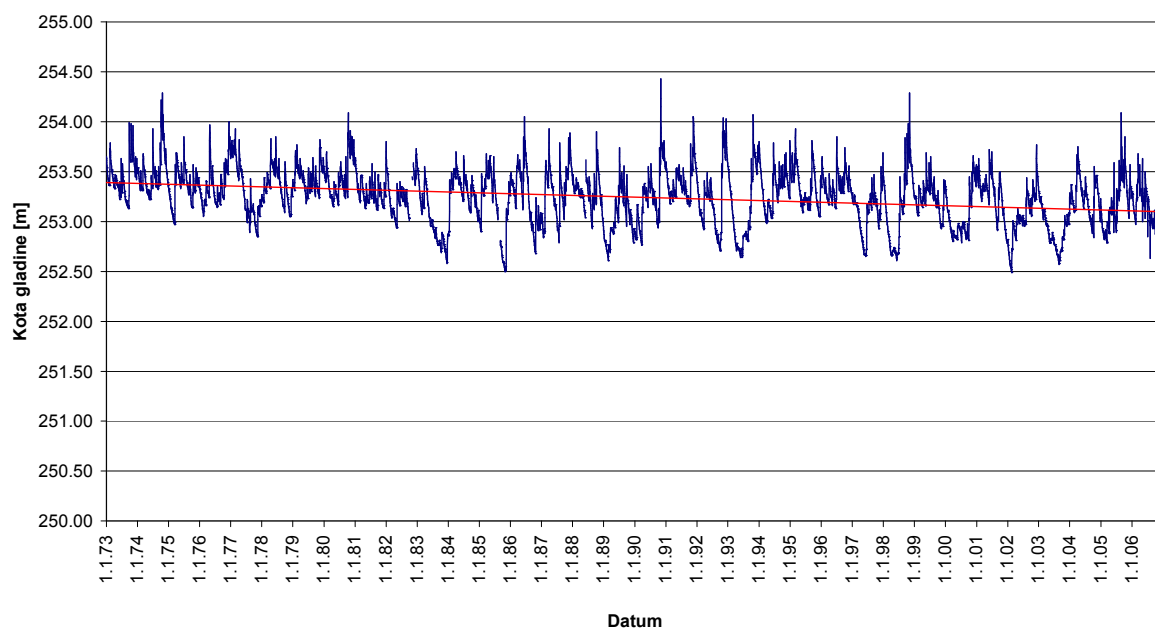
Na obravnavanem območju se nahaja pet piezometrov, v katerih ARSO redno meri gladine podzemne vode. Lokacija piezometrov je prikazana v prilogi A, njihove koordinate v Gauss-Krügerjevem sistemu pa so prikazani v preglednici 4.

Preglednica 4: Podatki o lokaciji piezometrov (ARSO, 2008)

Table 4: Location data of the observation boreholes (ARSO, 2008)

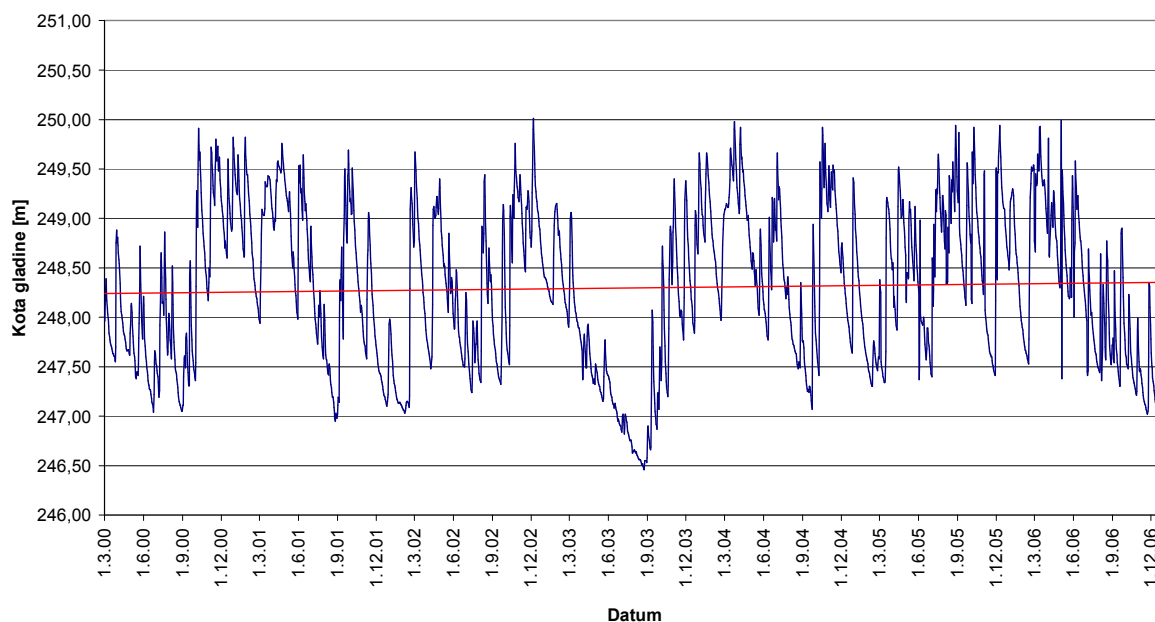
Piezometer	oznaka	koordinate		
		x	y	z
Žalec V-5272	1	512725	122790	254,59
Arja vas 1500	2	515250	123560	250,58
Levec 1772	3	516880	122240	245,24
Medlog 1730	4	517290	121150	243,04
Medlog 1941	5	517740	123040	245,99

V prvih štirih piezometrih, naštetih v preglednici 3, se meritve nivoja podzemne vode izvajajo kontinuirano. Najzgodnejši podatki iz rednih meritev segajo v leto 1973. Rezultati meritev in trend gibanja gladine podtalne vode v piezometrih so prikazani na slikah od 10 do 13. Meritve v piezometru Medlog 1941 se ne izvajajo kontinuirano, na voljo so podatki za različno dolge intervale, rezultati meritev so prikazani v grafu na sliki 14.



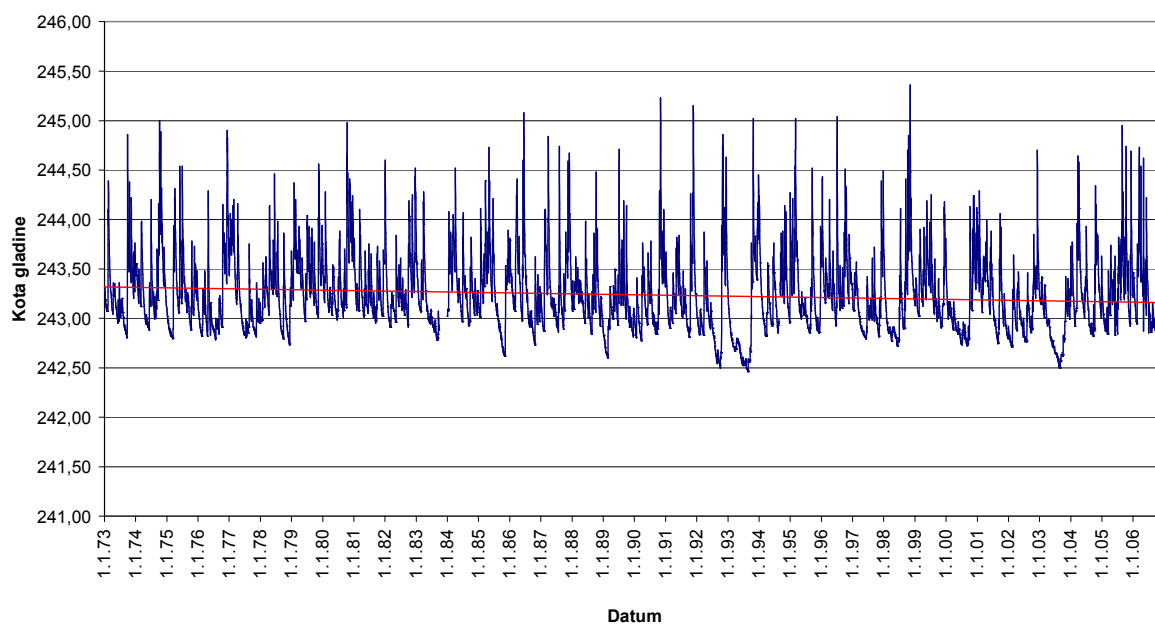
Slika 10: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Žalec V-5272 (Uhan, 2008)

Fig. 10: Groundwater level and trend in borehole Žalec V-5272 (Uhan, 2008)



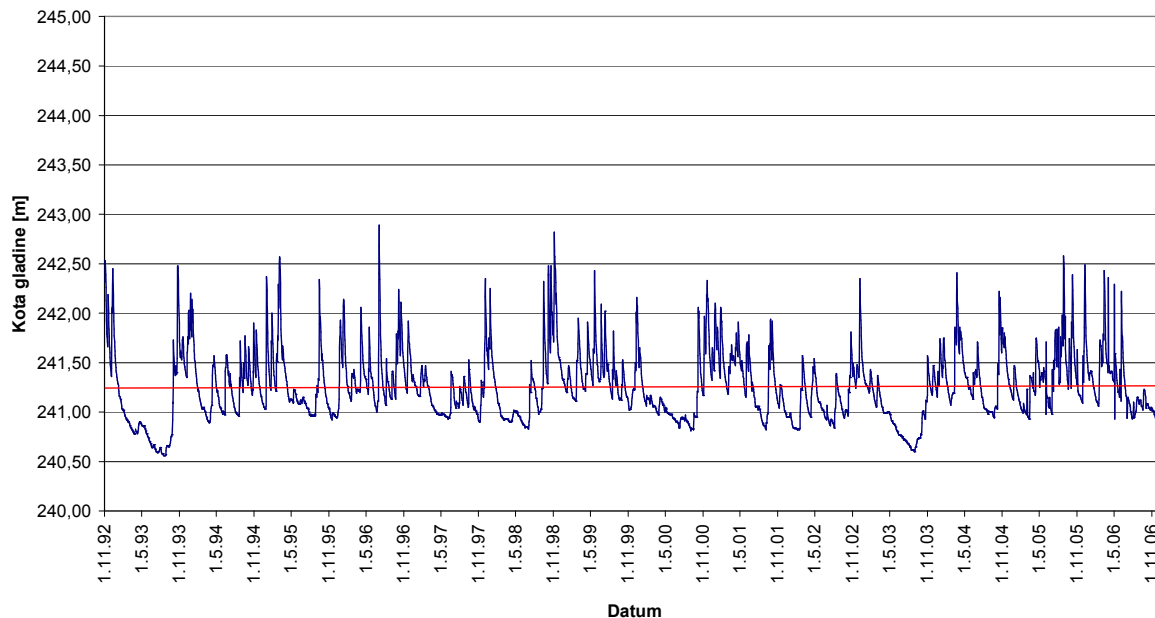
Slika 11: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Arja vas 1500 (Uhan, 2008)

Fig. 11: Groundwater level and trend in borehole Arja vas 1500 (Uhan, 2008)



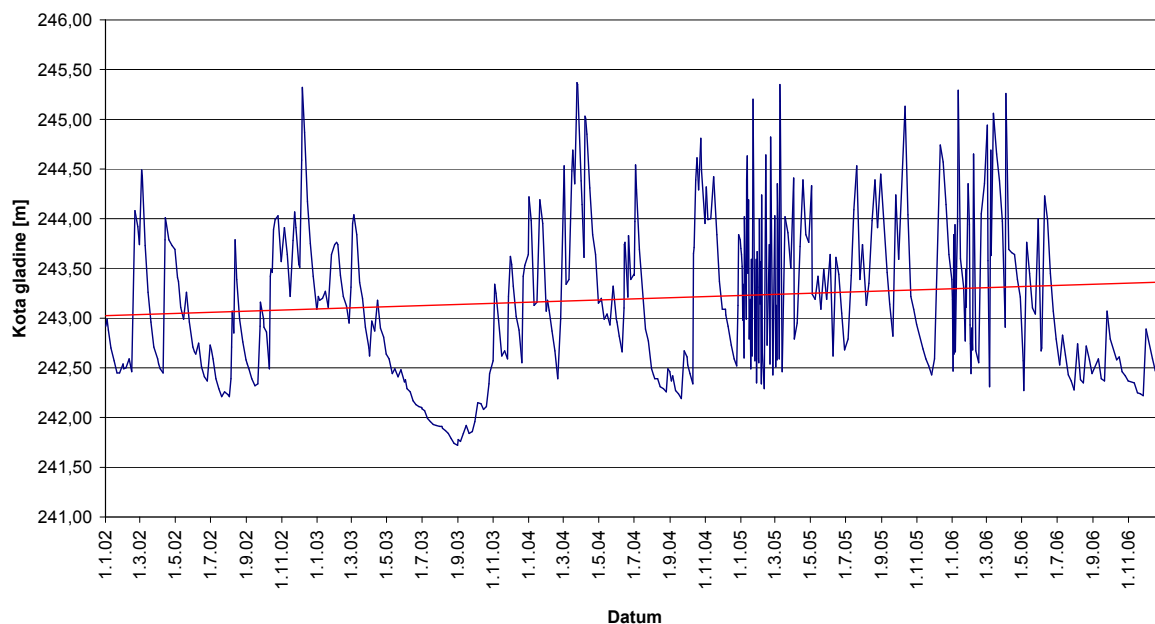
Slika 12: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Levec 1772 (Uhan, 2008)

Fig. 12: Groundwater level and trend in borehole Levec 1772 (Uhan, 2008)



Slika 13: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Medlog 1730 (Uhan, 2008)

Fig. 13: Groundwater level and trend in borehole Medlog 1730 (Uhan, 2008)



Slika 14: Nivoji in trend gibanja podzemne vode v piezometru Medlog 1941 (Uhan, 2008)

Fig. 14: Groundwater level and trend in borehole Medlog 1941 (Uhan, 2008)

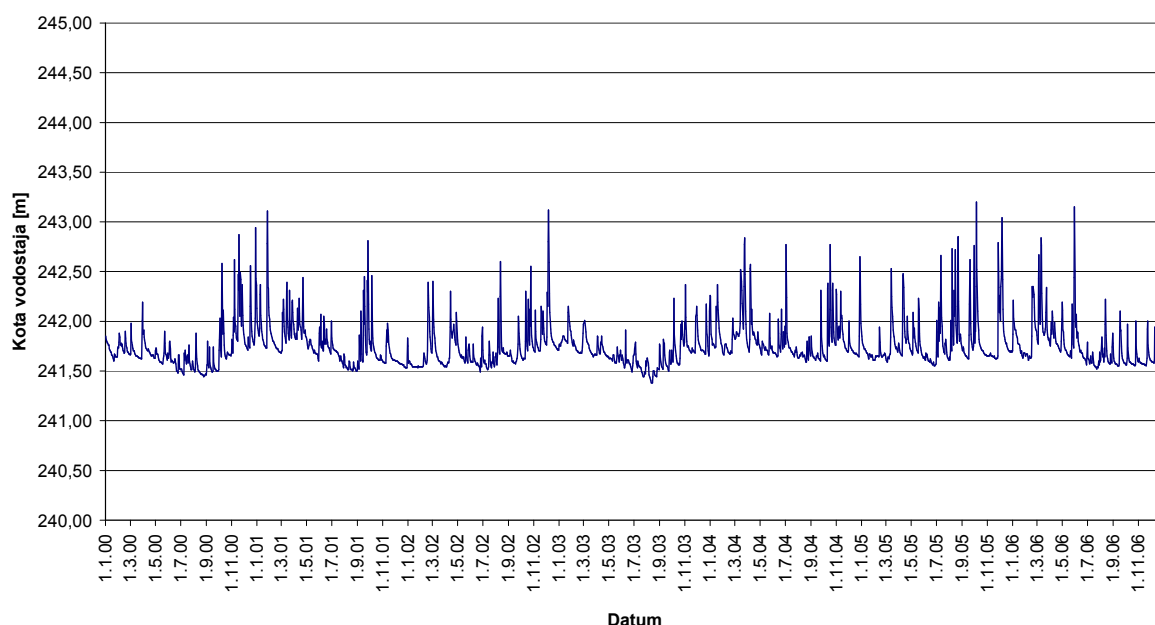
3.1.7 Reka Savinja

Reka Savinja teče vzdolž južnega roba celotnega modela in močno vpliva na vodonosnik Spodnje Savinjske doline. Na odseku od izliva Bolske do levega zavoja v Vrbju Savinja podzemno vodo napaja, medtem ko jo dolvodno v smeri Celja drenira. Struga Savinje vzdolž modela je v večji meri regulirana, dno struge pa je popolnoma ali deloma zarezano v podlago iz tufov. V postopku regulacije je bilo poglobljeno dno struge, na levem bregu pa je bil zgrajen protipoplavni nasip. Stik med reko in podzemno vodo je odvisen predvsem od tega, kako globoko v tufe je zarezano dno Savinje ter od vodostaja Savinje in višine gladine podzemne vode. Pri izdelavi modela sem pri vnosu geometrije struge reke uporabil podatke iz leta 2002, ko je bilo izveden zadnji geodetski posnetek korita struge Savinje za potrebe projektiranja zadrževalnikov visokih voda. Koeficienti hidravlične prepustnosti rečne struge so zaradi zarezanosti struge v tufe nižji, ker v literaturi ni bilo na voljo podatka, sem predpostavil vrednost $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Na odsekih, kjer je bilo v preteklosti ugotovljeno, da ni kontakta med podzemno vodo in Savinjo, pa sem za hidravlično prevodnosti dna struge predpostavili še nižje vrednosti in sicer $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. V osrednjem delu modela je dno Savinje

manj pogreznjeno v podlago iz tufov, zato bom koeficiente prepustnosti za ta odsek reke Savinje določil s postopkom umerjanja.

(Ježek, 1977)

Na obravnavanem odseku Savinje se v Medlogu nahaja avtomatska vodomerna postaja ARSO, ki od leta 2003 dalje spremlja pretok in vodostaje Savinje. Lokacija postaje je z Gauss-Krügerjevimi koordinatami podana v preglednici 4 in prikazana v prilogi A. Podatki o vodostajih v obdobju od 2003 do 2006 so prikazani na sliki 15 in so bili uporabljeni pri izdelavi modela.



Slika 15: Vodostaji reke Savinje na vodomerni postaji 6120-Medlog (Ulaga, 2008)

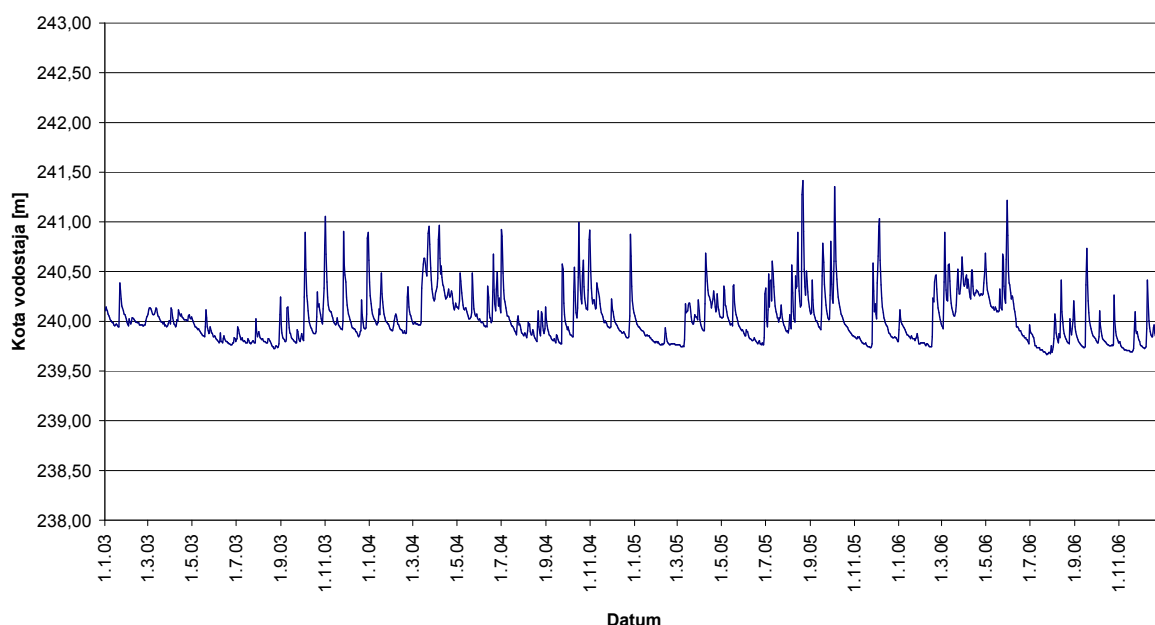
Fig. 15: Water level in river Savinja on measuring spot 6120-Medlog (Ulaga, 2008)

3.1.8 Reka Ložnica

Preko obravnavanega območja teče tudi reka Ložnica in sicer diagonalno v smeri SZ–JV, kjer se v spodnjem desnem robu izlije v reko Savinjo. Struga Ložnice je v večjem delu obravnavanega območja regulirana in ima na obeh bregovih zgrajene protipoplavne nasipe. Dno struge poteka po površini vodonosnika, ki je sestavljen iz proda s peskom, vendar je

precej zablateno, zato je vpliv na podzemno vodo manjši. Vrednosti koeficientov hidravlične propustnosti struge niso podane nikjer v razpoložljivi literaturi, zato sem predpostavil, da znašajo $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Na dveh odsekih reke Ložnice bom hidravlične koeficiente prepustnosti struge določil s postopkom umerjanja.

Na obravnavanem odseku Ložnice se nahaja vodomerna postaja ARSO, ki beleži nivoje vode v strugi. Lokacija postaje je prikazana v prilogi A, Gauss- Krügerjeve koordinate lokacije postaje pa so podane v preglednici 5. Podatki o vodostajih Ložnice z omenjene postaje za obdobje od 2000 do 2006 so prikazani na sliki 16 in so bili uporabljeni za izdelavo modela.



Slika 16: Vodostaji reke Ložnice na vodomerni postaji 6630 – Ložnica I (ARSO, 2008)

Fig. 16: Water level in river Ložnica on measuring spot 6630 – Ložnica I (Uлага, 2008)

Preglednica 5: Podatki o lokaciji vodomernih postaj (ARSO, 2008)

Table 5: Location data of the river measuring spots (ARSO, 2008)

Vodomerna postaja	oznaka	y	x	Z (kota 0 točke)
MEDLOG	6120	517370	121035	238,16 m
LEVEC I	6630	517330	122215	240,95 m

3.1.9 Ostala telesa površinske vode

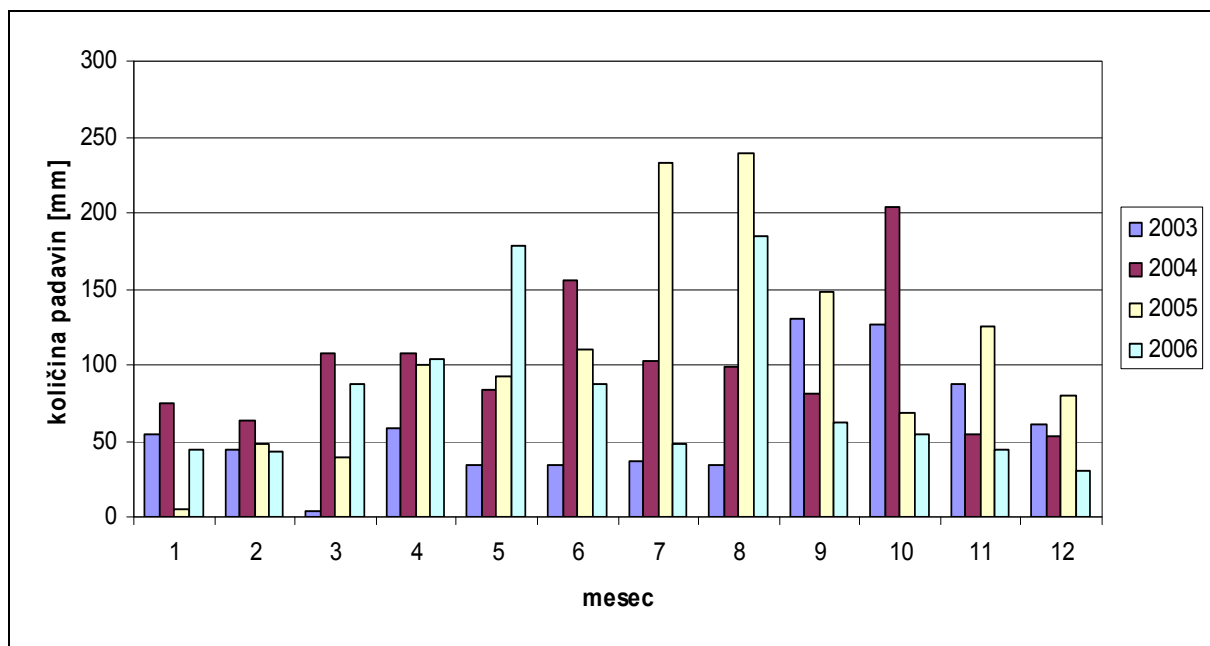
Na območju, ki je obravnavano v modelu, se nahajajo še ostala telesa površinske vode, in sicer:

- potok Lava,
- Podvinska struga Savinje,
- potok Sušnica in Koprivnica
- potok Vrbje,
- potok Pirešica.

Za našeta telesa površinskih voda ni na voljo podatkov o geometriji struge, prav tako pa tudi ni podatkov o vodostajih. V razpoložljivi literaturi tudi ni podatkov o vpliv teh vodotokov na vodonosnik. V postopku umerjanja bom upošteval vpliv teh vodotokov z uporabo modula »recharge« tako, da bom na trasah vodotokov povečal količino infiltracije.

3.1.10 Infiltracija padavin

Na obravnavanem območju se nahaja meteorološka opazovalna postaja CELJE – MEDLOG št. 268, ki je opremljena z barografom, fenološko postajo, higrografom, ombrografom, termografom ter heliografoma. Izmed podatkov, ki se zbirajo na tej postaji, sem uporabili podatke o količini padavin. Mesečna količina padavin v obdobju, za katerega je bilo izvedeno umerjanje modela, je prikazana na grafu (slika 17). Povprečna letna količina padavin na obravnavanem območju znaša od 1200 do 1300 mm (priloga D). (Uhan, 2008).



Slika 17: Mesečne količine padavin, izmerjene na meteorološki postaji št. 268, Medlog v letih od 2003 do 2006 (Uhan, 2008)

Fig. 17: Rainfall measurement on measuring spot no. 268, Medlog from 2003 till 2006 (Uhan, 2008)

Lokacija Meteorološke postaje št. 268:

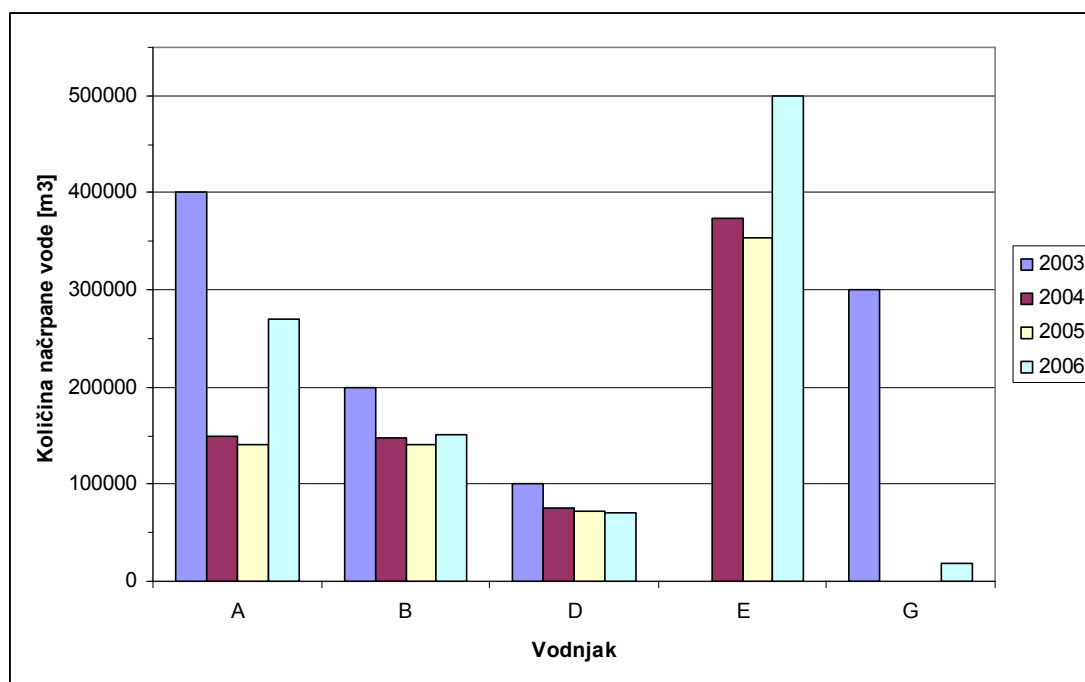
- y: 517769,
- x: 121412,
- nadmorska višina: 241 m.

Vpliv padavin je v model vnesen s paketom »recharge«, s katerim lahko simuliramo bogatenje podzemne vode. Pri vnosu podatkov tem je upoštevan ocena Geološkega zavoda Slovenije (mag. Joerg Prestor), da se na območju vodonosnika Spodnje Savinjske doline infiltrira približno 50 % padavin.

3.1.11 Črpanje podzemne vode iz vodnjakov v Medlogu

Kot je bilo že omenjeno v uvodu, se na obravnavanem območju nahajajo vodnjaki, iz katerih se črpa pitna voda za potrebe vodovodnega sistema Celje. Voda se iz vodnjakov ne črpa konstantno, temveč se količina načrpane vode iz vodnjakov prilagaja potrebam vodovodnega

sistema, vodnjaki pa se uporabljajo kot nadomestni vodni vir, ko prihaja do izpada količin pitne vode iz ostalih virov. Črpanje iz vodnjakov je v model zato vneseno na osnovi podatkov o količinah načrpane vode, ki jih je posredovalo javno podjetje Vodovod – kanalizacija, d.o.o. Količine zajete vode iz posameznih vodnjakov v letih 2003 – 2006 so prikazane na sliki 18.



Slika 18: Količine zajete vode iz vodnjakov v Medlogu (Vodovod – kanalizacija, 2008)

Fig. 18: Quantities of extracted water from wells in Medlog (Vodovod – kanalizacija, 2008)

Gauss-Krügerjeve koordinate lokacije vodnjakov so podane v preglednici 6, grafično pa je lokacija vodnjakov prikazana v prilogi A.

Preglednica 6: Podatki o lokaciji vodnjakov (Vodovod – kanalizacija, 2008)

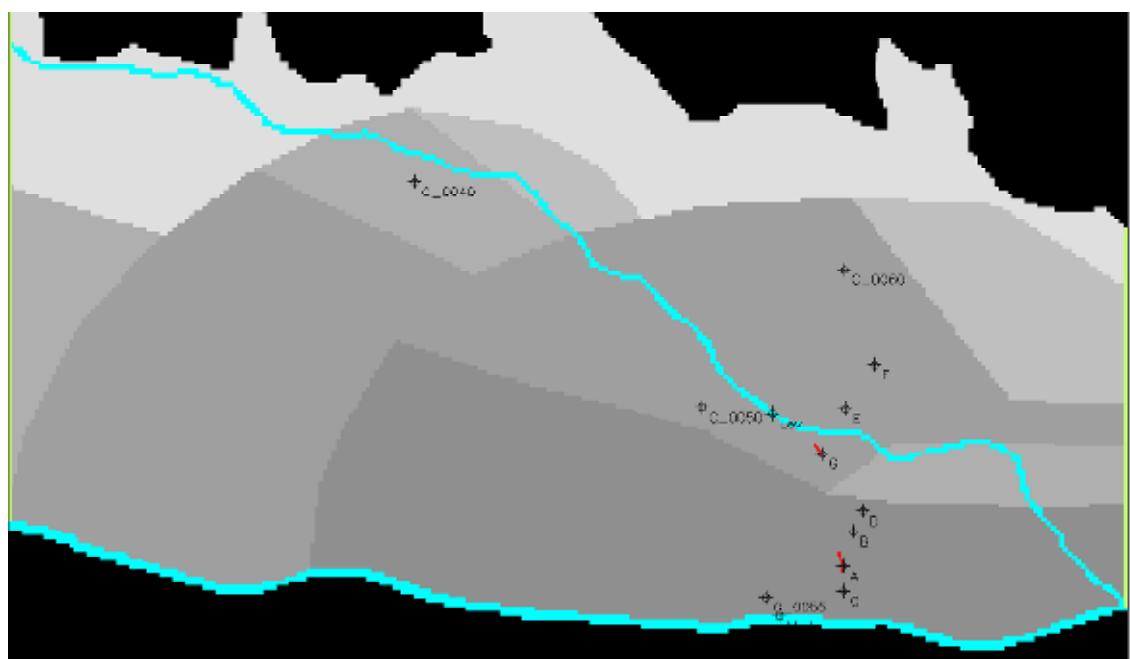
Table 6: Location data of the wells (Vodovod – kanalizacija, 2008)

Vodnjak	X	Y	Z
A	121328,82	517740,25	241,39
B	121528,34	517795,87	241,6
C	121179,91	517740,59	241
D	121615,00	517853,00	242
E	122240,91	517752,36	242,50
F	122497,50	517921,29	243,13
G	121982,35	517614,50	242,41

3.2 Umerjanje modela

3.2.1 Ročno umerjanje modela

Model sem najprej umerjal ročno. Za izhodišče sem uporabil stacionarni model v katerega sem vnesel podatke o vodostaju Savinje in Ložnice, padavinah, ter začetnih gladinah podzemne vode, ki so bili zabeleženi v avgustu leta 2000, ko je bila izdelana zadnja karta gladin podzemne vode. Po vnosu podatkov sem izvedel izračun, katerega rezultati so pokazali veliko razhajanje med potekom hidroizohips določenih na podlagi meritev in hidroizohips na podlagi izračunanih gladi podzemne vode. V nadaljevanju sem zato v procesu ročnega umerjanja spreminjal koeficiente hidravlične prepustnosti zgornjega sloja vodonosnika v tistih območjih, kjer podatkov o koeficientih ni bilo na voljo in so bili predpostavljeni. Z različnimi vrednostmi koeficientov sem iskal kombinacijo, pri kateri bodo hidroizohipse izračunanih gladin čim bolj podobne karti gladin za to obdobje. Vrednosti koeficientov hidravlične prepustnosti zgornjega sloja po končanem ročnem umerjanju so prikazane v sliki 19.



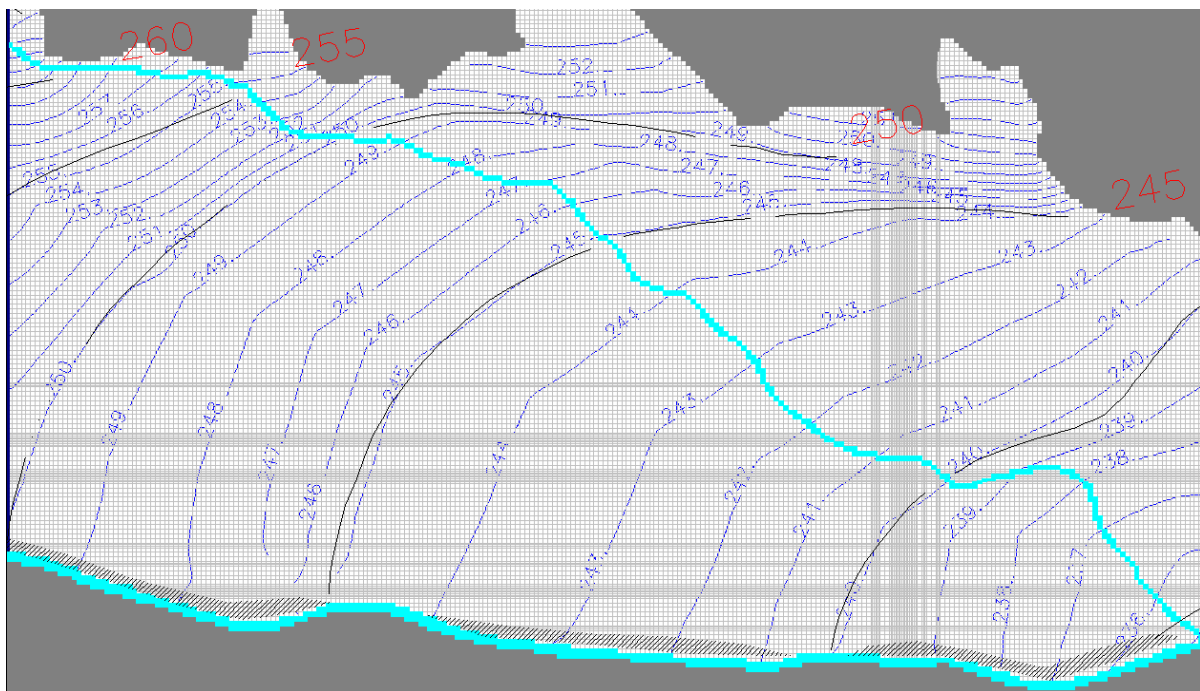
Vrednosti koeficientov horizontalen hidravlične prepustnosti:

	0.01	0.05
	0.005	0.01
	0.001	0.005
	0.0005	0.001
	0.0001	0.0005
	0.000005	0.00001

Slika 19: Koeficienti hidravlične prepustnosti zgornjega sloja, po ročnem umerjanju

Fig. 19: Hydraulic conductivity of the upper layer after the manual calibration

Primerjava izmerjenih in izračunanih hidroizohips za avgust leta 2000, po končanem ročnem umerjanju koeficientov hidravlične prevodnosti zgornjega sloja je prikazana v sliki 20.



Slika 20: Primerjava hidroizohips, izmerjenih (črne) in izračunanih (modre) gladin za obdobje od 14. do 18. avgusta 2000

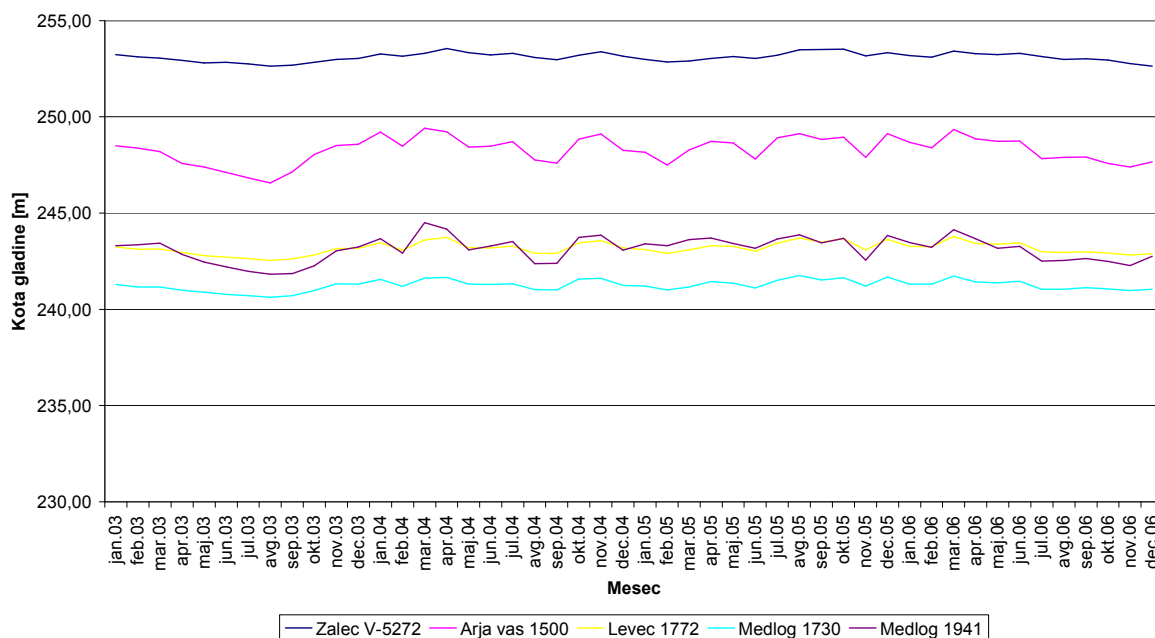
Fig. 20: Relation between contours of observed (black) and calculated (blue) groundwater levels from 14th till 18th august 2000

Na gladine podzemne vode močno vplivajo koeficienti prepustnosti dna struge, zato je bilo potrebno nadaljevanju izvesti umerjanje koeficientov dna struge. Ta postopek sem izvedel z uporabo avtomatskega umerjanja.

3.2.2 *Avtomatsko umerjanje modela*

V nadaljevanju umerjanja modela sem uporabil dinamični model, v katerega sem vnesel podatke, ki se spreminjajo s časom za obdobje od 1. 1. 2003 do 31. 12. 2006. Časovno obdobje za izvedbo umerjanja sem izbral na osnovi pridobljenih podatkov. Podatki se na merilnih mestih na območju modela zbirajo različno dolgo. Kot zadnje merilno mesto izmed – v prejšnjih poglavjih – predstavljenih, je bila postavljena vodomerna postaja Medlog na reki Savinji. Na tej postaji se redne meritve izvajajo od konca leta 2002. Tako sem uspel zbrati podatke za umerjanje iz vseh opisanih merilnih mest za obdobje štirih let (2003–2006) oziroma 48 mesecev. Novejših podatkov v času zbiranja podatkov za gradnjo modela še ni

bilo na razpolago. Meritve iz piezometrov, ki so bile uporabljene za umerjanje, so prikazane na sliki 21.



Slika 21: Meritve gladin podzemne vode, ki so bile uporabljene za umerjanje modela

Fig. 21: Groundwater level data, used for model calibration

Za izvedbo avtomatskega umerjanja sem izdelal dinamični model, pri kateri sem obdobje štirih let, za katerega je bilo izvedeno umerjanje, razdelil na 48 period z dolžino 1 meseca. Za vsako periodo sem nato vnesel podatke, ki se s časom spreminjajo:

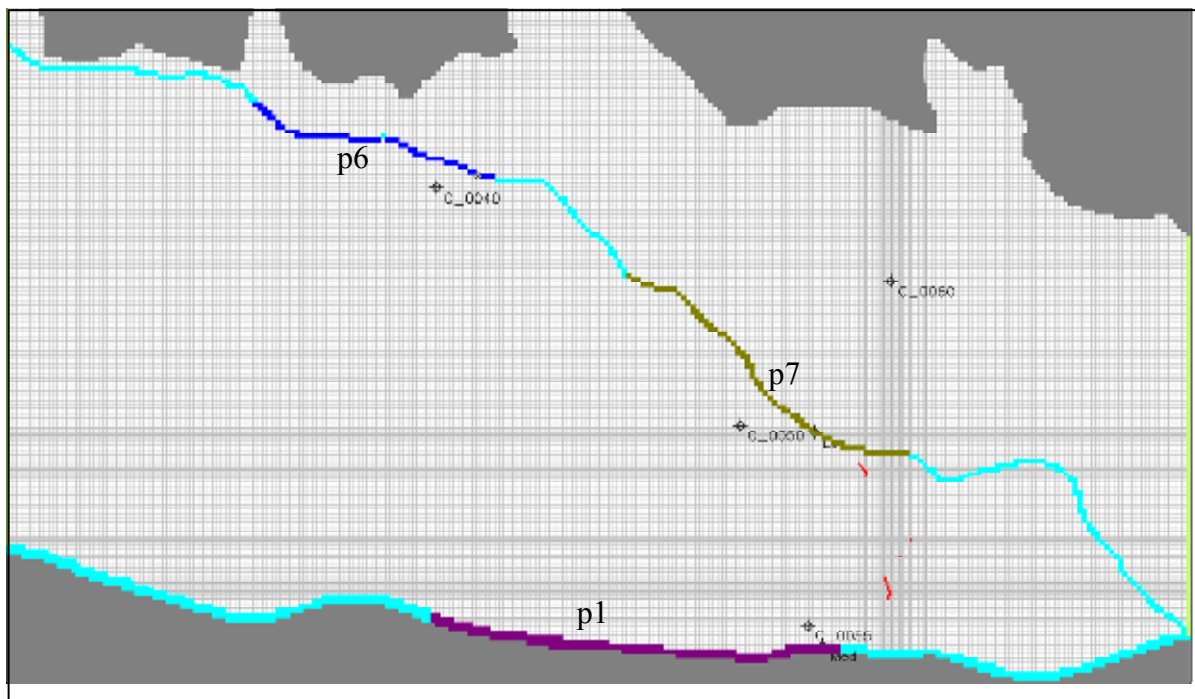
- Nivo podzemne vode za celice s stalno gladino na povprečno gladino na začetku in na koncu vsake periode. Spremembe nivoja podzemne vode v celicah s fiksno gladino sem določil glede na nihanje gladin v piezometru Žalec V-5272, ki leži na zahodnem robu modela.
- Povprečni vodostaj Savinje za vsako periodo
- Povprečni vodostaj Ložnice za vsako periodo
- Infiltracija padavin za vsako periodo, preračunano v m/s.
- Skupna mesečna količina črpanja vode iz vodnjakov, preračunano v l/s. Pri tem sem predpostavil, da se je bilo črpanje iz vodnjaka v posamezni periodi ves čas enakomerno.

- Infiltracija iz ostalih vodotokov, ki prečkajo območje modela. Intenziteto posameznih dotokov, sem določili s postopkom ročnega umerjanja s pomočjo primerjave izračunanih in izmerjenih gladin podzemne vode.
- Srednji mesečni nivo podzemne vode v piezometrih na območju modela.

Osnovna časovna enota simulacije je bila 1 sekunda, dolžina računskega koraka v simulaciji je znašala 1 mesec.

Postopek avtomatskega umerjanja s programom PEST sem izvedel za tri parametre in sicer:

- koeficient hidravlične prepustnosti struge Savinje v osrednjem delu (v nadaljevanju parameter z oznako »p1«). Območje umerjanja je prikazano v sliki 21.
- koeficienti hidravlične prepustnosti struge Ložnice na dveh odsekih (v nadaljevanju parameter z oznako »p6« in »p7«). Območje umerjanja je prikazano v sliki 22.



Slika 22: Območja umerjanja hidravlične prevodnosti strug

Fig. 22: Areas of the riverbed hydraulic conductance calibration

Za navedene izbrane parametre je program PEST v postopku avtomatske optimizacije parametrov določil optimalne vrednosti parametrov tako, da so se računske gladine podzemne vode v izbranih piezometrih kar najboljje ustrezale izmerjenim srednjim mesečnim gladinam podzemne vode.

Izvečki rezultatov avtomatskega umerjanja so prikazani na sliki 23, kjer so navedene optimizirane vrednosti parametrov, pridobljene s postopkom umerjanja. Celotna izhodna datoteka postopka umerjanja je v digitalni obliki priloženi na zgoščenki.

OPTIMISATION RESULTS

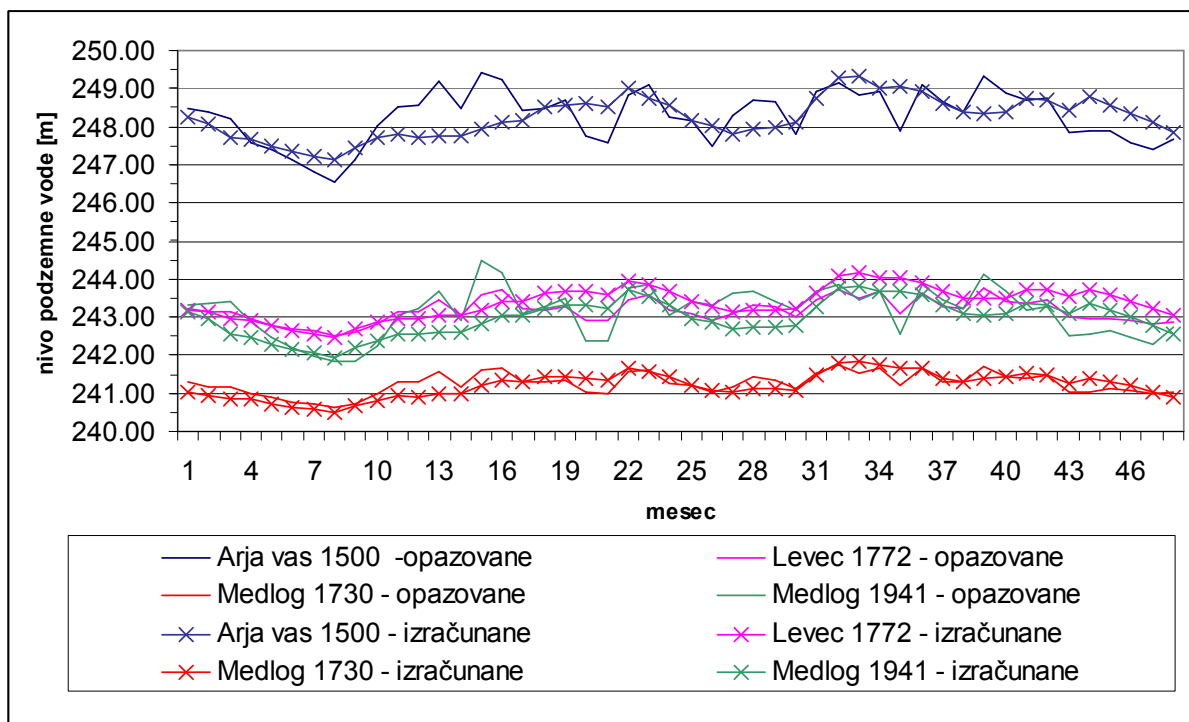
Parameters ---->

Parameter	Estimated value	95% percent confidence limits	
		lower limit	upper limit
p1	7.557500E-04	6.520884E-04	8.758906E-04
p6	9.328900E-06	3.603578E-06	2.415054E-05
p7	9.378700E-06	2.484762E-06	3.539977E-05

Slika 23: Prikaz optimiziranih parametrov

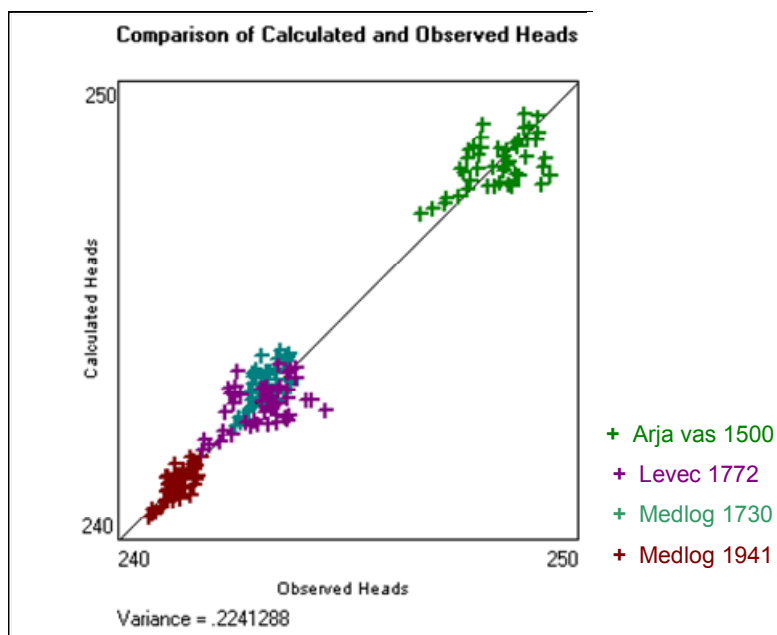
Fig. 23: Results of the parameter optimization process

Po končanem postopku umerjanja sem popravil vrednosti umerjenih parametrov z optimiziranimi in ponovno zagnal simulacijo za obdobje umerjanja. Slika 24 prikazuje primerjavo računskih in opazovanih gladin za obdobje umerjanja od leta 2003 do 2006 s popravljenimi vrednostmi parametrov, ki si bili določeni s postopkom umerjanja. Primerjava izmerjenih in izračunanih gladin, ki je prikazana na sliki 25, kaže odstopanje izračunanih gladin od izmerjenih piezometrov, kjer so bile opravljane meritve. Varianca izračunanih in izmerjenih vrednosti znaša 0,224. Iz slike 25 je tudi razvidno, da so razhajanja med izračunanimi in izmerjenimi gladinami najvišja za piezometra Arja vas 1500 in Levec 1772.



Slika 24: Grafični prikaz izračunanih in izmerjenih gladin v piezometrih

Fig. 24: Relation between observed and calculated groundwater level



Slika 25: Primerjava izračunanih in izmerjenih gladin v piezometrih

Fig. 25: Relation between observed and calculated groundwater level

3.3 Simulacija povečanja črpanja podzemne vode iz vodnjakov v Medlogu

V podjetju Vodovod – kanalizacija, d.o.o. iz Celja, ki je upravljavec vodnjakov za črpanje pitne vode v Medlogu, si želijo povečati količine načrpane vode iz vodnjakov, saj se občasno pojavljajo večje potrebe po količini načrpane, kot so dovoljene v vodnem dovoljenju. Vodni vir Medlog je namreč nadomestni vodni vir za vodovodni sistem Celje in se uporablja, kadar prihaja do pomanjkanja vode iz ostalih virov. V normalnih razmerah potrebuje vodovodni sistem povprečno 255 l/s pitne vode. S povečanjem količin zajete vode, bi lahko potrebno količino vode zagotovili tudi samo z uporabo vodnjakov v Medlogu. Preglednica 7 prikazuje podatke javnega podjetja Vodovod – kanalizacija, d.o.o. o trenutni maksimalni količini vode, ki jo načrpajo iz posameznega vodnjaka, in količine, ki bi jih želeli črpati v prihodnje.

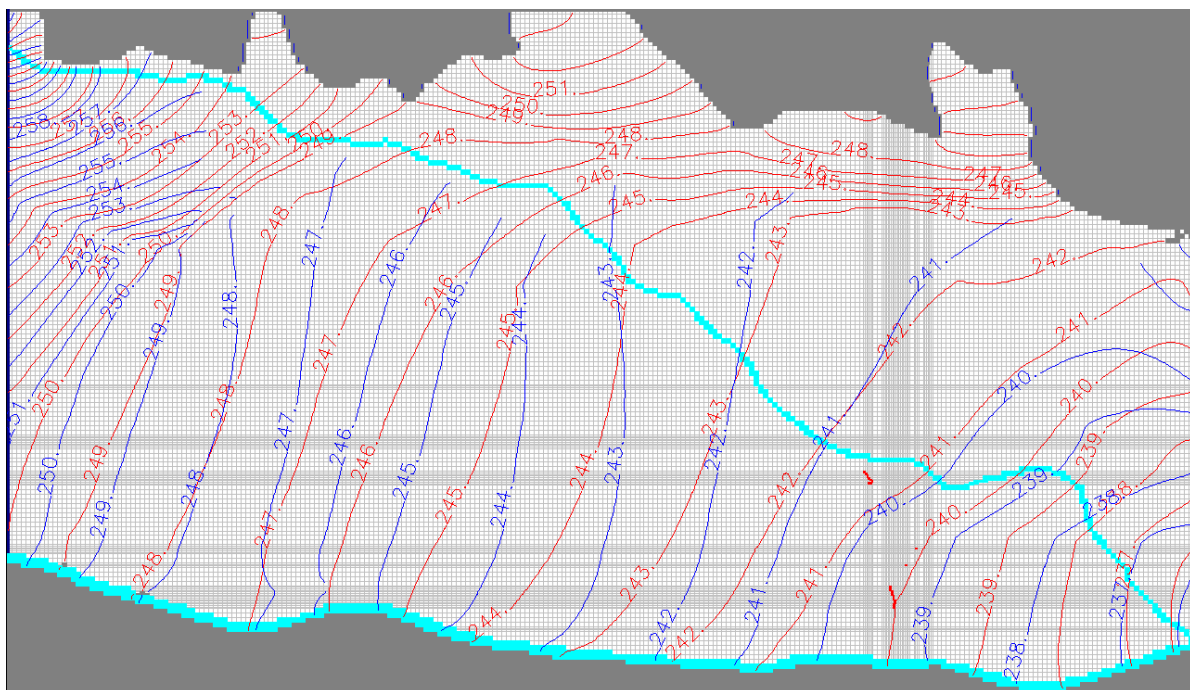
Preglednica 7: Prikaz trenutnih in želenih količin črpanja podzemne vode v Medlogu

Table 7: Present and desired pumping rates of groundwater in Medlog

Vodnjak	A	B	C	D	E	F	G	skupaj
dovoljeno v vodnem dovoljenju [l/s]	35	32	10	10	60	15	50	212
trenutni max. odvzem [l/s]	35	32	10	10	42	15	50	194
želeni max. odvzem [l/s]	45	45	0	15	65	30	60	260

Za preverjanje, ali je možno povečati količine črpanja in za določanje vpliva povečanega črpanja podzemne vode iz vodnjakov v Medlogu, sem se odločil z umerjenim modelom izvesti simulacijo toka podzemne vode v sušnih razmerah. V sušnih razmerah so potrebe po vodi iz vodnjakov v Medlogu največje, hkrati pa so takrat gladine podzemne vode najnižje, kar pomeni, da se pojavi v takšnih razmerah najbolj kritično stanje. Tako sem za razmere v letu 2003, ko je bila količina padavin v mesecih od januarja do septembra izjemno nizka (slika 16), kar je bilo opazno tudi pri znižanju gladin podzemne vode (slika 20), izvedel tri simulacije. Najprej sem izvedel simulacijo ob črpanju trenutnih maksimalnih količin skozi vse leto. Drugo simulacijo pa sem izvedel za primer, ko bi skozi vse leto črpali povečane maksimalne količine. Rezultate obeh simulacij sem primerjal s stanjem gladin podzemne vode v primeru, da se voda iz vodnjakov vse leto ne bi uporabljala.

Pred pričetkom izvajanja opisanih simulacij sem opravil še primerjavo rezultatov, ki jih dajeja statični in dinamični model v razmerah iz leta 2003. Izkazalo se je, da dajeja statični in dinamični model nekoliko različne rezultate. Razlika je najopaznejša v 8 periodi (razmere iz meseca avgusta 2003), ko so gladine najnižje. Primerjava izračunanih hidroizohips z dinamičnim in statičnim modelom za razmere v avgustu 2003 so prikazane v sliki 26. Statični model daje rezultate z nižjimi gladinami podzemne vode preko celotnega modela razen ob vzhodnem robu, kjer zaradi robnega pogoja s fiksno gladino daje rezultate z višjimi gladinami kot dinamični model. Dinamični model pri izračunu upošteva spremembe v nivoju podzemne vode tudi v celicah s fiksno gladino. Rezultati statičnega modela tudi kažejo, da se severni del vodonosnika razmerah iz avgusta 2003 osuši.



Slika 26: Primerjava izračunanih gladin podzemne vode s statičnim (modre hidroizohipse) in dinamičnim (rdeče hidroizohipse) modelom v avgustu 2003

Fig. 26: Relation between groundwater level calculated made by steady – state (blue contours) and transient (red contours) simulation in august 2003

Po primerjavi rezultatov dinamičnega in statičnega modela sem se odločili, da bom v prejšnjem odstavku opisane simulacije različnih količin črpanja izvedel s dinamičnim

modelom. Model in opisano umerjanje parametrov je bilo izvedeno z dinamično simulacijo, zato so rezultati dinamičnega modela po moji oceni realnejši.

3.3.1 Simulacija črpanja trenutno maksimalnih količin

Modelu sem na območju vodnjakov določil mrežo celic z večjo ločljivostjo tako, da sem celice, v katerih se nahajajo vodnjaki, razdelil na 9 manjših velikosti $8,33 \text{ m} \times 8,33 \text{ m}$. Modelu sem v orodju za modeliranje vodnjakov količine črpanja iz posameznih vodnjakov nastavil maksimalne količine, ki se trenutno črpajo iz vodnjakov (preglednica 7, druga vrstica). Za vodnjake A, B, C, D, G in F so to maksimalne količine, ki so opredeljene v vodnem dovoljenju, za vodnjak E pa trenutna maksimalna količina odvzema znaša 42 l/s, kolikor omogoča trenutno nameščena črpalka.

Prvi izračuni so pokazali, da je potrebno v modelu upoštevati drenaže, s katerimi so opremljeni vodnjaki A, E in G, saj so se ti vodnjaki brez upoštevanih drenaž posušili ob črpanju trenutnih maksimalnih količin. Drenaže sem upošteval tako, da sem kot vodnjak definiral tudi celice, skozi katere poteka drenaža, in skupno količino načrpane vode iz vodnjaka enakomerno razporedil med posamezne celice vodnjaka. Na območjih drenaž sem predhodno zgostil računsko mrežo iz osnovne velikosti na velikost $8,33 \times 8,33 \text{ m}$ – vsako celico sem razdelil na 9 manjših, enako velikih celic.

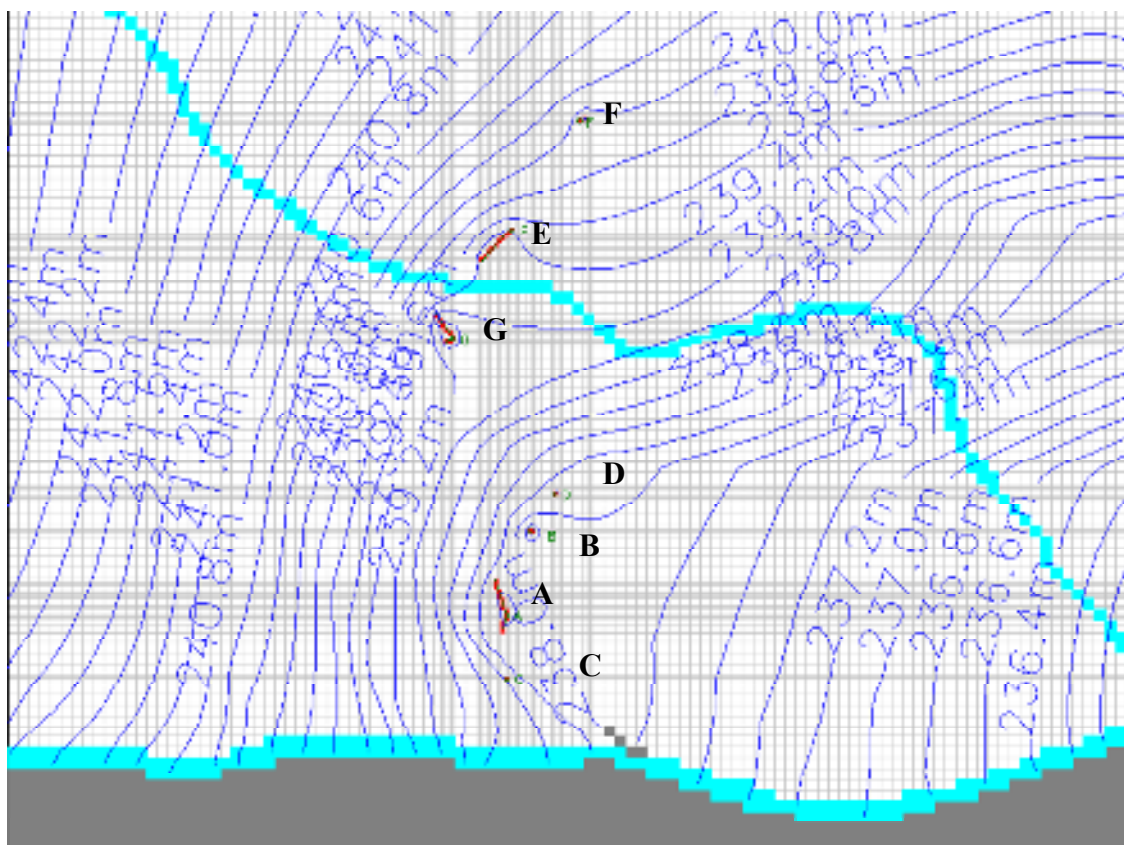
Končni izračun, v katerem so bile upoštevane drenaže za vodnjake A, E in G, je pokazal, da ob sočasnem črpanju iz vseh vodnjakov, v sušnih razmerah ni mogoče vse leto črpati trenutne maksimalne količine vode, ki znaša 194 l/s. Vodnjak C se posuši po v začetku meseca aprila 2003, po 94 dneh kontinuiranega črpanja iz vseh vodnjakov hkrati. Ostali vodnjaki pa lahko celo leto zagotavljajo zelene količine vode. To pokaže vodna bilanca sliki 27, ki je izdelana za avgust leta 2003, ko so bile tudi izmerjene gladine podzemne vode najnižje. Maksimalna skupna količina iz vodnjakov zajete vode je takrat znašala 184 l/s.

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 31 IN STRESS PERIOD 8					
CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
-----			-----		
IN:			IN:		
---			---		
STORAGE =		3541677.0000	STORAGE =		0.1527
CONSTANT HEAD =		1510980.6300	CONSTANT HEAD =		9.2963E-02
WELLS =		0.0000	WELLS =		0.0000
RIVER LEAKAGE =		17264.3555	RIVER LEAKAGE =		1.4382E-03
RECHARGE =		3196334.0000	RECHARGE =		0.1259
TOTAL IN =		8266256.0000	TOTAL IN =		0.3730
OUT:			OUT:		
----			----		
STORAGE =		665265.5000	STORAGE =		1.1191E-02
CONSTANT HEAD =		3180092.7500	CONSTANT HEAD =		0.1114
WELLS =		3948545.2500	WELLS =		0.1842
RIVER LEAKAGE =		1808812.0000	RIVER LEAKAGE =		6.7143E-02
RECHARGE =		0.0000	RECHARGE =		0.0000
TOTAL OUT =		9602716.0000	TOTAL OUT =		0.3739
IN - OUT =		-1336460.0000	IN - OUT =		-8.9425E-04
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 31 IN STRESS PERIOD 8					
	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
	-----	-----	-----	-----	-----
TIME STEP LENGTH	86400.	1440.0	24.000	1.0000	2.73785E-03
STRESS PERIOD TIME	2.67840E+06	44640.	744.00	31.000	8.48734E-02
TOTAL TIME	2.09952E+07	3.49920E+05	5832.0	243.00	0.66530

Slika 27: Vodna bilanca modela pri trenutno maksimalnih količinah črpanja iz vodnjakov (sivo so označene količine črpanja) v avgustu 2003

Fig. 27: Water budget at the present pumping rates from the wells in august 2003

Stanje gladin podzemne vode na območju vodnjakov na koncu osme periode pri trenutnih maksimalnih količinah črpanja je prikazano na sliki 28. Iz slike je razvidno, da pride do posušitve vodnjaka C. Celotna izhodna datoteka simulacije črpanja trenutnih količin podzemne vode se v digitalni obliki nahaja na priloženi zgoščenki.



Slika 28: Stanje gladin na območju vodnjakov ob trenutnih maksimalnih količinah črpanja (pri sočasnem črpanju iz vseh vodnjakov v sušnih razmerah) v avgustu 2003

Fig. 28: Groundwater level on the area of wells in Medlog at the present pumping rates (at simultaneous pumping from all the wells) in august 2003

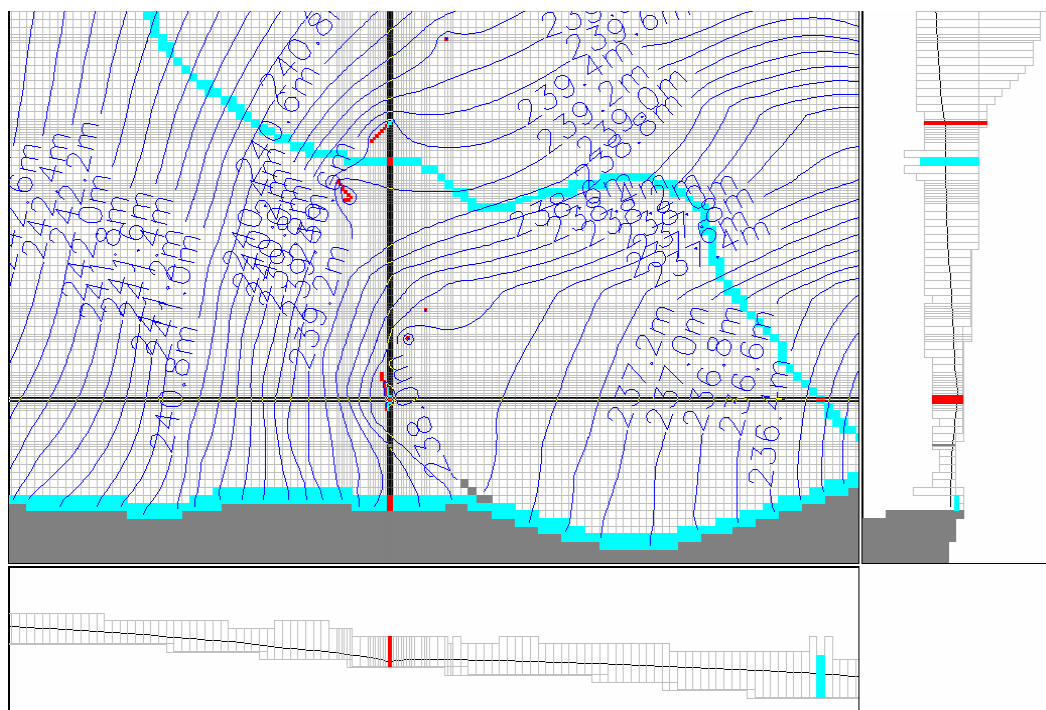
V nadaljevanju je v sliki 29 prikazana volumetrična bilanca za celotno leto 2003, ki pokaže da je bilo iz vodnjakov načrpanih $5.890.175 \text{ m}^3$ podzemne vode, pri čemer je znašala trenutna skupna količina črpanja iz vseh vodnjakov 184 l/s .

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 31 IN STRESS PERIOD 12					
CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
-----			-----		
IN:			IN:		
---			---		
STORAGE =		3716954.0000	STORAGE =		4.0916E-03
CONSTANT HEAD =		2284383.7500	CONSTANT HEAD =		7.8500E-02
WELLS =		0.0000	WELLS =		0.0000
RIVER LEAKAGE =		45491.2148	RIVER LEAKAGE =		2.3484E-03
RECHARGE =		7529206.0000	RECHARGE =		0.2768
TOTAL IN =		13576035.0000	TOTAL IN =		0.3617
OUT:			OUT:		
----			----		
STORAGE =		1841175.5000	STORAGE =		2.9379E-03
CONSTANT HEAD =		4467144.0000	CONSTANT HEAD =		0.1101
WELLS =		5890175.0000	WELLS =		0.1842
RIVER LEAKAGE =		2532493.7500	RIVER LEAKAGE =		7.8760E-02
RECHARGE =		0.0000	RECHARGE =		0.0000
TOTAL OUT =		14730988.0000	TOTAL OUT =		0.3760
IN - OUT =		-1154953.0000	IN - OUT =		-1.4293E-02
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 31 IN STRESS PERIOD 12					
	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
	-----	-----	-----	-----	-----
TIME STEP LENGTH	86400.	1440.0	24.000	1.0000	2.73785E-03
STRESS PERIOD TIME	2.67840E+06	44640.	744.00	31.000	8.48734E-02
TOTAL TIME	3.15360E+07	5.25600E+05	8760.0	365.00	0.99932

Slika 29: Vodna bilanca modela pri trenutno maksimalnih količinah črpanja iz vodnjakov (sivo so označene količine črpanja) za leto 2003

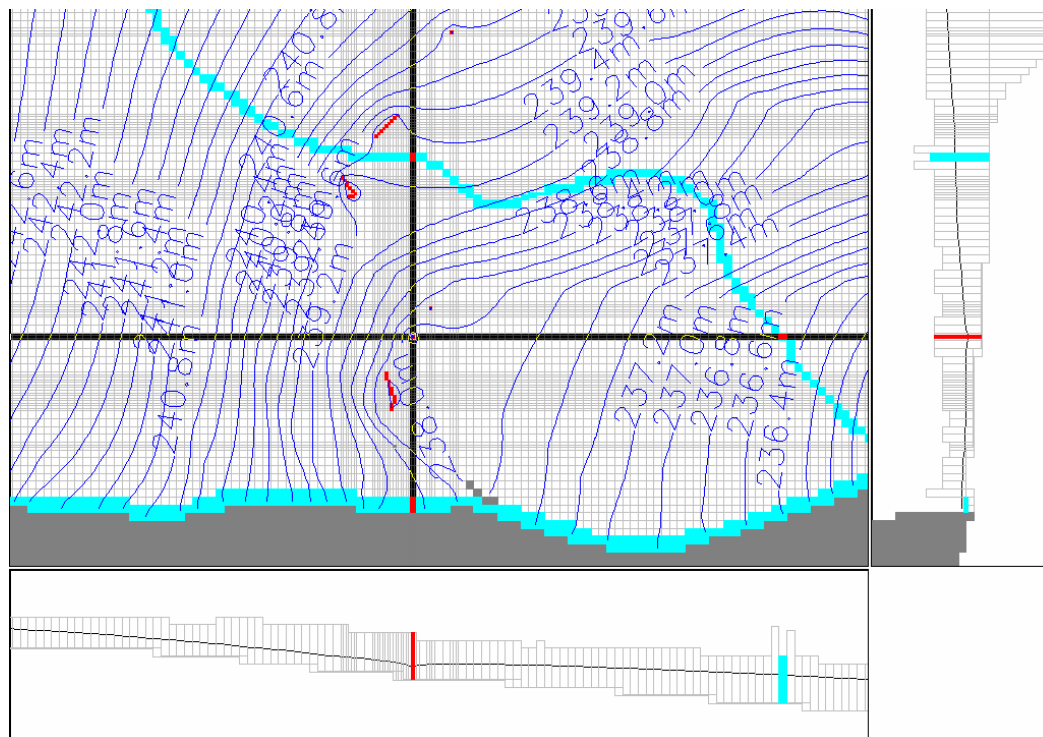
Fig. 29: Water budget at the present pumping rates from the wells (pumping rates are marked in grey) in year 2003

Slike od 30 do 35 prikazujejo prečne in podolžne prereze vodonosnika ter potek gladin v sušnih razmerah (avgust 2003) na mestih vodnjakov A, B, D, E, G in F ob črpanju trenutnih količin. Hidroizohipse podzemne vode so risane z ekvidistanco 20 cm.



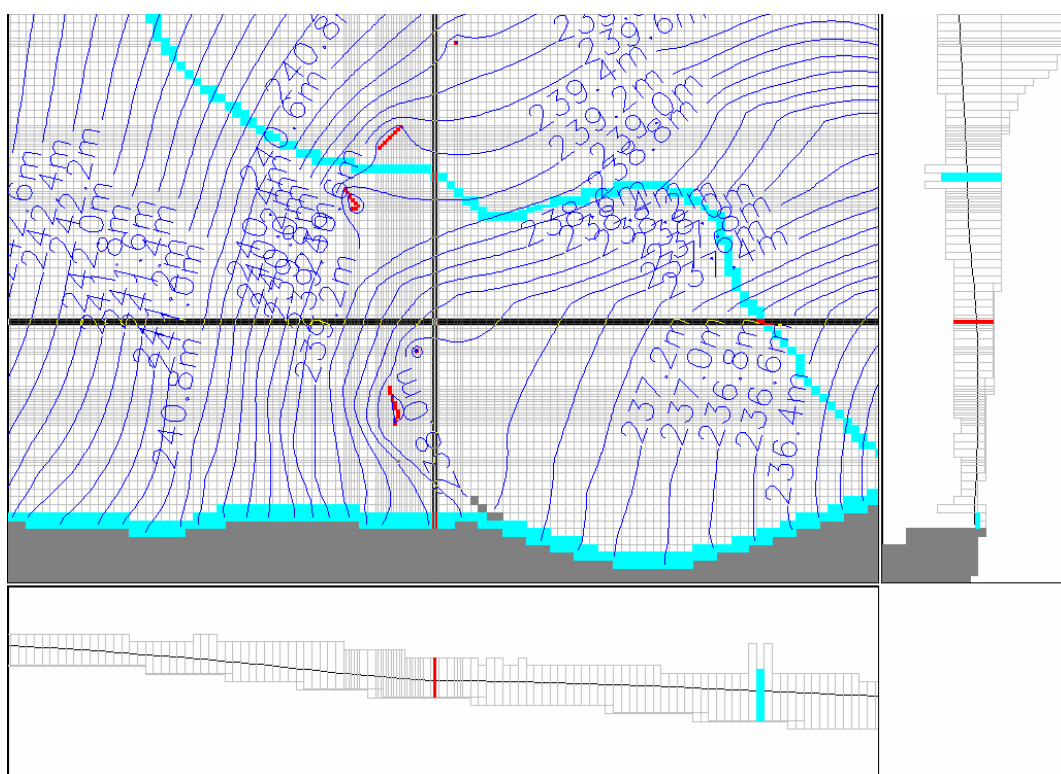
Slika 30: Prečni in podolžni prerez vodnjaka A ob črpanju 35 l/s v avgustu 2003

Fig. 30: Cross-section of the well A at pumping rate 35 l/s in august 2003



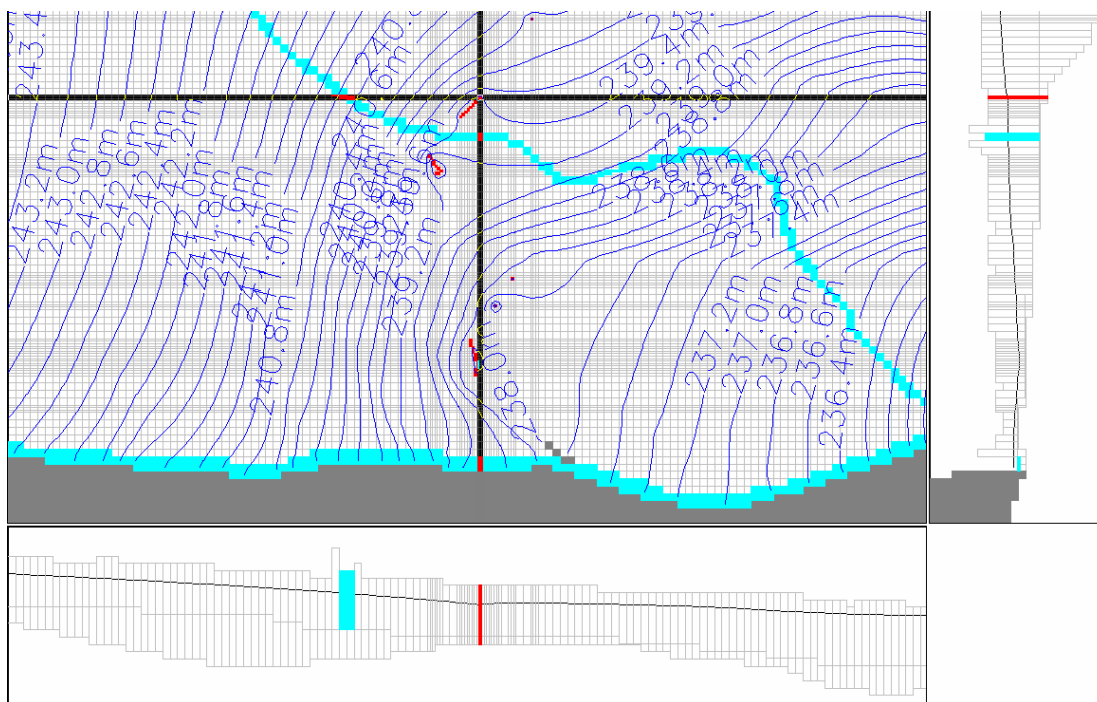
Slika 31: Prečni in podolžni prerez vodnjaka B ob črpanju 32 l/s v avgustu 2003

Fig. 31: Cross-section of the well B at pumping rate 32 l/s in august 2003



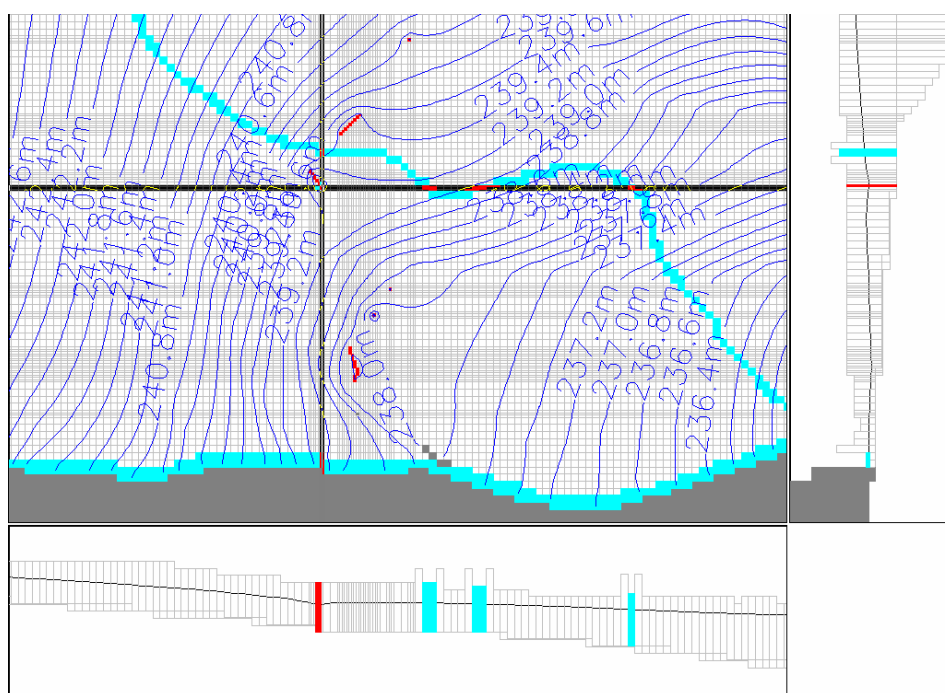
Slika 32: Prečni in podolžni prerez vodnjaka D ob črpanju 10 l/s v avgustu 2003

Fig. 32: Cross-section of the well D at pumping rate 10 l/s in august 2003



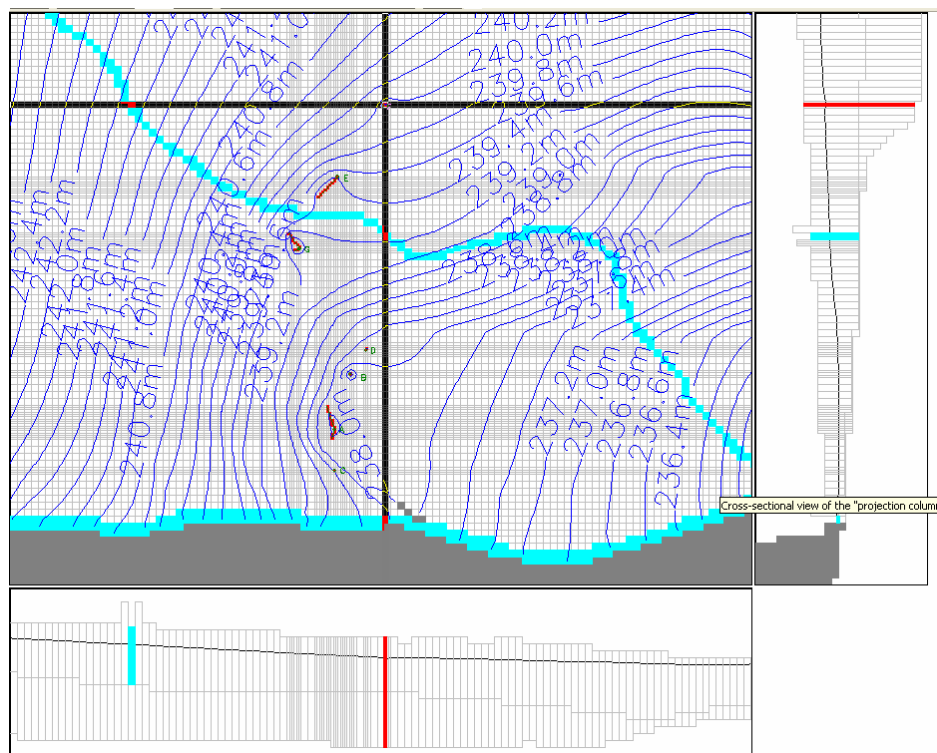
Slika 33: Prečni in podolžni prerez vodnjaka E ob črpanju 42 l/s v avgustu 2003

Fig. 33: Cross-section of the well E at pumping rate 42 l/s in august 2003



Slika 34: Prečni in podolžni prerez vodnjaka G ob črpanju 50 l/s v avgustu 2003

Fig. 34: Cross-section of the well G at pumping rate 50 l/s in august 2003



Slika 35: Prečni in podolžni prerez vodnjaka F ob črpanju 15 l/s v avgustu 2003

Fig. 35: Cross-section of the well F at pumping rate 15 l/s in august 2003

3.3.2 Simulacija črpanja povečanih količin vode iz vodnjakov

Za izračun povečanja maksimalnih količin črpanja iz vodnjakov v Medlogu sem izvedel simulacijo črpanja iz vodnjakov v sušnih razmerah in v modelu povečal količine načrpane vode iz posameznih vodnjakov na količine prikazane v preglednici 7. Pri tem sem upošteval rezultate simulacije trenutnih maksimalnih količin črpanja vode iz posameznih vodnjakov, ki so pokazali, da pride ob sočasnem konstantnem črpanju iz vseh vodnjakov na območju stare vodarne, do osušitve vodnjaka C. Rezultate simulacije potrjujejo tudi opazovanja podjetja Vodovod – kanalizacija, d.o.o., kjer opažajo, da ob sočasnem črpanju iz vseh vodnjakov na območju stare vodarne vodnjakom upade izdatnost. Zato se vodnjak C uporablja zelo redko (v zadnjih letih sploh ni bil v uporabi).

Preglednica 8: Primerjava med želenim povečanjem količin načrpane vode iz vodnjakov in povečanimi količinami, ki so določene z modelom za razmere v avgustu 2003

Table 8: Comparison between desired and model – calculated maximum pumping rates in august 2003

Vodnjak	A	B	C	D	E	F	G	skupaj
želeni maksimalni. odvzem [l/s]	35	32	0	10	65	30	60	232
možni maksimalni odvzem	22	16	0	10	65	30	60	203

Po zagonu modela sem med pregledom rezultatov ugotovil, da pride do težav z zagotavljanjem želenih količin iz vodnjaka B. Rezultati kažejo, da vodnjak B presahne v povečanju črpanja vode iz vodnjakov A in D. V nadaljevanju sem zato zniževal količine načrpane vode iz vodnjakov A in B, da bi ugotovil, koliko vode še lahko zagotavljata v razmerah iz avgusta 2003. Rezultati modela so pokazali, da je mogoče povečati črpanje le iz posameznih vodnjakov, vendar se na ta račun zmanjša izdatnost drugih vodnjakov. Vpliv povečanega črpanja se najprej opazi v vodnjaku C, ki kot je bilo ugotovljeno v simulaciji trenutnih maksimalnih količin črpanja, v razmerah iz leta 2003 presahne po 94 dneh črpanja. Ob povečanju količin črpanja iz vodnjakov G, E in F na količine iz tabele 8, po 135 dneh kontinuiranega črpanja upade izdatnost vodnjakov A in B. Izdatnost obeh vodnjakov nato upada vse do konca avgusta, ko se zniža za skupnih 29 l/s. Vodna bilanca pred upadom

izdatnosti vodnjakov v maju 2003 je prikazana v sliki 36. Sliki 37 pa je prikazana vodna bilanca iz konca avgust 2003, ko izdatnost vodnjakov najnižja. Iz obeh vodnih bilanc je razvidno, da se zniža količina načrpane vode na območju stare vodarne, ki je v vodnih bilancah označena kot »zone 1«, medtem ko se na območju novih vodnjakov (v vodni bilanci so označeni kot »zone 2«) količina načrpane vode ne spremeni.

```

PMWBLF (SUBREGIONAL WATER BUDGET) RUN RECORD
FLOWS ARE CONSIDERED "IN" IF THEY ARE ENTERING A SUBREGION
THE UNIT OF THE FLOWS IS [L^3/T]

TIME STEP      1 OF STRESS PERIOD      5

=====
WATER BUDGET OF ZONES OVER THE ENTIRE MODEL
=====

ZONE: 1
-----

```

		IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	1.8131064E-02	2.1899189E-06	1.8128874E-02	
WELLS	0.0000000E+00	7.6500028E-02	-7.6500028E-02	
RECHARGE	5.8801239E-03	0.0000000E+00	5.8801239E-03	
RIVER LEAKAGE	1.4302455E-03	1.5504482E-03	-1.2020278E-04	
SUM OF ZONE(1)	1.1389205E-01	1.1486046E-01	-9.6841156E-04	

```

ZONE: 2
-----

```

		IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	2.0822721E-02	0.0000000E+00	2.0822721E-02	
WELLS	0.0000000E+00	1.5439209E-01	-1.5439209E-01	
RECHARGE	6.5064384E-03	0.0000000E+00	6.5064384E-03	
RIVER LEAKAGE	7.8309997E-05	0.0000000E+00	7.8309997E-05	
SUM OF ZONE(2)	2.1515159E-01	2.1585098E-01	-6.9938600E-04	

```

=====
WATER BUDGET OF THE WHOLE MODEL DOMAIN:
=====

```

FLOW TERM		IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	2.2647886E-01	2.4515796E-02	2.0196307E-01	
CONSTANT HEAD	7.7401057E-02	9.5594861E-02	-1.8193804E-02	
WELLS	0.0000000E+00	2.3160000E-01	-2.3160000E-01	
RECHARGE	1.2298445E-01	0.0000000E+00	1.2298445E-01	
RIVER LEAKAGE	1.7750361E-03	8.1297770E-02	-7.9522736E-02	
SUM	4.2863941E-01	4.3300843E-01	-4.3690205E-03	

Slika 36: Vodna bilanca modela pri povečanih količinah črpanja iz vodnjakov (s sivo so označene količine črpanja) v maju 2003

Fig. 36: Water budget at higher groundwater pumping rates (pumping rates are marked in grey) in may 2003

Maksimalna skupna količina trenutno načrpane vode v razmerah v avgustu 2003 znaša 203 l/s, kar prikazuje vodna bilanca na sliki 37. Na sliki 38 pa je prikazana volumetrična vodna bilanca na koncu leta 2003 pri povečanih količinah črpanja, ki kaže, da znaša maksimalna letna količina načrpane vode iz vseh vodnjakov pri povečanih količinah črpanja $6.506.845 \text{ m}^3$, kar je precej več kot je maksimalna letna količina načrpane vode dovoljena z vodnim dovoljenjem. Maksimalna trenutna črpanja, ki jo je mogoče tudi v sušnih razmerah načrpati iz obstoječih vodnjakov pa znaša 203 l/s

PMWBLF (SUBREGIONAL WATER BUDGET) RUN RECORD				
FLOWS ARE CONSIDERED "IN" IF THEY ARE ENTERING A SUBREGION				
THE UNIT OF THE FLOWS IS [L ³ /T]				
TIME STEP	31 OF STRESS PERIOD	8		
ZONE: 1				
		IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	6.0653631E-03	2.8570983E-06	6.0625058E-03	
WELLS	0.0000000E+00	4.2499993E-02	-4.2499993E-02	
RECHARGE	5.9831217E-03	0.0000000E+00	5.9831217E-03	
RIVER LEAKAGE	2.0145723E-03	2.3873470E-04	1.7758375E-03	
SUM OF ZONE(1)	6.5046579E-02	6.5473795E-02	-4.2721629E-04	
ZONE: 2				
		IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	1.3853150E-02	0.0000000E+00	1.3853150E-02	
WELLS	0.0000000E+00	1.5968370E-01	-1.5968370E-01	
RECHARGE	6.6625848E-03	0.0000000E+00	6.6625848E-03	
RIVER LEAKAGE	6.0204352E-06	0.0000000E+00	6.0204352E-06	
SUM OF ZONE(2)	1.8653083E-01	1.8742087E-01	-8.9004636E-04	
=====				
WATER BUDGET OF THE WHOLE MODEL DOMAIN:				
=====				
FLOW TERM		IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	1.0976455E-01	1.2844534E-02	9.6920013E-02	
CONSTANT HEAD	1.0595039E-01	8.1874490E-02	2.4075896E-02	
WELLS	0.0000000E+00	2.0259996E-01	-2.0259996E-01	
RECHARGE	1.2575361E-01	0.0000000E+00	1.2575361E-01	
RIVER LEAKAGE	2.3077140E-03	4.8234515E-02	-4.5926802E-02	

SUM	3.4377626E-01	3.4555349E-01	-1.7772317E-03	

Slika 37: Vodna bilanca modela pri povečanih količinah črpanja iz vodnjakov (s sivo so označene količine črpanja) v avgustu 2003

Fig. 37: Water budget at higher groundwater pumping rates (pumping rates are marked in grey) in august 2003

Iz volumetrične bilance na sliki 38 je tudi razvidno, da največji vnos vode v vodonosnik predstavljajo padavine (na sliki »recharge«) v katerih pa je upoštevan tudi vpliv manjših potokov. Ob povečanem črpanju je bila v letu 2003 vsota odtokov iz modela za 16.800 m³ večja od vsote dotokov.

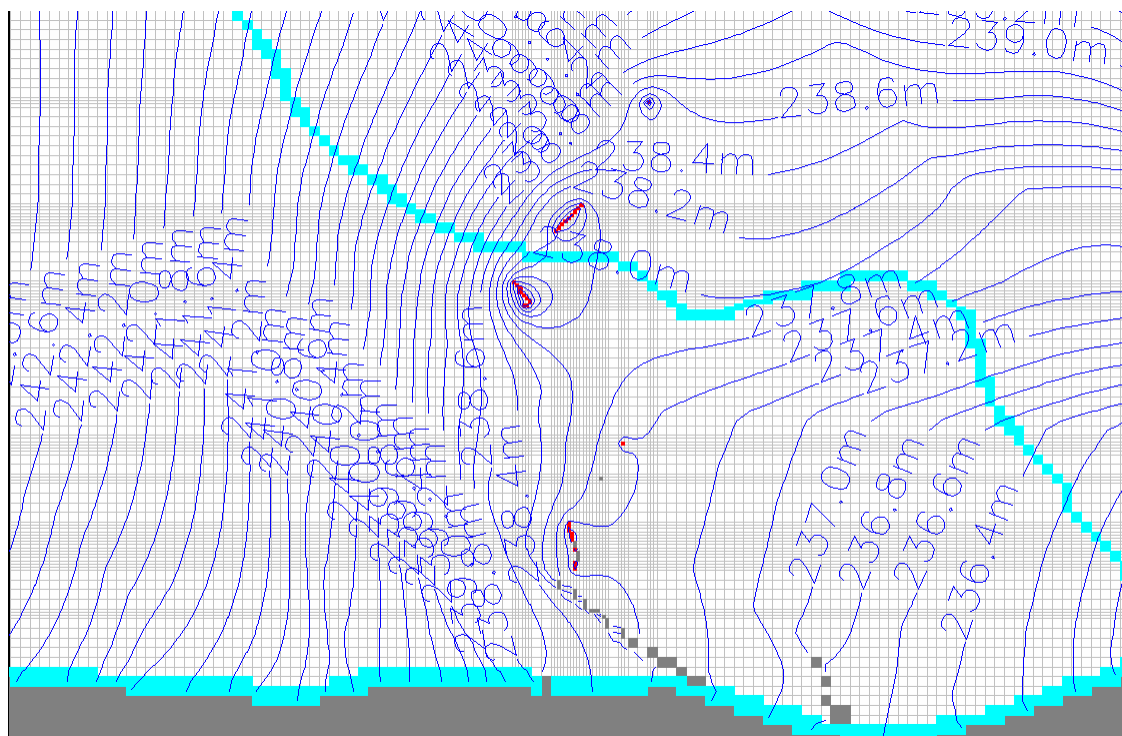
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 31 IN STRESS PERIOD 12			
CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
---		---	
STORAGE =	4694271.0000	STORAGE =	9.5971E-03
CONSTANT HEAD =	2435665.7500	CONSTANT HEAD =	8.5222E-02
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	66185.2578	RIVER LEAKAGE =	3.0627E-03
RECHARGE =	7524255.0000	RECHARGE =	0.2766
TOTAL IN =	14720377.0000	TOTAL IN =	0.3744
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	2282228.7500	STORAGE =	1.0437E-02
CONSTANT HEAD =	3765928.5000	CONSTANT HEAD =	9.4149E-02
WELLS =	6506845.5000	WELLS =	0.2026
RIVER LEAKAGE =	2182175.2500	RIVER LEAKAGE =	6.9025E-02
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	14737177.0000	TOTAL OUT =	0.3762
IN - OUT =	-16800.0000	IN - OUT =	-1.7764E-03

Slika 38: Vodna bilanca modela pri povečanih količinah črpanja iz vodnjakov (s sivo so označene količine črpanja) v avgustu 2003

Fig. 38: Water budget at higher groundwater pumping rates (pumping rates are marked in grey) in august 2003

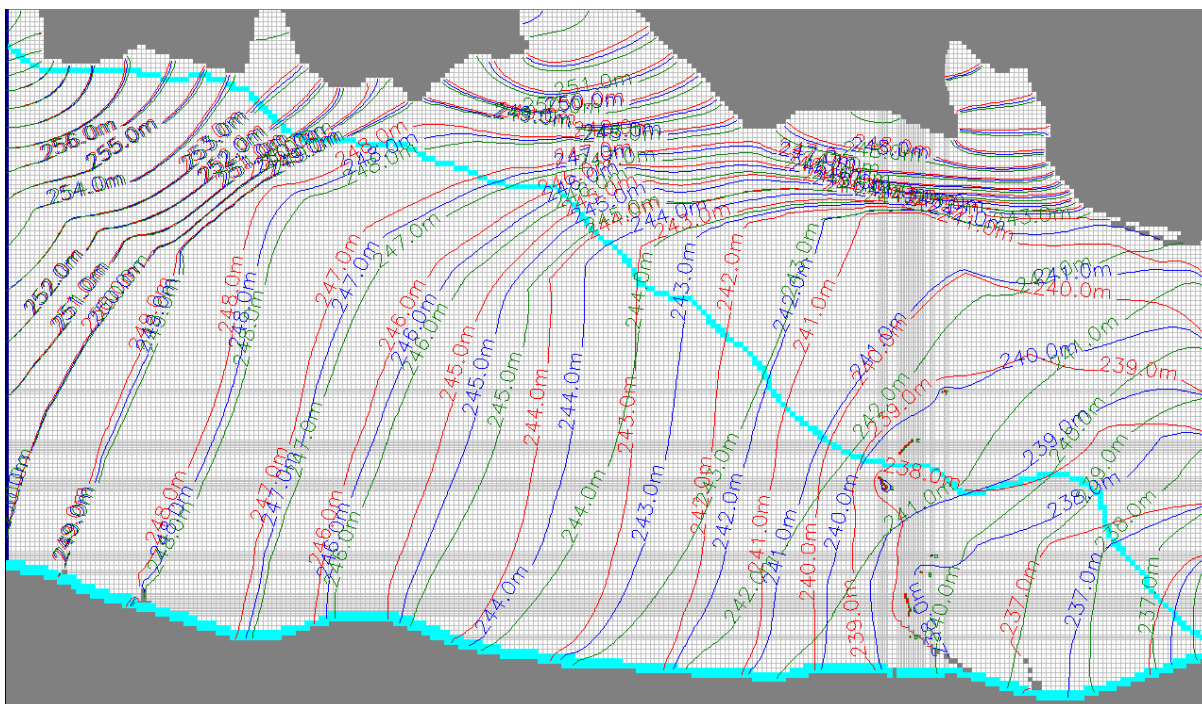
Izračuni so pokazali, da je na območju starih vodnjakov, to so vodnjaki A, B, C in D, ki se nahajajo relativno blizu drug drugega, prisoten velik medsebojni vpliv med vodnjaki. Na izdatnost vodnjakov na območju stare vodarne v sušnih razmerah vpliva tudi povečanje črpanja iz vodnjaka G. Gladine podzemne vode na območju vodnjakov pri povečanem črpanju so prikazane na sliki 39. Primerjava med gladinami podzemne vode brez črpanja, ob trenutnih količinah črpanja in ob povečanju črpanja vode iz vodnjakov na območju vodnjakov

je prikazana na sliki 40, za območje celotnega modela pa v prilogi E. Celotna izhodna datoteka simulacije povečanih količin črpanja podzemne vode se v digitalni obliki nahaja na priloženi zgoščenki. V slikah od 41 do 46 so prikazane gladine podzemne vode ter podolžni in prečni prerezi vodonosnika skozi vodnjake E, F in G po povečanju količin črpanja v avgustu 2003.



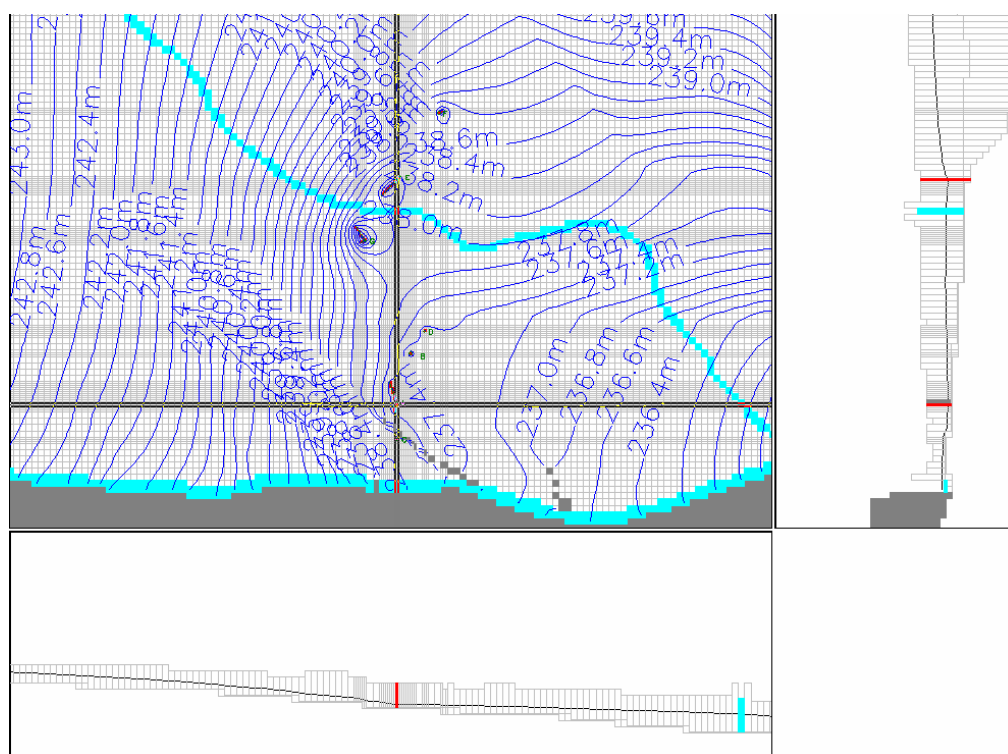
Slika 39: Hidroizohipse gladin podzemne vode ob povečanih količinah črpanja iz vodnjakov v avgustu 2003

Fig. 39: Groundwater level on the area of wells in Medlog at the higher pumping rates in august 2003



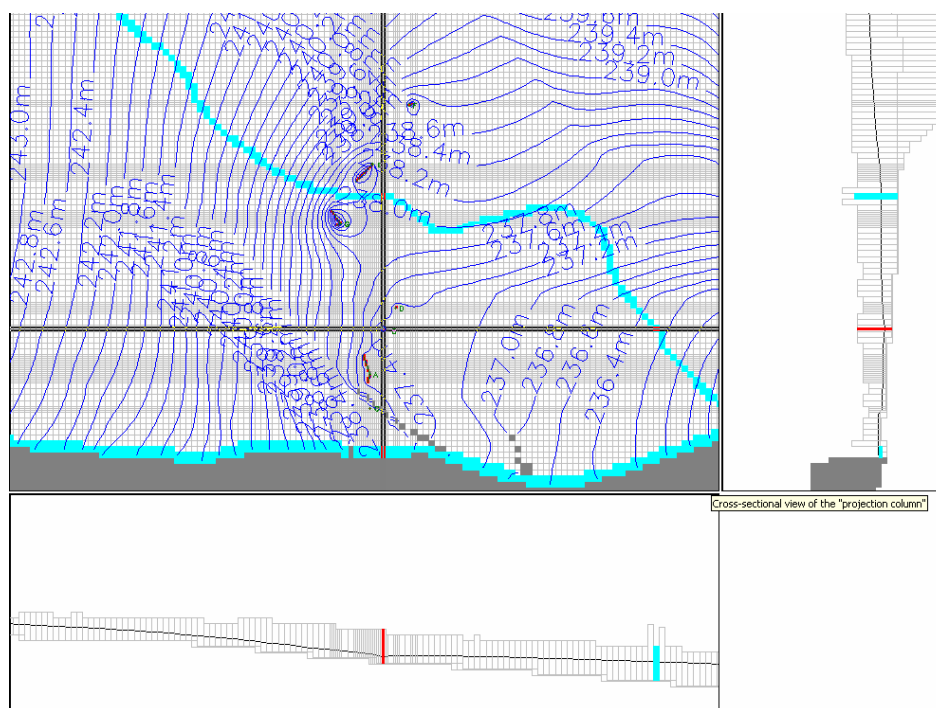
Slika 40: Primerjava gladin v primeru brez črpanja (zelene konture), ob trenutnem maksimalnem črpanju (modre konture) ter povečanih količin črpanja (rdeče konture) v avgustu 2003

Fig. 40: Comparison of groundwater levels at no exploitation (green contours), at preset (blue contours) and higher (red contours) exploitation quantities in august 2003



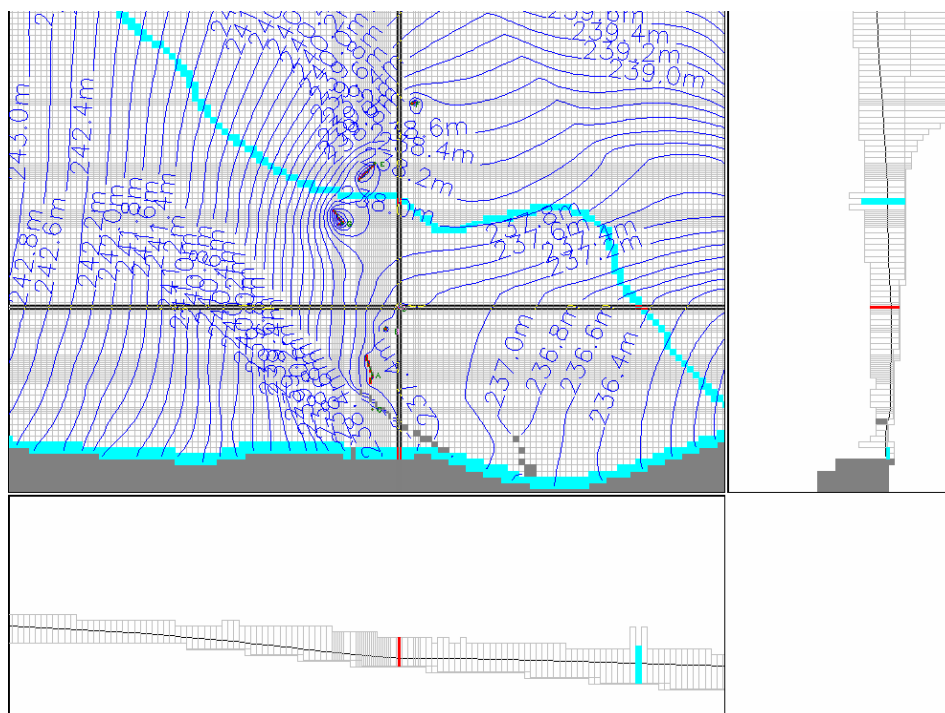
Slika 41: Prečni in podolžni prerez vodnjaka A ob črpanju 22 l/s v avgustu 2003

Fig. 41: Cross-section of the well A at pumping rate 22 l/s in august 2003



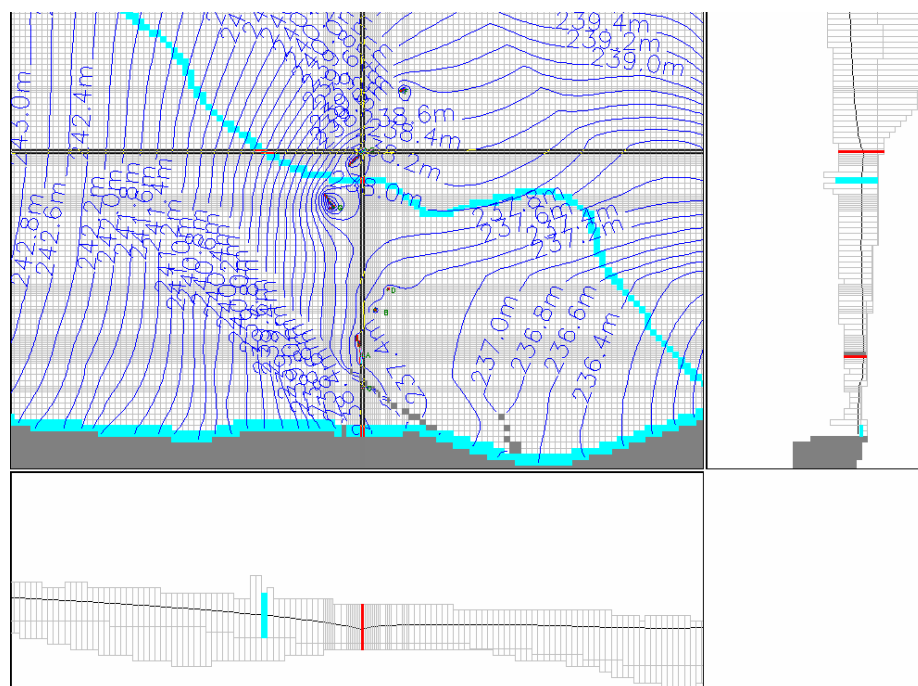
Slika 42: Prečni in podolžni prerez vodnjaka B ob črpanju 16 l/s v avgustu 2003

Fig. 42: Cross-section of the well B at pumping rate 16 l/s in august 2003



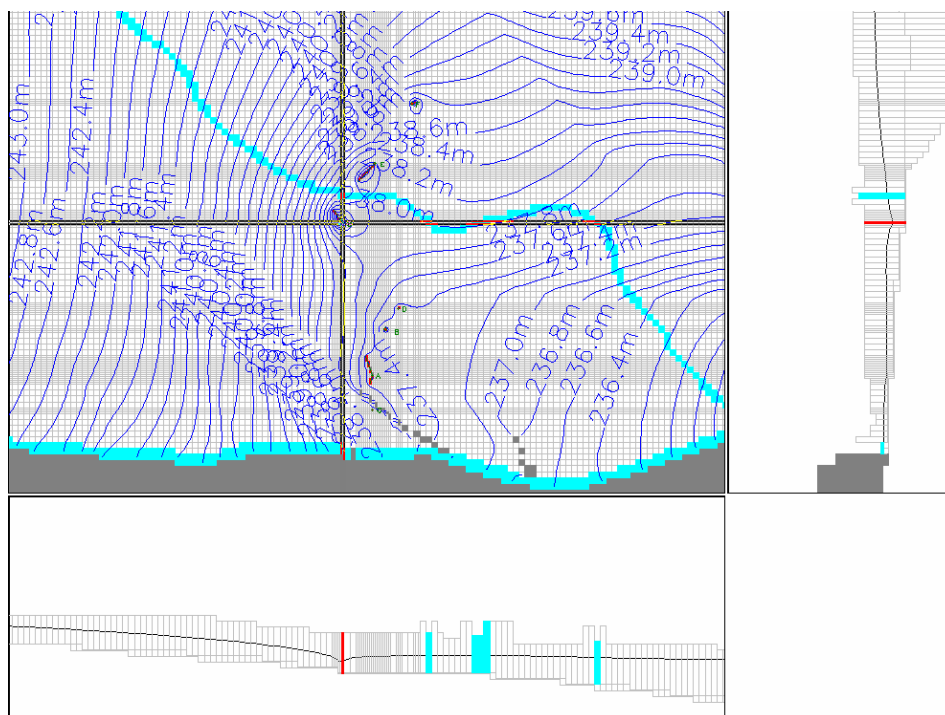
Slika 43: Prečni in podolžni prerez vodnjaka D ob črpanju 10 l/s v avgustu 2003

Fig. 43: Cross-section of the well D at pumping rate 10 l/s in august 2003



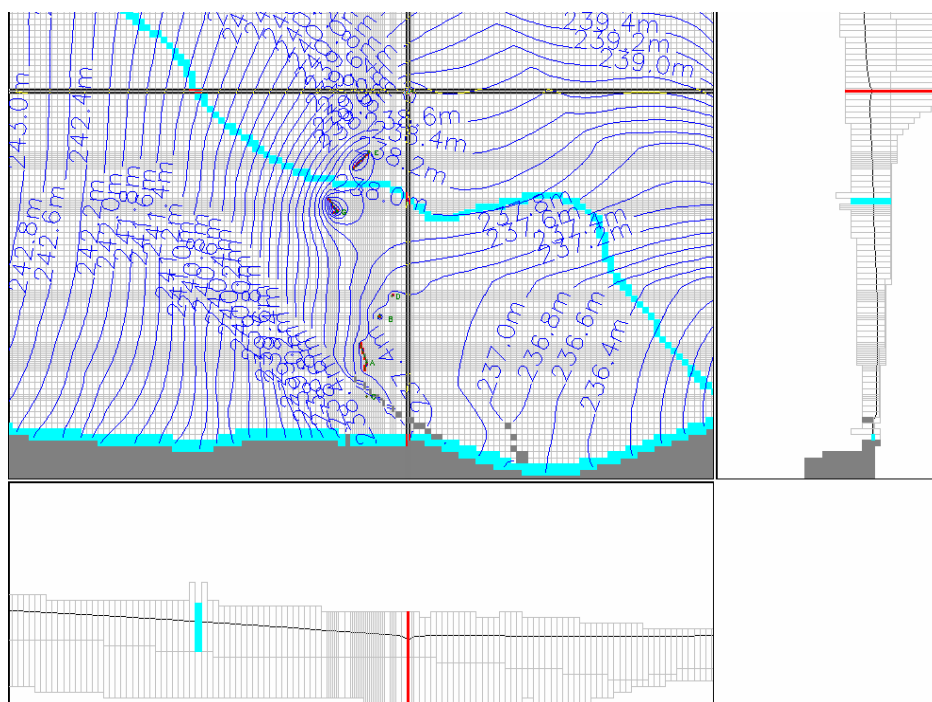
Slika 44: Prečni in podolžni prerez vodnjaka E ob črpanju 65 l/s v avgustu 2003

Fig. 44: Cross-section of the well E at pumping rate 65 l/s in august 2003



Slika 45: Prečni in podolžni prerez vodnjaka G ob črpanju 60 l/s v avgustu 2003

Fig. 45: Cross-section of the well G at pumping rate 60 l/s in august 2003



Slika 46: Prečni in podolžni prerez vodnjaka F ob črpanju 30 l/s v avgustu 2003

Fig. 46: Cross-section of the well F at pumping rate 30 l/s in august 2003

3.4 Simulacija različnih variant umetnega bogatenja

Umetno bogatenje se je v svetu že dokazalo kot zelo učinkovit postopek aktivne zaščite podzemne vode pred onesnaženjem in tudi učinkovit postopek priprave pitne vode ter metode za povečanje izdatnosti vodnjakov.

Kot sem opisal v prvem poglavju, je bila že izdelana študija o možnostih uporabe umetnega bogatenja na območju Medloga, in sicer z namenom priprave pitne vode in zagotavljanja večjih količin pitne vode iz posameznih vodnjakov. V študiji prof. Rismala (1986) je predlagana rešitev umetnega bogatenja s predhodno pripravo vode iz struge Savinje s postopkom usedanja v lamelnem usedalniku, filtriranja na horizontalnih filtrih ter aeracije na kaskadah. Tako pripravljena voda naj bi se infiltrirala v vodonosnik z uporabo infiltracijskih polj. Infiltrirana voda in naravna podzemna voda bi se iz vodonosnika zajemala z uporabo drenaže, ki bi bila povezana z vodnjaki A, B, C in D. Po omenjeni študiji je bila predvidena infiltracija 100 l/s vode.

Po pregledu literature in primerov uporabe umetnega bogatenja v tujini (Zürich) in pri nas (Maribor) sem se odločil, da namesto infiltracijskih polj za infiltracijo vode v vodonosnik uporabim nalivalni vodnjak z drenažama, ki bi omogočale večjo infiltracijo vode v vodonosnik in bi pripomogle k enakomernejši porazdelitvi infiltrirane vode med vodnjaki. Nalivalni vodnjak bi bil lociran na enaki oddaljenosti od vodnjakov A, B, C in D kot infiltracijska polja, kar pomeni 100 m gorvodno od vodnjaka A. Nalivalni vodnjak z drenažami zahteva v primerjavi z nalivalnimi polji manjšo površino za infiltracijo, ker je pokrit, ščiti vodo (ki se infiltrira) pred atmosferskimi vplivi. Za infiltracijo sem predvidel drenaže v takšni dolžini, da bi se porazdelile med vodnjaki A in D. Skupna dolžina drenaž za infiltracijo vode iz nalivalnih vodnjakov bi znašala približno 550 m.

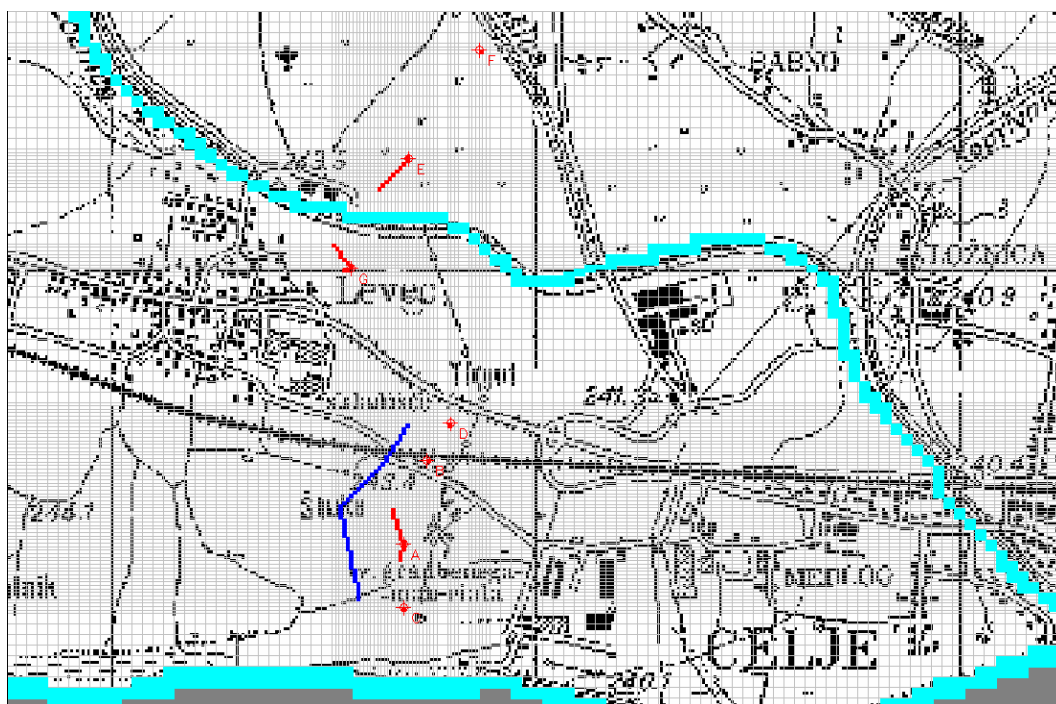
Poleg te možnosti, ki je obdelana z omenjeno študijo, v podjetju Vodovod – kanalizacija, d.o.o. razmišljajo o možnosti, da bi za nalivalni vodnjak uporabili vodnjak C. Njihove izkušnje kažejo, da je črpanje iz vodnjaka A močno vpliva na izdatnost vodnjaka C. Izdatnost vodnjaka C je relativno nizka glede na ostale vodnjake, črpanje vodnjaka A pa njegovo izdatnost še zmanjša. Ta vpliv je bil ugotovljen tudi z matematičnim modelom, ki je pokazal,

da je izdatnost vodnjaka C ob sočasnem črpanju iz ostalih vodnjakov 10 l/s. Vodnjak C na skupno količino načrpane vode bistveno ne vpliva, poleg tega zadnjih nekaj let sploh ni bil v uporabi. Iz teh razlogov bi se vodnjaku C lahko odrekli kot črpalnemu vodnjaku in ga raje uporabili kot nalivalni vodnjak, v katerem bi infiltrirali vodo iz Savinje. Infiltrirano vodo bi nato skupaj z naravno podzemno vodo črpali iz vodnjaka A. Ob tem bi se verjetno povečala tudi izdatnost vodnjaka B. Za infiltracijo bi lahko uporabili tudi obrežni vodonosnik, vendar Savinja in vodonosnik v okolici vodnjaka C nista v stiku, razen ob ekstremno visokih vodostajih Savinje. Tako bi bilo potrebno zajeti obrežni filtrat nekaj 100 m gorvodno ob Savinji, kjer ta vodonosnik napaja.

V nadaljevanju bom zato izvedel simulacijo obeh variant umetnega bogatenja in prikazal rezultate. Za izračun bom uporabil enako vrsto simulacije, kot je bila uporabljena za izračun povečanih količin črpanja podzemne vode iz vodnjakov v Medlogu.

3.4.1 Simulacija umetnega bogatenja z uporabo nalivalnega vodnjaka in drenaž po predlogu preteklih študij

Za simulacijo umetnega bogatenja sem najprej sledil študiji prof. Rismala (1986), upoštevajoč spremembe, ki sem jih opisal v poglavju 3.4. Nalivalni vodnjak sem lociral 100 m vzvodno od vodnjaka A (slika 47). Iz nalivalnega vodnjaka sem predvidel dve drenaži: prva bi potekala v smeri severovzhodno od nalivalnega vodnjaka in bi se končala 100 m gorvodno od vodnjaka D, druga drenaža pa bi potekala v smeri jugozahodno od nalivalnega vodnjaka in bi se končala 100 m gorvodno od nalivalnega vodnjaka. Tako se želena količina vode enakomerno infiltrira na območju gorvodno od vodnjakov A, B, C in D. Lokacija nalivalnega vodnjaka in drenaž je grafično v prostoru prikazana v prilogi F.



Slika 47: Prikaz območja nalivalnega vodnjaka z drenažami (modra polja) za umetno bogatenje

Fig. 47: Area of infiltration well with infiltration drainage (blue cells) for artificial groundwater recharge

Pri vnosu podatkov sem moral drenaže za infiltracijo vode v vodonosnik prikazati z orodjem vodnjak – »Well«, ker orodje za modeliranje drenaž ne omogoča modeliranja drenaže, ki bi napajala vodonosnik. Tako sem vzdolž predvidenih drenaž zgostil računsko mrežo, tako da sem osnovno celico 25×25 m razdelil na devet celic $8,33 \times 8,33$ m. Skupno količino vode za infiltracijo sem enakomerno porazdelil med celice, skozi katere poteka drenaža.

Za zajem infiltrirane vode sem uporabil vodnjake A, B, C in D. V modelu sem pri teh vodnjakih povečal količine črpanja vode na vrednosti prikazane v preglednici 9. Črpanje vode iz vodnjakov A, B, C in D sem povečal za skupno 100 l/, kolikor znaša količina infiltrirane vode skozi nalivalni vodnjak. Iz vodnjakov E, F in G pa sem upošteval, da se črpajo povečane količine naravne podzemne vode iz poglavja 2.3.2.

Preglednica 9: Količine črpanja iz posameznega črpalnega vodnjaka ob uporabi umetnega bogatenja

Table 9: Pumping rates from the wells with artificial recharge

Vodnjak	A	B	C	D	E	F	G	skupaj
skupna količina [l/s]	85	52	10	30	65	30	60	332
količina naravne podzemne vode [l/s]	35	32	0	10	65	30	60	232
količina infiltrirane vode [l/s]	50	20	10	20	0	0	0	100

Po prvem izračunu sem ugotovil, da so se nekateri vodnjaki ob črpanju količin iz preglednice 6 posušijo, zato sem z več poizkusi prerazporedil količine načrpane vode med vodnjaki, da so vsi vodnjaki skupaj zajeli kar največjo količino vode, vendar zelenih 332 l/s ni bilo mogoče tako prerazporediti, da se kateri od vodnjakov ne bi posušil. Zato sem v nadaljevanju zmanjševal količino načrpane vode iz posameznih vodnjakov in ponavljal izračun. Končno stanje količin, ki jih lahko ob umetnem bogatenju s 100 l/s skozi nalivalni vodnjak načrpamo iz vodnjakov A, B, C in D, je prikazano v preglednici 10.

Preglednica 10: Maksimalne količine črpanja iz posameznega črpalnega vodnjaka ob uporabi umetnega bogatenja – izračunane z modelom in august 2003

Table 10: Maximum pumping rates from the wells with artificial recharge – calculated with model in august 2003

Vodnjak	A	B	C	D	E	F	G	skupaj
skupna količina [l/s]	65	45	4	30	65	30	60	299
količina naravne podzemne vode [l/s]	22	16	0	10	65	30	60	203
količina infiltrirane vode [l/s]	43	29	4	20	0	0	0	96

Rezultati simulacije kažejo, da znaša maksimalna skupna količina načrpane vode iz vodnjakov 298 l/s, kar je razvidno iz vodne bilance na sliki 48. Če od tega odštejemo količino infiltrirane vode, znaša količina načrpane naravne podzemne vode 199 l/s, kar je 4 l/s manj, kot je bila maksimalna količina načrpane podzemne vode iz simulacije povečanega črpanja v avgustu 2003. Rezultati kažejo, da je mogoče na ta način zajeti 96 % infiltrirane vode. Vodna

bilanca tudi pokaže, da je mogoče z uporabo umetnega bogatenja s predvidenim nalivalnim vodnjakov močno povečati izdatnosti vodnjakov. Celotna izhodna datoteka simulacije umetnega bogatenja z nalivalnim vodnjakom se v digitalni obliki nahaja na priloženi zgoščenki.

```

PMWBLF (SUBREGIONAL WATER BUDGET) RUN RECORD
FLOWS ARE CONSIDERED "IN" IF THEY ARE ENTERING A SUBREGION
THE UNIT OF THE FLOWS IS [L^3/T]

TIME STEP    31 OF STRESS PERIOD      8

=====
WATER BUDGET OF ZONES OVER THE ENTIRE MODEL
=====

ZONE: 1
-----
              IN              OUT              IN-OUT
STORAGE  1.6375927E-02  0.0000000E+00  1.6375927E-02
WELLS    9.9999942E-02  1.4349997E-01 -4.3500029E-02
RECHARGE 6.0252389E-03  0.0000000E+00  6.0252389E-03
RIVER LEAKAGE 4.8173909E-04  1.8624440E-03 -1.3807049E-03
SUM OF ZONE( 1) 1.8663621E-01  1.8754952E-01 -9.1330707E-04

ZONE: 2
-----
              IN              OUT              IN-OUT
STORAGE  2.0683983E-02  0.0000000E+00  2.0683983E-02
WELLS    0.0000000E+00  1.5450856E-01 -1.5450856E-01
RECHARGE 6.6625685E-03  0.0000000E+00  6.6625685E-03
RIVER LEAKAGE 6.0204147E-06  0.0000000E+00  6.0204147E-06
SUM OF ZONE( 2) 1.9860995E-01  1.9879341E-01 -1.8346310E-04

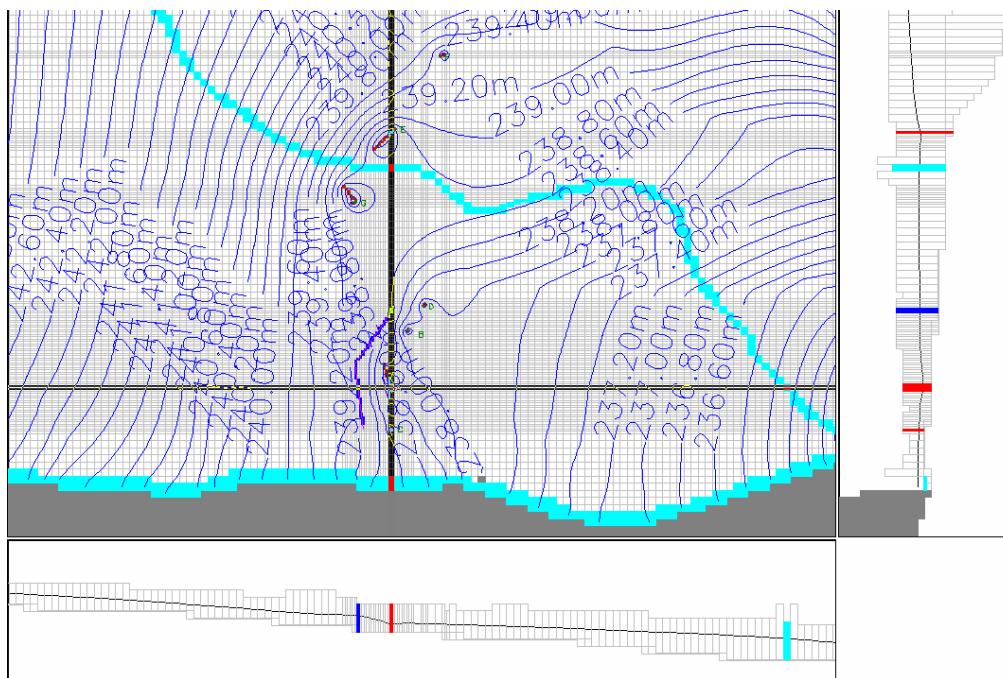
=====
WATER BUDGET OF THE WHOLE MODEL DOMAIN:
=====

FLOW TERM              IN              OUT              IN-OUT
STORAGE  1.6225787E-01  1.0897227E-02  1.5136063E-01
CONSTANT HEAD 9.4804049E-02  1.1015400E-01 -1.5349954E-02
WELLS    9.9999942E-02  2.9860005E-01 -1.9860011E-01
RECHARGE 1.2589502E-01  0.0000000E+00  1.2589502E-01
RIVER LEAKAGE 6.1427813E-04  6.6272065E-02 -6.5657787E-02
-----
SUM  4.8357117E-01  4.8592335E-01 -2.3521781E-03
    
```

Slika 48: Vodna bilanca simulacije umetnega bogatenja z nalivalnim vodnjakom v avgustu 2003

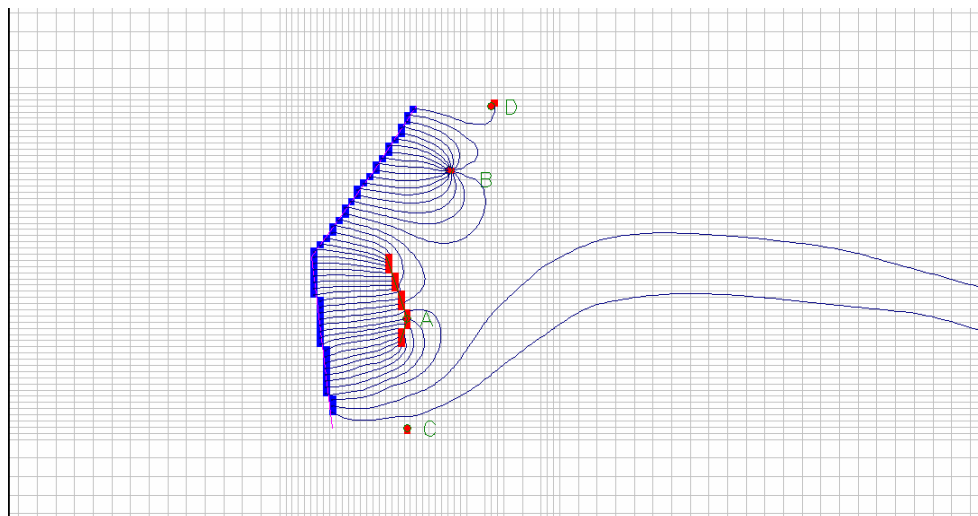
Fig. 48: Water budget of artificial recharge simulation with infiltration through infiltration well in august 2003

Na sliki 49 so prikazane gladine podzemne vode na območju vodnjakov, na sliki 50 pa so prikazane tokovnice podzemne vode pri simulaciji umetnega bogatenja. Območje celotnega modela s hidroizohipsami podzemne vode je prikazano v prilogi G.



Slika 49: Prikaz gladin podzemne vode na območju vodnjakov pri simulaciji umetnega bogatenja skozi nalivalni vodnjak z drenažo ter prereza skozi vodnjak A v avgustu 2003

Fig. 49: Groundwater level on the area of wells at artificial recharge simulation through infiltration well and cross-section of the well A in august 2003



Slika 50: Prikaz tokovnic podzemne vode na območju vodnjakov A, B, C in D pri simulaciji umetnega bogatenja skozi nalivalni vodnjak z drenažo v avgustu 2003

Fig. 50: Groundwater path lines on the area of wells A, B, C and D at simulation of artificial recharge trough infiltration well with drainage in august 2003

3.4.2 Simulacija umetnega bogatenja z uporabo vodnjaka C kot nalivalnega vodnjaka

Kot je bilo omenjeno že na začetku tega poglavja, vodnjak C ob sočasnem črpanju iz vodnjaka A ne zmore zagotavljati več kot 10 l/s vode, kar je v primerjavi z izdatnostmi ostalih vodnjakov malo in se posledično vodnjak C v praksi ne uporablja. Glede na ugotovitve, da črpanje iz vodnjaka A vpliva na gladino vode v vodnjaku C, bi bilo mogoče uporabiti vodnjak C kot infiltracijski vodnjak, v katerega bi nalivali vodo, zajemali pa bi jo z vodnjakom A.

Tako sem v model vnesel vodnjak C kot nalivalni vodnjak, v katerega infiltriramo vodo. Poskušal sem z različno količino infiltrirane vode in ugotovil, da je maksimalna količina vode, ki jo lahko infiltriramo v vodnjak C (pri tem pa ne pride do poplavljanja okoliškega zemljišča), 30 l/s.

Pri črpanju podzemne vode iz vodnjakov sem povečal količino načrpane vode iz vodnjaka A in zagnal izračun. Rezultati so pokazali, da iz vodnjaka A v razmerah iz avgusta 2003, ni

mogoče načrpati količine črpanja naravne podzemne vode (22 l/s), povečane za količino infiltrirane vode (30 l/s), kar pomeni skupno 57 l/s. Pri poskusih, da bi zajel čim več infiltrirane vode, sem v modelu spreminjal količine črpanja iz vodnjaka A. Maksimalna količina načrpane vode iz vodnjaka A je bila 50 l/s, kar je 28 l/s več, kot je znašala povečana količina načrpane vode v avgustu 2003. Izračuni kažejo (preglednica 11), da se je skupna količina načrpane vode pri infiltraciji 30 l/s vode v vodnjak C poveča za 28 l/s, kar pomeni da je izkoristek bogatenja 93 %.

Preglednica 11: Količine načrpane vode iz vodnjakov pri infiltraciji 30 l/s vode v vodnjak C in avgust 2003

Table 11: Pumping rates from the wells at infiltration rate 30 l/s through well C in august 2003

Vodnjak	A	B	D	E	F	G	skupaj
povečana količina črpanja [l/s]	22	16	10	65	30	60	203
črpanje ob umet. bogatenju z vodnjakom C [l/s]	50	16	10	65	30	60	231

Vodna bilanca simulacije infiltracije 30 l/s v vodnjak C je prikazana na sliki 51. Iz prereza na sliki 51 je razviden potek gladine podzemne vode od vodnjaka C proti vodnjaku A. Slika 52 prikazuje hidroizohipse območja vodnjakov A, B, C in D, v njej pa je prikazan tudi prerez vodonosnika skozi vodnjak C. Tokovnice infiltrirane vode na sliki 53 in 54 pa prikazujejo smer toka vode na območju med vodnjakoma C in A v razmerah meseca marca 2003 in v razmerah meseca avgusta 2003. Celotna izhodna datoteka simulacije umetnega bogatenja z vodnjakom C kot nalivalnim vodnjakom se nahaja na priloženi zgoščenki. Hidroizohipse po končani simulaciji za območje celotnega modela so prikazane v prilogi H.

PMWBLF (SUBREGIONAL WATER BUDGET) RUN RECORD
FLOWS ARE CONSIDERED "IN" IF THEY ARE ENTERING A SUBREGION
THE UNIT OF THE FLOWS IS [L³/T]

TIME STEP 31 OF STRESS PERIOD 8

=====

WATER BUDGET OF THE WHOLE MODEL DOMAIN:

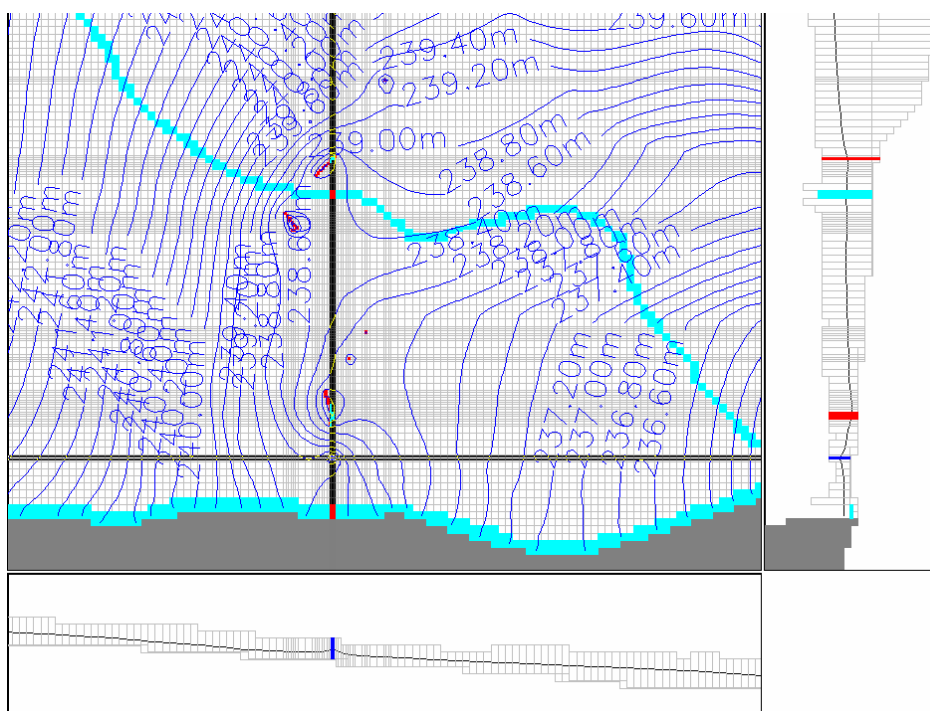
=====

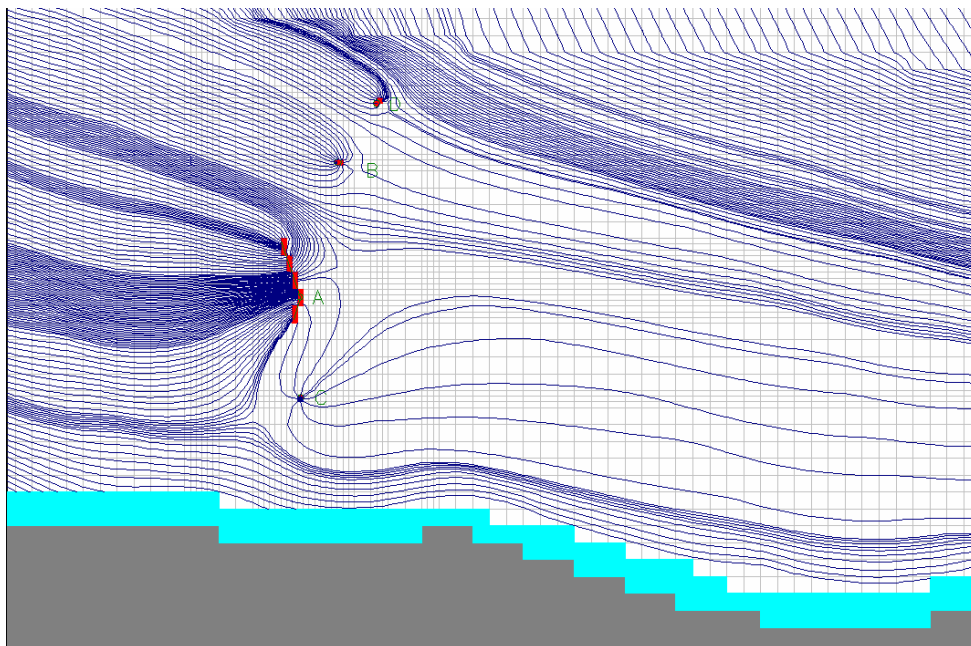
FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	1.6099204E-01	1.1333949E-02	1.4965810E-01
CONSTANT HEAD	9.5694900E-02	1.0832068E-01	-1.2625784E-02
WELLS	2.9999999E-02	2.3059997E-01	-2.0059997E-01
RECHARGE	1.2589030E-01	0.0000000E+00	1.2589030E-01
RIVER LEAKAGE	1.3784230E-03	6.2816769E-02	-6.1438344E-02

SUM	4.1395566E-01	4.1307136E-01	8.8429451E-04

Slika 51: Vodna bilanca modela v primeru bogatenja podzemne vode z vodnjakom C v avgustu 2003

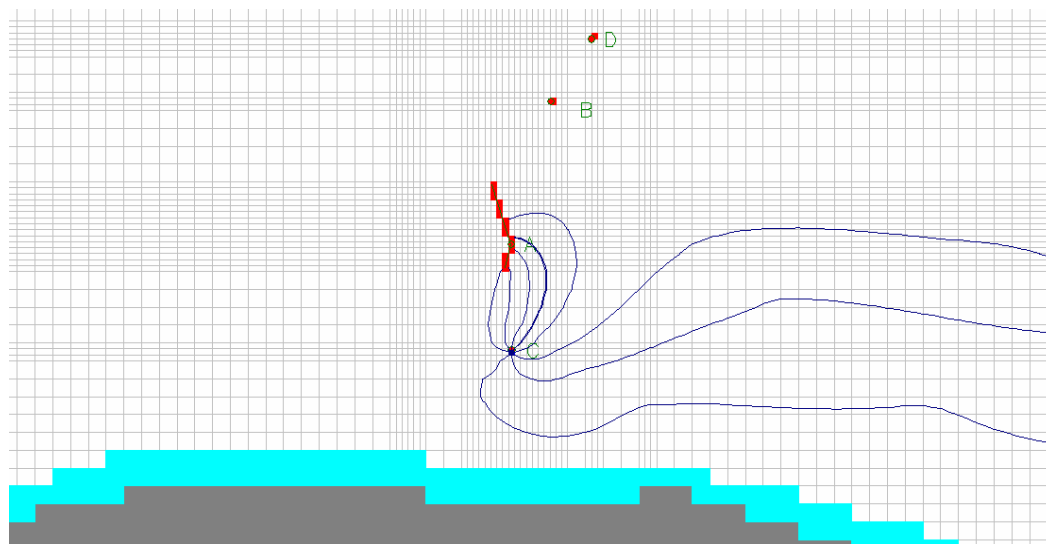
Fig. 51: Water budget of artificial recharge simulation through well C in august 2003





Slika 53: Prikaz tokovnic podzemne in infiltrirane vode na območju vodnjakov ob umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakoma B in C v marcu 2003

Fig. 53: Infiltration water and groundwater path lines on the area of wells at artificial recharge simulation through wells B and C in March 2003



Slika 54: Prikaz tokovnic infiltrirane vode na območju vodnjakov A, B in C ob umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakom C v avgustu 2003

Fig. 54: Infiltration water path lines on the area of wells A, B, C at artificial recharge simulation through well C in august 2003

3.4.3 Simulacija umetnega bogatenja z uporabo vodnjakov B in C kot nalivalnih vodnjakov

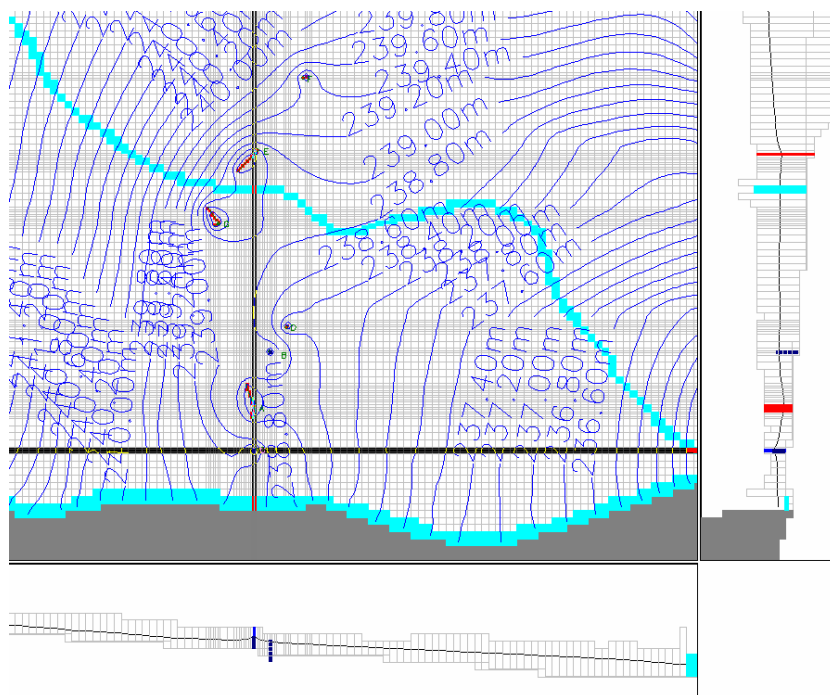
V prejšnjem primeru bogatenja podzemne vode z uporabo vodnjaka C kot nalivalnega vodnjaka se je izkazalo, da precej infiltrirane vode odteče mimo črpalnih vodnjakov, zato sem izvedel še simulacijo za primer, ko bi kot nalivalni vodnjak uporabili še vodnjak B, ki mu poleg vodnjaka C najbolj upade izdatnost v primeru suše, hkrati pa se nahaja med vodnjakoma A in B, ki bi lahko zajela vodo, ki bi jo infiltrirali skozi vodnjak B. Tako sem v model poleg vodnjaka C vnesel še za vodnjak B nalivanje v količini 45 l/s vode. Simulacija je pokazala, da lahko v takšnem primeru načrpamo največ 260 l/s, kar je razvidno iz vodne bilance v sliki 55. Količina načrpane vode brez količine infiltrirane vode je znašala 185 l/s. Izkoristek umetnega bogatenja pa znaša v tem primeru 75 %. Slabši izkoristek je viden tudi na sliki 57, ki prikazuje tokovnice infiltrirane vode iz katerih je razvidno da del vode, ki je nalivamo v vodnjake odteče mimo črpalnih vodnjakov. V sliki 56 pa so prikazane gladine podzemne vode na območju vodnjakov.

PMWBLF (SUBREGIONAL WATER BUDGET) RUN RECORD			
FLOWS ARE CONSIDERED "IN" IF THEY ARE ENTERING A SUBREGION			
THE UNIT OF THE FLOWS IS [L ³ /T]			
TIME STEP 31 OF STRESS PERIOD 8			
=====			
WATER BUDGET OF THE WHOLE MODEL DOMAIN:			
=====			
FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	1.6312431E-01	1.0649459E-02	1.5247485E-01
CONSTANT HEAD	9.2589758E-02	1.1847050E-01	-2.5880747E-02
WELLS	7.5000003E-02	2.6010001E-01	-1.8510000E-01
RECHARGE	1.2590228E-01	0.0000000E+00	1.2590228E-01
RIVER LEAKAGE	8.6036604E-04	6.6428564E-02	-6.5568201E-02

SUM	4.5747671E-01	4.5564854E-01	1.8281639E-03

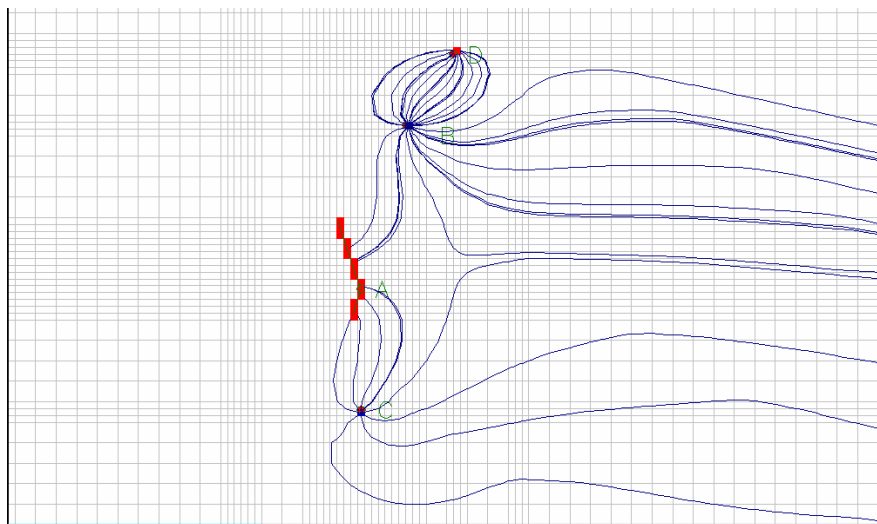
Slika 55: Vodna bilanca modela v primeru bogatenja podzemne vode z vodnjakoma B in C v avgustu 2003

Fig. 55: Water budget of artificial recharge simulation through wells B and C in august 2003



Slika 56: Prikaz gladin podzemne vode na območju vodnjakov ob umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakoma B in C ter prerez skozi vodnjak C v avgustu 2003

Fig. 56: Groundwater level contours on the area of wells at artificial recharge simulation through wells B and C in august 2003



Slika 57: Prikaz tokovnic infiltrirane vode na območju vodnjakov ob umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakoma B in C v avgustu 2003

Fig. 57: Infiltration water path lines on the area of wells at artificial recharge simulation through wells B and C in august 2003

3.5 Razširjeni model

Iz rezultatov v prilogah E, F, G in H je razvidno, da prihaja pri črpanju večjih količin vode do pojava ko vzhodni rob modela, ki ima za robni pogoj nastavljene celice s fiksno gladino držijo te gladine previsoko, in zato prihaja do vdora vode skozi vzhodni rob nazaj v model. Vodna bilanca modela simulacije povečanih količin črpanja, ki je prikazana na sliki 57 kaže, skozi vzhodni rob modela odteka 91.44 l/s doteka pa 16,61 l/s, kar pomeni, da znaša dotok skozi vzhodni rob modela 16 % odtoka. V vodni bilanci na sliki 58 je zahodni rob modela označen kot »zone 3«, vzhodni rob pa kot »zone 4«.

```

PMWBLF (SUBREGIONAL WATER BUDGET) RUN RECORD
FLOWS ARE CONSIDERED "IN" IF THEY ARE ENTERING A SUBREGION
THE UNIT OF THE FLOWS IS [L^3/T]

TIME STEP      1 OF STRESS PERIOD      8

=====
WATER BUDGET OF ZONES OVER THE ENTIRE MODEL
=====

ZONE: 3
-----
              IN              OUT              IN-OUT
STORAGE      1.2150516E-05    4.3441949E-04   -4.2226896E-04
CONSTANT HEAD 5.9093777E-02    4.4973131E-04   5.8644045E-02
HORIZ. EXCHANGE 4.2373512E-04    5.9148017E-02  -5.8724280E-02
RECHARGE      5.8899896E-04    0.0000000E+00   5.8899896E-04
RIVER LEAKAGE 1.1599731E-04    2.8352621E-05   8.7644687E-05
SUM OF ZONE( 3) 6.0260590E-02    6.0239162E-02   2.1427870E-05

ZONE: 4
-----
              IN              OUT              IN-OUT
STORAGE      7.0642540E-07    4.2721664E-04  -4.2651020E-04
CONSTANT HEAD 1.4616271E-02    9.1444135E-02  -7.6827861E-02
HORIZ. EXCHANGE 8.5655816E-02    8.5454341E-03   7.7110380E-02
RECHARGE      3.6400009E-04    0.0000000E+00   3.6400009E-04
RIVER LEAKAGE 0.0000000E+00    1.4043140E-04  -1.4043140E-04
SUM OF ZONE( 4) 1.0072844E-01    1.0064401E-01   8.4437430E-05

=====
WATER BUDGET OF THE WHOLE MODEL DOMAIN:
=====

              IN              OUT              IN-OUT
FLOW TERM
STORAGE      1.5251437E-01    1.2546787E-03   1.5125969E-01
CONSTANT HEAD 7.3710032E-02    9.1893867E-02  -1.8183835E-02
WELLS        0.0000000E+00    2.0359996E-01  -2.0359996E-01
RECHARGE      1.2584680E-01    0.0000000E+00   1.2584680E-01
RIVER LEAKAGE 1.8865608E-03    5.7347640E-02  -5.5461079E-02
-----
SUM          3.5395777E-01    3.5409614E-01  -1.3837218E-04

```

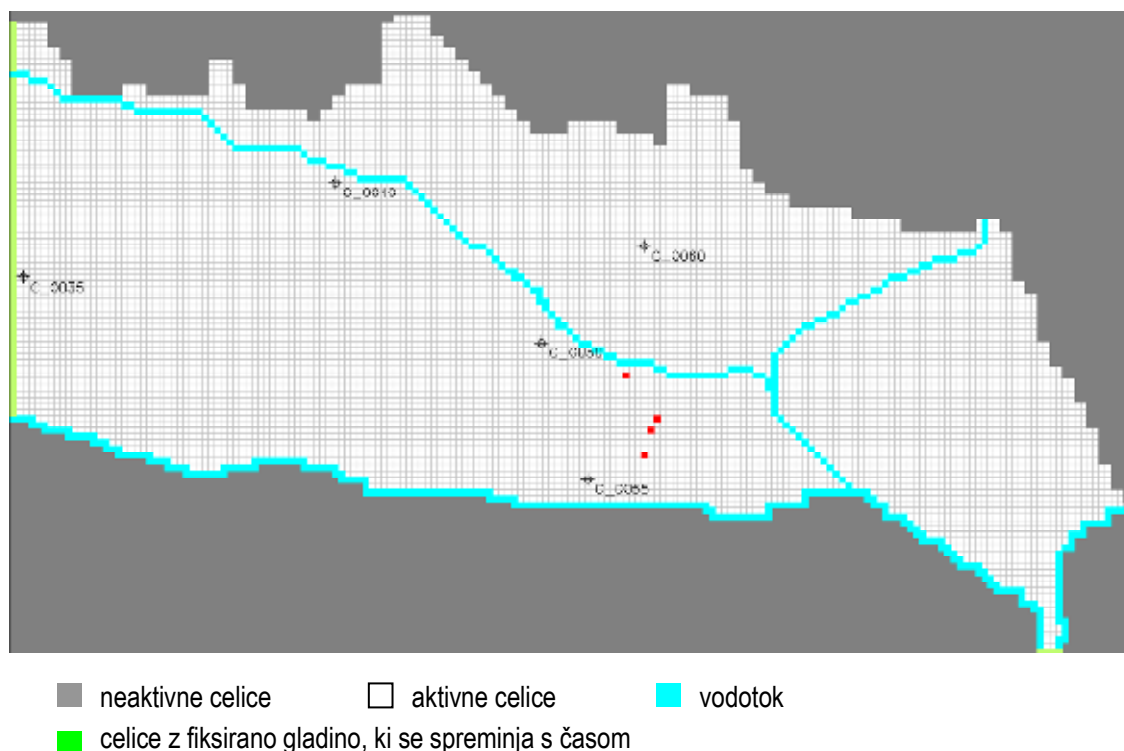
Slika 58: Vodna bilanca simulacije povečanih količin črpanja v avgustu 2003

Fig. 58: Water budget simulation at higher pumping rates in august 2003

V nadaljevanju sem z namenom odpraviti opisane težave in preveriti točnost rezultatov izdelal model s proti vzhodu razširjenim območjem modeliranja.

3.5.1 Opis razširjenega modela podzemne vode

Območje modeliranja sem iz prvotnega modela razširil do sotočja rek Voglajne na vzhodu in Hudinje in na jugu do sotočja rek Savinje in Voglajne. Območje modeliranja je na situaciji prikazano v prilogi I.

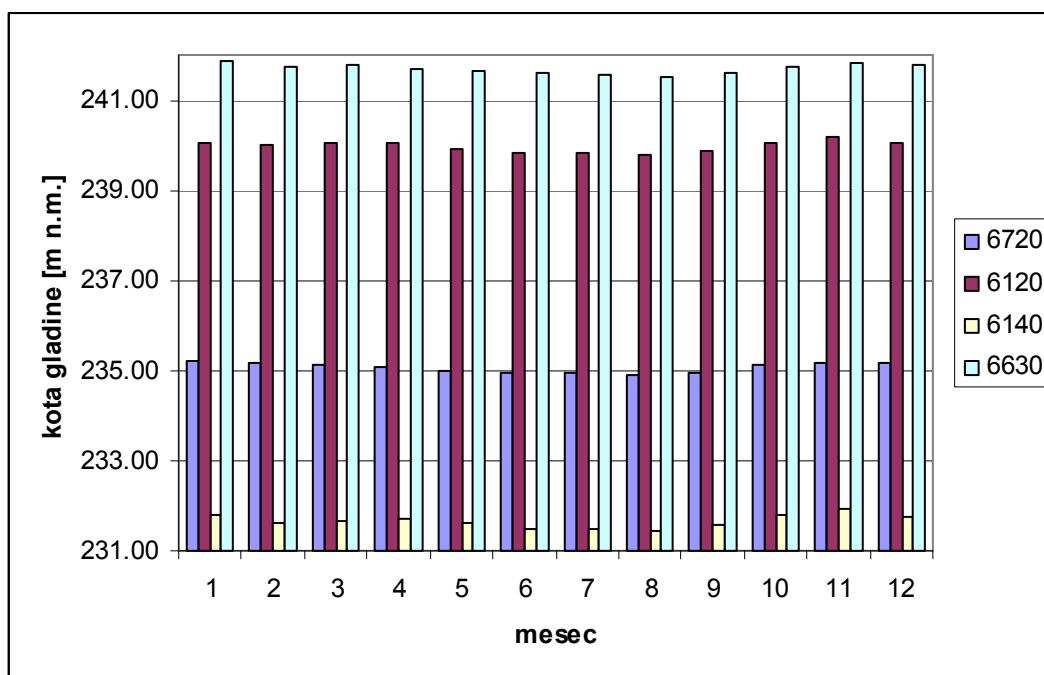


Slika 59: Območje razširjenega modela s prikazom robnih pogojev

Fig. 59: Area of the extended model with boundary conditions

Robni pogoji razširjenega modela na južnem robu predstavlja vzdolž celotnega modela reka Savinja, na vzhodnem robu pa reka Voglajna oz v nadaljevanju rob vodonosnika. Robni pogoji na zahodnem robu modela je ostal nespremenjen. Pri razširitvi modela sem zaradi pomanjkanja podatkov o geometriji in hidrogeoloških karakteristikah vodonosnika privzel, da se vodonosnik proti vzhodu nadaljuje enakomerno v smeri struge Savinje, pri čemer se hidrogeološke karakteristike vodonosnika ne spreminjajo. Velikost celice razširjenega modela znaša 50×50 m, model je sestavljen iz dveh slojev, spodnjega slabo prepustnega in zgornjega bolj prepustnega. Koeficienti hidravlične prepustnosti, efektivna poroznost in ostali

parametri vodonosnika so ostali nespremenjeni. Območje razširjenega modela z prikazanimi robnimi pogoji je prikazano v sliki 59. Razširjeni model je izdelan kot dinamičen model območja vodonosnika spodnje Svinjske doline od Žalca do sotočja Savinje in Voglajne za razmere v letu 2003.



Slika 60: Srednji mesečni vodostaji rek izmerjenih na vodomernih postajah na območju modela v letu 2003 (Uлага, 2008)

Fig. 60: Monthly average water levels of the rivers on the model area in year 2003 (Uлага, 2008)

V razširjeni model sem poleg podatkov iz prvotnega modela vnesel tudi podatke o geometriji strug reke Savinje od sotočja z Ložnico do sotočja z Voglajno, reke Voglajne od sotočja z Hudinjo do sotočja s Savinjo in reke Koprivnice od roba vodonosnika do sotočja z Ložnico. Podatke o geometriji navedenih strug sem povzel iz temeljnega topografskega načrta v merilu 1:1000. Za odsek Savinje od sotočja z Ložnico do sotočja z Voglajno sem uporabil podatke o vodostajih z vodomerne postaje št. 6140, za odsek Voglajne pa podatke o vodostajih izmerjenih na vodomerni postaji 6670 in pri tem privzel, da se vodostaj vzdolž odseka ne spreminja. Za odsek Koprivnice, ki je vnesena v razširjeni model, sem predpostavil, da se vodostaji v njej spreminjajo enako kot v reki Ložnici, katere vodostaji se beležijo na

vodomerni postaji št 6630. Podatke z vodomernih postaj sem pridobil od Agencije RS za okolje in so prikazani v sliki 60.

V razširjenem modelu sem spremenil tudi način vnosa padavin in sicer pri vnosu nisem upošteval, da se infiltrira 50 % količine padavin, temveč sem vnesel celotno količino padavin, pri čemer sem predpostavil, da na območju vodnjakov ni površinskega odtoka. Vpliv evapotranspiracije sem v model vnesel za vsak mesec posebej z uporabo funkcije »evapotranspiration«. Podatke o mesečnih vrednostih potencialne evapotranspiracije v letu 2003 sem pridobili s spletnih strani Agencije RS za okolje in so prikazani v preglednici 12. Pri vnosu sem upošteval dejanske vrednosti evapotranspiracije in po priporočilih Penmana množil pvrednosti koeficientov potencialne evapotranspiracije z koeficientom 0,7. Za globino vpliva evapotranspiracije sem na območju celotnega modela privzeli vrednost 1,70 m, kot jo za travnate površine na meljastih peskih priporočajo Shah s sodelavci.

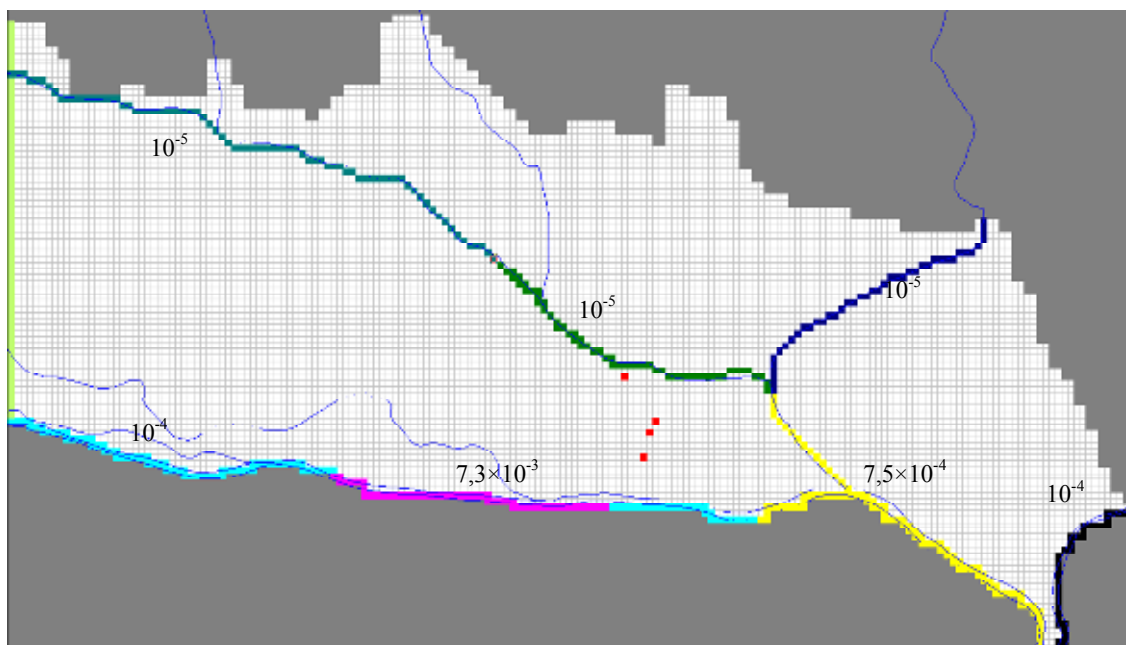
Preglednica 12: Mesečne količine padavin ter vrednosti potencialne in efektivne evapotranspiracije v letu 2003

Table 12: Monthly values of rainfall, potential evapotranspiration end effective evapotranspiration

Padavine [mm]	Potencialna evapotranspiracija [mm]	Dejanska evapotranspiracija [mm]
55	13	9
44	21	15
4	40	28
58	69	48
34	119	83
34	142	99
37	135	95
34	130	91
130	69	48
126	36	25
88	17	12
61	11	8

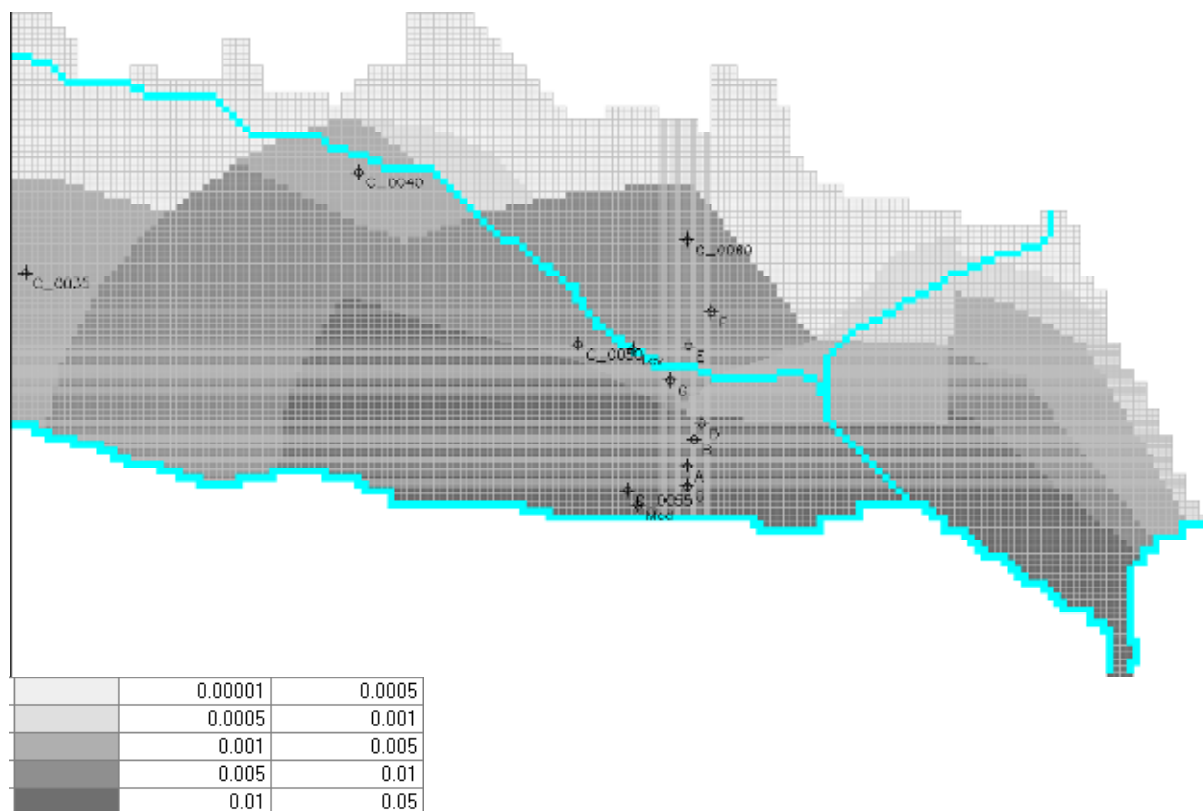
3.5.2 Umerjanje modela

Razširjeni model je bilo potrebno po vnosu vseh podatkov umeriti. Umerjanje je potekalo ročno glede na podatke o srednjem mesečnem nivoju podzemne vode v letu 2003. S postopkom umerjanja so bili določeni koeficienti hidravlične prepustnosti strug rek, ki so bile dodane v model ter korigirane tudi vrednosti strug vodotokov, ki so bile vnesene v že prvotni model. Končne vrednosti so prikazane v sliki 61. V postopku umerjanja je bilo potrebno popraviti tudi nekatere koeficiente hidravlične prevodnosti v zgornjem sloji, končne vrednosti le teh so prikazane v sliki 62.



Slika 61: Odseki rek z umerjeno hidravlično prevodnostjo strug

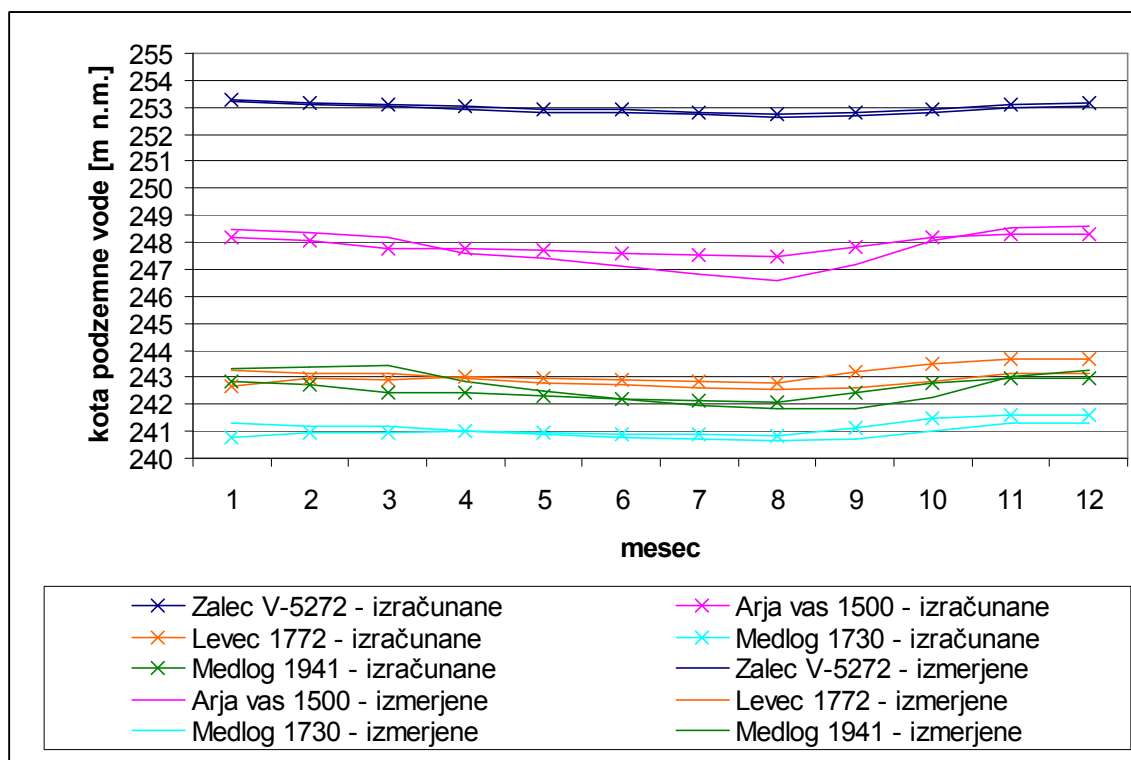
Fig. 61: River reaches with calibrated hydraulic riverbed conductance



Slika 62: Prikaz vrednosti umerjenih koeficientov hidravlične prepustnosti zgornjega sloja

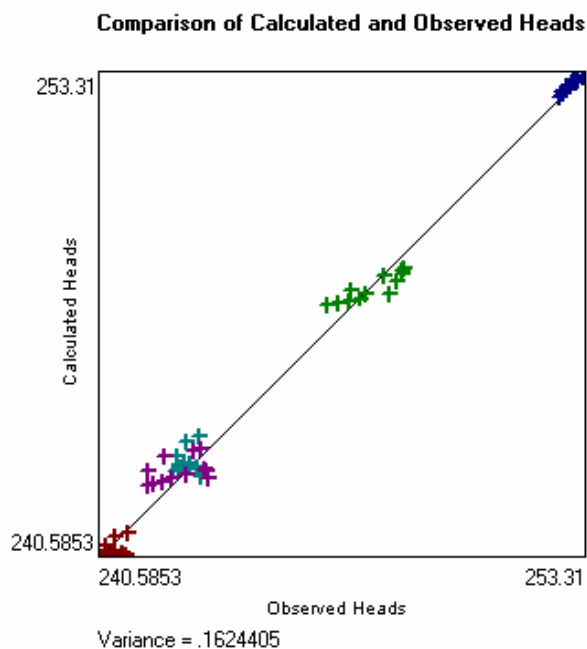
Fig. 62: Values of horizontal hydraulic conductance of the upper layer

Rezultati modela v primerjavi z meritvami po končanem umerjanju za razmere v letu 2003 so prikazani v sliki 63 in 64. Razvidno je, da znaša varianca rezultatov 0,16. V sliki 65 so prikazane hidroizohipse podzemne vode v razmerah avgusta 2003 izračunane z razširjenim modelom ter hidroizohipse podzemne vode izračunane s prvotnim modelom v enakih razmerah.



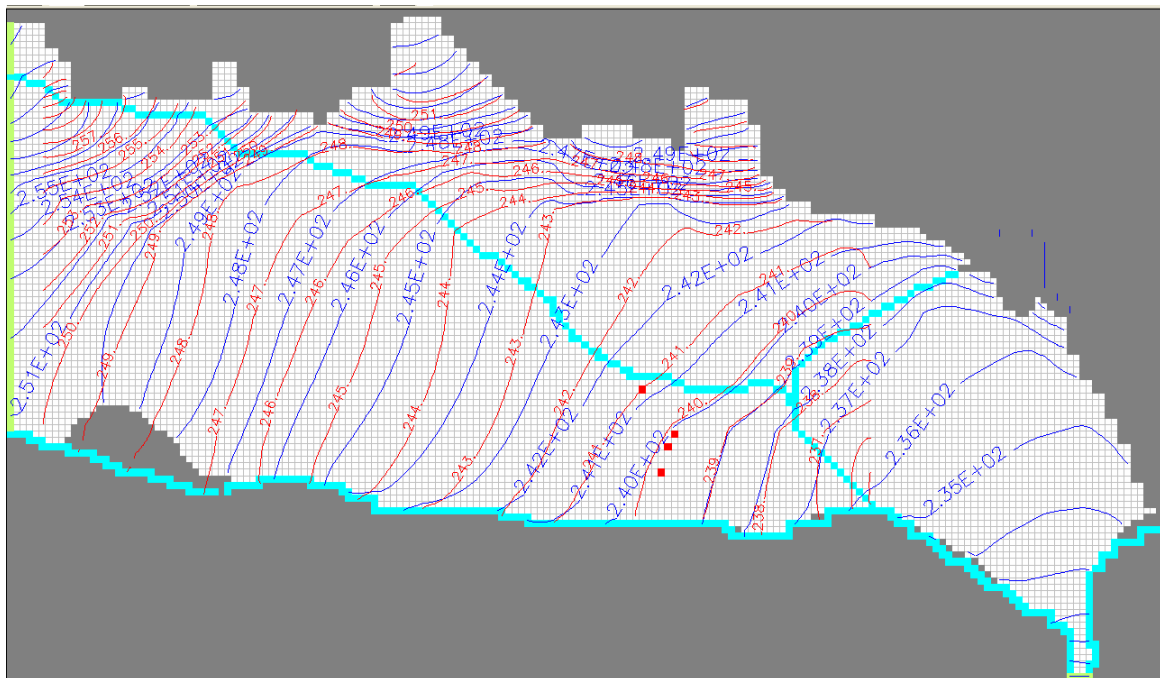
Slika 63: Prikaz izračunanih in izmerjenih gladin podzemne vode v letu 2003

Fig. 63: Calculated and observed groundwater heads in year 2003



Slika 64: Primerjava izračunanih in izmerjenih gladin podzemne vode v letu 2003

Fig. 64: Comparison of calculated and observed groundwater heads in year 2003



Slika 65: Hidroizohipse podzemne izračunane z razširjenim in s prvotnim modelom vode v avgustu 2003.

Fig. 65: Groundwater contours calculated with extended and primary model in august 2003

3.5.3 Ponovitev simulacij črpanja in umetnega bogatenja z razširjenim modelom

Z umerjenim modelom sem v nadaljevanju ponovno izvedel simulacije črpanja trenutnih količin črpanja ter povečanih količin črpanja podzemne vode iz vodnjakov ter simulacijo umetnega bogatenja z nalivalnim vodnjakom opremljenim z infiltracijsko drenažo. Pred vnosom podatkov o količinah črpanja iz posameznega vodnjaka sem velikost celic na območju vodnjakov z velikosti 50×50 m zmanjšal na $16,66 \times 16,66$ m.

3.5.3.1 Simulacija trenutnih količin črpanja

V razširjeni model sem namesto količin črpanja iz leta 2003 vnesel trenutne maksimalne količine črpanja kot so prikazane v preglednici 7 v poglavju 3.3. ter izvedel simulacijo. V sliki 66 je prikazana volumetrična vodna bilanca za leto 2003. Vodna bilanca kaže, da je znašala maksimalna trenutna količina črpanja iz vseh vodnjakov 164 l/s, skupna količina načrpane vode v letu 2003 pa je znašala $5.385.856 \text{ m}^3$. Pri simulaciji črpanja trenutnih količin z

razširjenim modelom se je v razmerah iz leta 2003 vodnjak C posušil v mesecu februarju, v mesecu avgustu pa je pričelo primanjkovati vode tudi vodnjaku A..

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 12			
CUMULATIVE VOLUMES		RATES FOR THIS TIME STEP	
	L**3		L**3/T
IN:		IN:	
---		---	
STORAGE =	3737922.7500	STORAGE =	1.1929E-02
CONSTANT HEAD =	1323327.7500	CONSTANT HEAD =	3.6770E-02
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	83397.3984	RIVER LEAKAGE =	7.4724E-04
ET =	0.0000	ET =	0.0000
RECHARGE =	17423262.0000	RECHARGE =	0.5709
TOTAL IN =	22567910.0000	TOTAL IN =	0.6203
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	6053662.5000	STORAGE =	3.7996E-02
CONSTANT HEAD =	2261954.2500	CONSTANT HEAD =	8.5514E-02
WELLS =	5385856.5000	WELLS =	0.1642
RIVER LEAKAGE =	7088824.0000	RIVER LEAKAGE =	0.3143
ET =	1768753.3800	ET =	1.8085E-02
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	22559052.0000	TOTAL OUT =	0.6201
IN - OUT =	8858.0000	IN - OUT =	2.2435E-04

Slika 66: Volumetrična vodna bilanca razširjenega modela za leto 2003 pri trenutnih količinah črpanja.

Fig. 66: Volumetric water budget of the extended model for year 2003 at current pumping rates

Izračunane gladine podzemne vode v mesecu avgustu leta 2003 so z hidroizohipsami prikazane v prilogi I. Poleg rezultatov razširjenega modela so za primerjavo prikazane tudi hidroizohipse gladin izračunanih s prvotnim modelom.

3.5.3.2 *Simulacija povečanih količin črpanja*

V nadaljevanju sem v razširjenem modelu povečal količine črpanja na vrednosti, kot so prikazane v preglednici 8 v poglavju 3.3.2. ter izvedel simulacijo. V sliki 67 je prikazana

volumetrična vodna bilanca za leto 2003. Simulacija sočasnega črpanja povečanih količin iz vseh vodnjakov z razširjenim modelom je pokazala, da v mesecu avgustu 2003 upade izdatnost vodnjaka A in vodnjaka B. Vodna bilanca kaže, da je znašala maksimalna trenutna količina črpanja iz vseh vodnjakov 198 l/s, skupna količina načrpane vode v letu 2003 pa je znašala 6.300.937 m³.

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 12			
CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----		-----	
IN:		IN:	
---		---	
STORAGE =	4147025.0000	STORAGE =	1.5420E-02
CONSTANT HEAD =	1324041.5000	CONSTANT HEAD =	3.6838E-02
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	88099.4219	RIVER LEAKAGE =	8.9731E-04
ET =	0.0000	ET =	0.0000
RECHARGE =	17412506.0000	RECHARGE =	0.5703
TOTAL IN =	22971672.0000	TOTAL IN =	0.6235
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	5879985.0000	STORAGE =	2.9928E-02
CONSTANT HEAD =	2245639.5000	CONSTANT HEAD =	8.3540E-02
WELLS =	6300937.0000	WELLS =	0.1981
RIVER LEAKAGE =	6871730.0000	RIVER LEAKAGE =	0.2953
ET =	1669377.5000	ET =	1.5780E-02
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	22967670.0000	TOTAL OUT =	0.6227
IN - OUT =	4002.0000	IN - OUT =	7.9662E-04

Slika 67: Volumetrična vodna bilanca razširjenega modela za leto 2003 pri povečanih količinah črpanja

Fig. 67: Volumetric water budget of the extended model for year 2003 at higher pumping rates

Izračunane gladine podzemne vode pri povečanih količinah črpanja iz vodnjakov v mesecu avgustu leta 2003 so z hidroizohipsami prikazane v prilogi J. Poleg rezultatov razširjenega modela so za primerjavo prikazane tudi hidroizohipse gladin izračunanih s prvotnim modelom.

3.5.3.3 *Simulacija umetnega bogatenja*

Pri simulaciji umetnega bogatenja z nalivalnim vodnjakom in infiltracijskima drenažama sem na enak način kot v prvotnem modelu vnesel količine infiltracije ter črpanja iz posameznih celic. Vrednosti črpanja in infiltracije so prikazane v preglednici 10. V sliki 68 je prikazana vodna bilanca za avgust 2003. Vodna bilanca kaže, da je znašala, ob infiltriranju 100 l/s vode, maksimalna trenutna količina črpanja iz vseh vodnjakov 284 l/s. Skupna količina načrpane vode v letu 2003 bi v primeru umetnega bogatenja znašala 8.955.909 m³, ob tem pa bi znašala letna količina infiltrirane vode 3.156.753 m³.

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 12			
CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----		-----	
IN:		IN:	
---		---	
STORAGE =	3998603.2500	STORAGE =	1.4669E-02
CONSTANT HEAD =	1323820.6300	CONSTANT HEAD =	3.6818E-02
WELLS =	3156753.5000	WELLS =	0.1001
RIVER LEAKAGE =	61460.1172	RIVER LEAKAGE =	8.4753E-04
ET =	0.0000	ET =	0.0000
RECHARGE =	17424304.0000	RECHARGE =	0.5709
TOTAL IN =	25964942.0000	TOTAL IN =	0.7234
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	5921677.5000	STORAGE =	2.9954E-02
CONSTANT HEAD =	2260061.2500	CONSTANT HEAD =	8.4561E-02
WELLS =	8955909.0000	WELLS =	0.2840
RIVER LEAKAGE =	7104543.0000	RIVER LEAKAGE =	0.3076
ET =	1724112.2500	ET =	1.6539E-02
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	25966304.0000	TOTAL OUT =	0.7226
IN - OUT =	-1362.0000	IN - OUT =	7.6401E-04

Slika 68: Volumetrična vodna bilanca razširjenega modela za leto 2003.

Fig. 68: Volumetric water budget of the extended model for year 2003

Izračunane gladine podzemne vode v mesecu avgustu leta 2003 so z hidroizohipsami prikazane v prilogi K. Poleg rezultatov razširjenega modela so za primerjavo prikazane tudi hidroizohipse gladin izračunanih s prvotnim modelom.

4 DISKUSIJA REZULTATOV

4.1 Umerjanje modela

Umerjanje modela je bilo izvedeno na osnovi srednjih mesečnih gladin podzemne vode v petih piezometrih. Rezultati umerjanja s programom PMPEST kažejo, da je varianca izračunanih in izmerjenih gladin 0,22 (glej sliko 22). Primerjava prostorskega poteka izračunanih hidroizohips s karto gladin podzemne vode za razmere v avgustu 2000 v sliki 19 kaže precejšnje ujemanje. V sliki 23, v kateri je prikazana primerjava med izračunanimi ter izmerjenimi gladinami podzemne vode, pa je mogoče razbrati, da model v sušnih razmerah daje točnejše rezultate, kot v bolj vodnatih razmerah. Največji razkorak med izmerjenimi in izračunanimi gladinami podzemne vode se pojavi v piezometrih, ki so locirani na severnem območju modela v mesecih, ko je vodostaj Ložnice najvišji. Razlog za slabše rezultate modela v bolj vodnatih razmerah je po mojem mnenju v tem, da model nima dovolj realno upoštevanega vpliva manjših vodotokov, ki dotekajo s severnega roba modela. Iz rezultatov sklepam, da vodostaji v teh potokih nihajo podobno kot v reki Ložnici, v katero se izlivajo in v vodnatih razmerah vplivajo na gladino podzemne vode na severnem območju modela. Zaradi pomanjkanja meritev in podatkov o vodostajih in geometriji strug teh vodotokov pri izgradnji modela ni bilo mogoče vnesti v model kot reke, temveč sem njihov vpliv upošteval z uporabo paketa »rechrg«.

Glede na rezultate umerjanja ocenjujem, da je natančnost modela je dovolj dobra za izvedbo izračunov v sušnih razmerah, da se lahko preverijo hipoteze, postavljene v prvem poglavju.

V prvem poglavju sta bili postavljeni naslednji hipotezi:

- povečane količine črpanja iz posameznih vodnjakov ne bodo bistveno vplivale na naravni tok podzemne vode;
- umetno bogatenje podzemne vode je ustrezna rešitev za povečanje izdatnosti vodnjakov v Medlogu ter za znižanje koncentracij nitratov in drugih onesnažil v

načrpani vodi, saj iz Savinje obogatena čistejša voda odrine onesnaženo podzemno vodo.

4.2 Preveritev prve hipoteze

Simulacija trenutno maksimalnih količin črpanja je pokazala, da vsi vodnjaki v sušnih razmerah, kot so se pojavile v letu 2003, ob kontinuiranem črpanju vode iz vseh vodnjakov hkrati, ne morejo vse leto zagotavljati te količine vode. Leto 2003 je bil sušno, saj je bila količina padavin, ki je zapadla v obdobju od januarja do avgusta, zelo nizka. V simulaciji trenutnih količin črpanja so sušne razmere vplivale predvsem na vodnjak C, ki je presahnil po 94 dneh črpanja, medtem ko so ostali vodnjaki celo leto 2003 uspeli zagotavljati trenutno maksimalne količine vode. V nadaljevanju je bila v enakih razmerah izvedena še simulacija povečanih količin črpanja iz posameznih vodnjakov. Količine črpanja so bile s trenutnih povečane na količine, ki bi jih podjetje Vodovod – kanalizacija, d.o.o. želelo črpati v prihodnje. Izračun je pokazal, da je mogoče črpanje povečati količine črpanja le iz vodnjakov E, F in G, saj so količine črpanja iz vodnjakov na območju stare vodarne že maksimalne. V primeru večjega črpanja iz katerega izmed vodnjakov se v sušnih razmerah najprej se zniža izdatnost vodnjaka B, nato pa prične vode primanjkovati še vodnjaku A. Kot zadnjemu pa prične na območju stare vodarne primanjkovati vode vodnjaku D. Ta pojav lahko razložimo s tem, da je vodonosnik na območju vodnjakov A, B in C najplitvejši in njegova debelina počasi raste v smeri J-S, Zaloge podzemne vode so tako tukaj najmanjše, poleg tega pa na nivoje podzemne vode vpliva tudi Savinja, ki gorvodno od navedenih vodnjakov drenira vodonosnik.

Rezultati iz simulacije trenutnih in povečanih količin črpanja podzemne vode kažejo, da prve hipoteze ni mogoče popolnoma potrditi. Količine črpanja ni mogoče povečati v vseh vodnjakih. Vsak posamezni vodnjak lahko sam zase zagotavlja precej višje količine vode, kot pa so te v primeru, sočasno delujejo vsi vodnjaki. Na izdatnost vodnjakov vpliva tudi dolžina zveznega črpanja iz njih. V primeru kontinuiranega črpanja iz vseh vodnjakov hkrati znaša trenutna maksimalna količina vode, ki mogoče načrpati v sušnih razmerah 203 l/s, skupna

letna količina pa znaša 6.650.000 m³ vode. Maksimalne količine črpanja za posamezne vodnjake, določene z modelom, so prikazane v zadnji vrstici preglednice 13.

Preglednica 13: Trenutne, dovoljene, želene ter z modelom določenih maksimalnih količin črpanja iz vodnjakov v Medlogu

Table 13: Present, allowed, desired and maximum calculated pumping rates from wells in Medlog

Vodnjak	A	B	C	D	E	F	G	skupaj
maksimalna količina črpanja dovoljena z vodnim dovoljenjem [l/s]	35	32	10	10	60	15	50	212
maksimalna trenutna količina črpanja [l/s]	35	32	10	10	42	15	50	194
željena povečana količina črpanja [l/s]	45	45	0	15	65	30	60	260
maksimalna količina črpanja določena z modelom ob razmerah od januarja do maja 2003 [l/s]	35	32	0	10	65	30	60	232
maksimalna količina črpanja določena z modelom ob razmerah avgusta 2003 [l/s]	22	16	0	10	65	30	60	203

Rezultati modela kažejo, da imajo vodnjaki A, B, C in D, ki ležijo južno od ceste Celje–Ljubljana, velik medsebojni vpliv. Ta vpliv na območju vodnjakov E, F in G ni viden, vodnjaki pa brez težav omogočajo črpanje zelenih povečanih količin vode. Razlog za to vidim v večji debelini vodonosnika na območju vodnjakov E, F in G v primerjavi z debelino vodonosnika na območju vodnjakov A, B, C in D. Poleg tega so izračuni modela pokazali, da drenaže zelo močno vplivajo na količino vode, ki jo je mogoče zajeti iz vodnjaka.

Prepustnosti vodonosnika v zgornjem sloju, kjer se nahajajo vodnjaki, so relativno visoke, saj znašajo med $1,7 \times 10^{-2}$ do 5×10^{-3} , tako večje črpanje iz enega izmed vodnjakov v sušnih razmerah vpliva na izdatnost bližnjih vodnjakov. V primeru, ko je potrebno v sušnih razmerah načrpati maksimalne količine vode, se kažeta možnosti dveh režimov črpanja podzemne vode in sicer

- Črpanje poteka iz vseh vodnjakov hkrati, vendar pri tem črpalke v vodnjakih na območju stare vodarne ne delujejo s polno močjo,
- Črpanje poteka z manjšim številom vodnjakov, na območju stare vodarne delujeta le vodnjaka A in D, ki črpata z maksimalno močjo, ostali vodnjaki pa ne obratujejo.

Preglednica 14 prikazuje gladine v vodnjakih in piezometrih Levec 1772 in Medlog 1730 ob različnih količinah črpanja. Padec gladin zaradi povečanja črpanja v piezometrih znaša med 20 in 90 cm glede na lokacijo piezometra, medtem ko je padec gladin v vodnjakih večji in znaša od približno 50 do 160 cm. Primerjava hidroizohips različnih količin črpanja na sliki 39 pokaže, da povečanje količin črpanja vpliva na znižanje gladin na širšem območju vodnjakov.

Preglednica 14: Gladine v vodnjakih in piezometrih Levec 1772 in Medlog 1730 ob simulaciji različnih količin črpanja

Table 14: Groundwater levels in wells and boreholes at simulating different pumping rates

Vodnjak, piezometer	Kota gladine podzemne vode			Znižanje gladin glede na razmere brez črpanja	
	brez črpanja	trenutna količina črpanja	povečana količina črpanja	trenutna količina črpanja	povečana količina črpanja
Arja vas 1500	247.12	247.13	246.92	-0.01	0.20
Levec 1772	242.48	241.93	241.35	0.55	1.13
Medlog 1730	240.51	239.99	239.83	0.52	0.68
Medlog 1941	241.95	241.13	240.23	0.82	1.72
B	239.79	237.50	237.04	2.29	2.75
D	239.86	238.18	237.47	1.67	2.39
E	241.17	239.42	237.74	1.75	3.44
F	241.25	239.84	238.24	1.42	3.02
G	240.93	238.86	237.07	2.07	3.86

Povečanje količin načrpane vode iz vodnjakov A, B, C in D ni smiselno, saj se ob povečanju črpanja iz enega vodnjak zmanjša izdatnost ostalih. Črpanje večjih količin vode na območju teh vodnjakov bi omogočilo umetno bogatenje vodonosnika, saj bi to vneslo v vodonosnik dodatne količine razpoložljive vode. Povečati je tako smiselno črpanje iz vodnjakov E, F in G. Glede na karakteristike A, E in G, pa je smiselna tudi izdelava drenaže za vodnjak F, ki bi mu še precej povečala izdatnost. Pri modeliranju se je namreč izkazalo, da so drenaže pri črpanju večjih količin vode – iz vodnjakov, ki jih že imajo – bistvenega pomena.

4.3 Preveritev druge hipoteze

Primeri umetnega bogatenja, ki sta bila simulirana in opisana v poglavju 3.4, prikazujeta, kako infiltracija vode vpliva na količine načrpane vode. Uporaba umetnega bogatenja je smiselna na območju vodnjakov A, B, C in D iz več razlogov. Prvi razlog je ta, da so količine naravne podzemne vode, ki jo je mogoče zajeti s temi vodnjaki, omejene; drugi pa v tem, da je relativno blizu reka Savinja, ki predstavlja potencialen vir vode za bogatenje. Umetno bogatenje bi omogočalo aktivno zaščito vodnjakov pred onesnaženjem, ki bi se v podzemno vodo infiltriralo gorvodno od vodnjakov, hkrati pa bi se s tem zmanjšale koncentracije nitratov, saj bi se podzemna voda redčila z infiltrirano vodo. Kot je bilo navedeno v prvem poglavju so najvišje koncentracije nitratov izmerjene ravno v vodnjaku A.

Umetno bogatenje s količino 100 l/s infiltrirane vode skozi nalivalni vodnjak in drenaže bi omogočilo povečanje črpanja iz vodnjakov A, B, C in D za 96 l/s (preglednica 10). Izkoristek umetnega bogatenja v tem primeru zanaša 96 %. Predvideno drenažo nalivalnega vodnjaka bi bilo glede na tokovnice v sliki 49 smiselno podaljšati še nekoliko v smeri vodnjaka C tako, da bi se infiltrirana voda enakomerneje razporedila gorvodno nad vodnjakom C in bi tako lahko zajel tisto količino vode, ki je sicer odtekla mimo.

Drugi primer kaže, da je vodnjak C možno uporabiti kot nalivalni vodnjak, izkoristek takšnega postopka pa je še vedno precej ugoden. Ob infiltraciji 30 l/s bi bilo mogoče v sušnih razmerah načrpati iz vodnjaka A dodatnih 28 l/s, kar pomeni, da je izkoristek takšnega postopka umetnega bogatenja 93 %. V ugodnejših hidroloških razmerah je tok naravne podzemne vode močnejši pa vodnjak A zajame manj infiltrirane vode saj jo naravna podzemna voda odrine dolvodno, kot je to razvidno 52 in 53.

Iz primerjave prve in druge variante umetnega bogatenja vidimo, da je umetno bogatenje postopek, ki ga je mogoče uporabiti za povečanje izdatnosti, zmanjševanje koncentracij nitratov v načrpani vodi in aktivno zaščito vodnjakov v Medlogu, vendar je pri načrtovanju tega postopka ključnega pomena lokacija infiltracije vode za bogatenje. Druga varianta umetnega bogatenja, to je uporaba vodnjaka C, se je izkazala za manj uspešno, saj ob vodnatih razmerah naravna podzemna voda odrine infiltrirano vodo stran od črpalnega

vodnjaka A, s tem pa ni zagotovljena aktivna zaščita vodnjaka. Na obravnavanem območju je mogoče uporabiti obe varianti umetnega bogatenja, vendar prva zaradi bolj optimalne pozicije infiltracije omogoča uporabo umetnega bogatenja tudi v bolj vodnatih razmera in aktivno zaščito črpalni vodnjakov pred onesnaženjem, ki bi se pojavilo gorvodno.

4.4 Preverjanje rezultatov prvotnega modela z razširjenim modelom

Razširjeni model je bil izdelan predvsem z namenom preveriti kolikšen je vpliv vzhodnega robnega pogoja v prvotnem modelu, ki je bil določen s celicami s fiksno gladino na rezultate simulacij različnih količin črpanja v sušnih razmerah, kot so se pojavile v letu 2003. Iz rezultatov prvotnega modela (glej priloge E, F, G in H) je namreč razvidno, da vzhodni robni model drži gladine podzemne vode na enaki koti, ne glede na količino črpanja. V model tako pri črpanju večjih količin vode prične skozi vzhodni rob dotekati voda, ki lahko vpliva, da so izračunane gladine podzemen vode in izdatnosti vodnjakov višje, kot bi bile v realnosti, kjer tega dotoka vode z vzhoda ni prisotnega. Ob izračunu vodne bilance ob tem robu se je izkazalo, da ob povečanem maksimalnem črpanju vode iz vseh vodnjakov, 16% vode ki odteče skozi vzhodni rob, skozi ta rob tudi doteka v model. V nadaljevanju je bil tako za obdobje leta 2003 izdelan dinamični model, ki ima proti vzhodu in jugu razširjeno območje modeliranja. Z razširitvijo modela se robni pogoj na vzhodu odmaknil od območja vodnjakov vodarne Medlog, hkrati pa predstavlja vzhodni robni v razširjenem modelu reka Voglajna, kar posnema razmere v naravi. Poleg razširitve območja modela je pri razširjenem modelu pri vnosu padavin bolj realno vnesen vpliv evapotranspiracije. Prvotni model je predvideval da se infiltrira 50% padavin, pri razširjenem modelu pa so v medel vnesene mesečne vrednosti evapotranspiracija na območju Celja v letu 2003.

Z navedenimi korekcijami modela je bila pri umerjanju modela doseženo boljše ujemanje izračunanih gladin podzemne vode v letu 2003 z izmerjenimi, varianca rezultatov se je iz 0,22 zmanjšala na 0,16. Primerjava rezultatov prvotnega modela in razširjenega modela, ki je prikazana v preglednici 15 ter v prilogah I, J in K.

Preglednica 15: Primerjava rezultatov prvotnega modela in razširjenega modela

Table 15: Comparison of results between primary and extended groundwater model

Količine črpanja	Prvotni model	Razširjeni model	Razlika
Trenutne količine črpanja	184 l/s	164 l/s	-10,8 %
Povečane količine črpanja	203 l/s	198 l/s	-2,5 %
Umetno bogatenje z nalivalnim vodnjakom	298 l/s	284 l/s	-4,7 %

Primerjava rezultatov pokaže, da se največje razlike pojavijo pri simulaciji trenutnih količin črpanja. Pri simulaciji trenutnih količin črpanja z razširjenim modelom pride na območju vodnjakov A, B, C in D, do večjega padca gladin kot pri osnovnem modelu in zato izdatnosti teh vodnjakov prej upadejo. Nižje izdatnosti vodnjakov pri simulaciji črpanja z razširjenim modelom so posledica spremenjenega robnega pogoja na vzhodnem robu, ki ne omogoča dotokov vode z vzhoda in pa upoštevanje vpliva evapotranspiracije, ki v sušnem obdobju pomembno vpliva na vodno bilanco vodonosnika. Vpliv evapotranspiracije je še posebej močan na območju stare vodarne, kjer ja vodonosnik precej plitvejši, kot pa na območju novejših vodnjakov.

4.5 Priporočila za nadaljnji razvoj modela podzemne vode na območju Spodnje Savinjske doline

V nadaljevanju raziskovanja in modeliranja podzemne vode na obravnavanem območju bi bilo potrebno pridobiti dodatne meritve gladin podzemne vode in več podatkov o potokih, ki pritekajo iz hribovja severno od obravnavanega območja. S temi podatki bi bilo mogoče natančneje v določiti vpliv potokov na severnem delu območja na podzemno vodo in le te pravilneje vključiti v model. Za natančnejše umerjanje bi bilo potrebno izvesti tudi meritve gladin podzemne vode v dodatnih piezometrih, ki bi bili enakomerno razporejeni preko celotnega območja.

Za večjo zanesljivost modela ter boljše umerjanje bi bilo potrebno z meritvami pretokov vodotokov na več odsekih ovrednotiti dejanski vpliv vodotokov na podzemno vodo ter pridobiti dejanske podatke o koeficientih hidravlične prevodnosti vodonosnika. V

razpoložljivi literaturi so na voljo le koeficienti o hidravlični prepustnosti vodonosnika na območju vodnjakov za črpanje pitne vode v Medlogu. Na preostalih delih območja modela pa so ti koeficienti ocenjeni in ročno umerjeni glede na meritve gladin podzemne vode. Za natančnejše podatke o koeficientih hidravlične prepustnosti vodonosnika bi bilo potrebno izvesti črpalne preizkuse.

Možnosti za izboljšanje modela v prihodnjih raziskavah bi torej bile predvsem:

- umerjanje na osnovi meritev gladin podzemne vode v več kot petih točkah,
- z meritvami preveriti vpliv vodotokov na posameznih odsekih na vodonosnik,
- uporaba koeficientov prepustnosti vodonosnika pridobljenih s črpalnimi preizkusi,
- pri modeliranju je potrebno upoštevati vrednosti evapotranspiracije, saj ta v sušnem obdobju pomembno vpliva na vodno bilanco.

V prihodnjih raziskavah in nadgradnjah modela bi bilo smiselno uporabiti transportni modul programskega paketa PEST za modeliranje koncentracij nitratov v podzemni vodi. Rezultati takšne simulacije bi pokazali, kakšen bi bil učinek umetnega bogatenja na predvideno znižanje koncentracij nitratov v načrpani vodi iz vodnjakov.

5 ZAKLJUČEK

Za izdelavo matematičnega modela za potrebe magistrskega dela so bili uporabljeni podatki iz razpoložljive literature, podatki iz arhiva javnega podjetja Vodovod – kanalizacija, d.o.o. ter podatki Agencije RS za okolje. Umerjanje modela je bilo izvedeno glede na srednje mesečne gladine podzemne vode. Po končanem umerjanju je zanašala varianca izračunanih in izmerjenih gladin 0,22. Za natančnejše umerjanje bi bilo potrebno pridobiti dodatne meritve gladin podzemne vode ter narediti nekatere popravke modela.

Z umerjenim dinamičnim modelom so bile izvedene simulacije črpanja različnih količin podzemne vode iz vodnjakov v Medlogu v sušnih razmerah (leto 2003) ter ob sočasnem črpanju iz vseh vodnjakov. Poleg prvotnega modela je bil izdelan tudi razširjeni model, s katerim so bile ponovljene simulacije različnih količin črpanja ter preverjen vpliv vzhodnega robnega pogoja modela na rezultate. Primerjava rezultatov prvotnega in razširjenega modela je pokazala, da so maksimalne količine načrpane vode iz vodnjakov na območju Medloga v sušnih razmerah, izračunane z razširjenim modelom, 10 % nižje od maksimalnih količin črpanja izračunanih z prvotnim modelom. Na osnovi rezultatov izračunov je bilo ugotovljeno, da se lahko povečajo količine črpanja iz vodnjakov E, F ter G in sicer na količine, ki so prikazane v preglednici 16. Povečanje količin črpanja iz vodnjakov A, B, C in D ni smiselno, saj se v sušnih razmerah pojavijo težave že z zagotavljanjem trenutnih količin črpanja. Skupna letna količina podzemne vode, ki jo je v sušnih razmerah mogoče odvzeti iz vodonosnika pa znaša 6.300.000 m³. Pri tem so upoštevani rezultati razširjenega modela, ki daje nižje rezultate.

Preglednica 16: Maksimalne količine črpanja vode iz vodnjakov in maksimalne količine letno zajete vode

Table 16: Maximal pumping rates and exploitation quantities from the wells per year

Vodnjak	A	B	D	E	F	G	Skupaj
maksimalna količina črpanja [l/s]	35	32	10	65	30	60	234

Rezultati modela so pokazali, da drenaže, ki so izdelane v nekaterih vodnjakov, pomembno povečajo izdatnost vodnjaka.

V nadaljevanju sta bili izvedeni še simulaciji dveh variant uporabe umetnega bogatenja na območju vodnjakov v Medlogu. Prva varianta predvideva izgradnjo nalivalnega vodnjaka z drenažami 100 m gorvodno od vodnjakov A, B, C in D, v katerega bi se infiltrirala voda iz Savinje v količini 100 l/s. Vodo bi bilo potrebno pred infiltracijo ustrezno pripraviti. Infiltrirana voda bi se nato črpala za vodnjaki A, B, C in D. Simulacija je pokazala, da bi lahko poleg količine naravne podzemne vode zajeli približno 96 % infiltrirane vode. Maksimalna količina načrpane vode bi tako znašala 332 l/s vode. Rezultati kažejo, da takšen postopek umetnega bogatenja primeren za uporabo na področju vodnjakov v Medlogu in bi omogočil povečanje izdatnosti vodnjakov ter znižanje koncentracij nitratov v načrpani vodi. V drugi varianti umetnega bogatenja je bila opravljena simulacija infiltracije 30 l/s vode v vodonosnik skozi vodnjak C. Infiltrirana voda se je črpala z vodnjakom A. Rezultati simulacije so pokazali, da bi s takšnim postopkom v sušnih razmerah lahko zajeli 93 % infiltrirane vode.

Matematični model, bi bilo pri morebitnem nadaljnjem razvoju priporočljivo nadgraditi z nekaterimi spremembami in sicer:

- umerjanje na osnovi meritev gladin podzemne vode v več kot petih točkah,
- umerjanje koeficientov prepustnosti strug vodotokov na osnovi dodatnih meritev,
- umerjanje z uporabo podatkov o dnevni gladini podzemne vode, dnevni količini padavin ter dnevnem vodostaju vodotokov,
- uporaba transportnega modela za simulacijo koncentracij nitratov v podzemni vodi in učinka umetnega bogatenja na znižanje koncentracij v načrpani vodi.

Za prihodnje raziskave in modeliranje podzemne vode na obravnavanem območju, bi bile koristne predvsem meritve koeficientov hidravličnih prevodnosti na območju zahodno in vzhodno od vodnjakov, kjer ti niso znani, meritve gladin podzemne vode v dodatnih piezometrih in meritve vpliva posameznih odsekov vodotokov na vodonosnik. Z navedenimi

meritvami bi pridobili dodatne oz. manjkajoče podatke za natančnejše umerjanje in posledično točnejše rezultate izračunov.

6 POVZETEK

V magistrskem delu je obravnavano matematično modeliranje podzemne vode na območju vodonosnika Spodnje Savinjske doline med naseljema Žalec in Celje. V okviru magistrskega dela je bil izdelan tridimenzionalni napovedovalni model podzemne vode na obravnavanem območju. Model je bil izdelan s programskim paketom Procesing Modflow for Windows (PMWIN).

Za izdelavo modela so bili uporabljeni podatki iz razpoložljive literature, podatki iz arhiva javnega podjetja Vodovod – kanalizacija, d.o.o. ter podatki Agencije RS za okolje. Model je bil umerjen glede na srednje mesečne gladine podzemne vode. Po končanem umerjanju je zanašala varianca izračunanih in izmerjenih gladin 0,22. Z umerjenim modelom so bile v nadaljevanju izvedene dinamične simulacije črpanja različnih količin podzemne vode iz vodnjakov v Medlogu v sušnih razmerah ter ob sočasnem črpanju iz vseh vodnjakov. Najprej je bila izvedena simulacija črpanja maksimalnih količin, ki jih trenutno lahko načrpa upravljavec vodnjakov: javno podjetje Vodovod – kanalizacija, d.o.o. Zaradi večje varnosti oskrbe vodovodnega sistema Celje s pitno vodo, želi upravljavec povečati dovoljeno količino načrpane vode iz vodnjakov. Povečanje črpanja je bilo simulirano z modelom. Rezultati kažejo, da je količine črpanja podzemne vode iz vodnjakov mogoče povečati.

V nadaljevanju sta bili izvedeni še simulaciji dveh variant uporabe umetnega bogatenja na območju vodnjakov v Medlogu. Prva varianta predvideva izgradnjo nalivalnega vodnjaka z drenažami 100 m gorvodno od vodnjakov A, B, C in D, v katerega bi se infiltrirala voda iz Savinje v količini 100 l/s. Vodo bi bilo potrebno pred infiltracijo ustrezno pripraviti. Infiltrirana voda bi se nato črpala za vodnjaki A, B, C in D. Simulacija je pokazala, da bi bil izkoristek takšnega postopka 96 %. Druga varianta umetnega bogatenja predvideva infiltracijo 30 l/s vode v vodonosnik skozi vodnjak C, črpanje infiltrirane vode pa z vodnjakom A. Rezultati simulacije so pokazali, da bi s takšnim postopkom lahko v sušnih razmerah zajeli 93 % infiltrirane vode.

7 SUMMARY

The master thesis deals with groundwater modelling in the area of aquifer in Spodnja Savinjska dolina between Žalec and Celje. As a part of the thesis the three-dimensional predictive groundwater model of that area was developed. It was developed with the programme package Processing Modflow for Windows (PMWIN).

For the development the data from the available literature and the archives of the public company Vodovod-kanalizacija d.o.o. and Agencija RS za okolje were used. The model was calibrated by the average monthly measurements of the groundwater levels. After the calibration the variance of calculated and measured levels was 0.22. With the calibrated model later the transient simulations of the extraction of various quantities of groundwater simultaneously from all the Medlog wells in dry conditions were carried out. At first the simulation of the groundwater extraction of maximum quantities possible for the operator of the wells (the public company Vodovod-kanalizacija) to be extracted was carried out. Due to greater safety of the Celje drinking water supply the operator wants to increase the permitted quantity of the water extracted from the wells. Increasing of the extraction was simulated by the model. The results show that it is possible to increase the quantity of groundwater extraction from the wells.

Further on the simulations of two possible variants of usage of the artificial recharge of groundwater bodies in the area of the Medlog wells were carried out. The first variant envisages construction of infiltration well with a drainage 100 metres upstream from the wells A, B, C and D where water from the Savinja river in quantity of 100 l/s would be infiltrated. Before the infiltration water should be prepared appropriately. The infiltrated water would then be extracted after the wells A, B, C and D. The simulation has shown that the efficiency of that process would be 96 percent. The second variant of the artificial recharge envisages the infiltration of 30 l/s of water to the aquifer through the well C and the extraction of the infiltrated water with the well A. The results of the simulation have shown that with such process 93 percent of infiltrated water could be captured in droughty conditions.

VIRI IN LITERATURA:

Agencija RS za okolje, 2008. WFS ARSO,
<http://gis.arso.gov.si/wfs?STORE=ARSOGIS>, (18. 3. 2008).

Agencija RS za okolje, 2009. Agrometeorologija - Mesečna poročila,
http://www.arso.gov.si/vreme/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/agro_mesecna.html
(22.8.2009)

Bear, J., 2007. Hydraulics of groundwater. Mineola, Dover Publications, : 569 str.

Brilly, M., Šraj, M., 2005. Osnove hidrologije, UL FGG, 309 str.

Brenčič, M., 1998. Strokovne podlage za zaščito virov pitne vode vzdolž priključka Celje zahod. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije: 72 str.

Brenčič, M., Janža, M., 2002. Vpliv izgradnje bencinskega servisa na zahodni celjski obvoznici na podzemno vodo vodonosnika vodarne Medlog Levec. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije: 7 str.

Chiang, W. - H. in Kienzelbach, W., 1991–2001: Procesing Modflow for Windows, Version 5.3.0, CD-ROM, (programska oprema in navodila za uporabo).

Chiang, W. - H. in Kienzelbach, W., 2003. 3D-groundwater modeling with PMWIN : a simulation system for modeling groundwater flow and pollution, Berlin, Springer, Third corrected printing: 346 str.

Drobne, F., 1977. Varstveno območje črpališč pitne vode v Medlogu pri Celju. Ljubljana: Geološki zavod Ljubljana, 14 str.

Drobne, F., Mencej, Z., 1984. Mnenje o hidrogeoloških razmerah na širšem področju črpalnih vodnjakov A, B, C in D vodarne Medlog v Celju v obdobju od aprila do decembra 1983. Ljubljana, Geološki zavod Ljubljana: 14 str.

Gaberšček, J., 1988. 80 letnica celjskega vodovoda. Celje, Komunala: 16 str.

Jesenovec, B., 2008. Podatki o kakovosti reke Savinje v Medlogu, (2.10.2008, elektronska pošta), Ljubljana, Agencija RS za okolje.

Ježek, R., 1977. Študija ureditve Savinje: Študija stabilnosti korita reke Savinje v km 24,580–38,079. Brno, HDP Brno, Polytechna-Hydroprojekt:

Koler - Povh, T., 2004. Navodila za oblikovanje zaključnih izdelkov študijev na FGG in navajanje virov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 43 str.

Mencej, Z., Drobne, F., 1971. Hidrogeološki parametri kvartarnega zasipa na območju vodnjaka E/71 pri Levcu. Ljubljana: Geološki zavod Ljubljana, 23 str.

Mencej, Z., Marinko, M., 1980. Poročilo o izdelavi vodnjaka H/80 s predlogom zaščitnih pasov. Ljubljana, Geološki zavod Ljubljana, 19 str.

Mencej, Z., Marinko, M., 1980. Predlog varstvenih pasov za zaščito podtalne vode v vodnjaku H/80 v Medlogu. Ljubljana, Geološki zavod Ljubljana: 19 str.

Nartnik, M., 2004. Modeliranje podzemne vode Ljubljanskega polja. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 121 str.

Nartnik, M., 2004. Modeliranje toka podzemne vode s programom Modflow. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 329 str.

Pravilnik o pitni vodi. Ur. l. RS, št. 19/2004: 2155-2166.

Rismal, M., 1986. Študija umetnega bogatenja podzemne vode za povečanje zmogljivosti črpališč vodovoda Celja v Medlogu. Ljubljana, Inštitut za zdravstveno hidrotehniko: 56 str.

Rus, A., 1985. Umetno bogatenje podzemne vode za vodovod Celje. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo.

Shah, N., et al., 2007. Extinction depth and Evapotranspiration from Groundwater under selected Land Covers, National Ground Water Association,
<http://info.ngwa.org/gwol/pdf/070882078.pdf> (22.8.2009)

Todd, D. K. in Mays, L. W., 2005. Groundwater hydrology. Hoboken, J. Wiley & Sons, tretja izdaja: 636 str.

Uhan, J., 2008, Podatki o gladinah podzemne vode, (14. 2. 2008, elektronska pošta), Ljubljana, Agencija RS za okolje.

Uhan, J., 2008. Podatki o gladinah podzemne vode, (14. 2. 2008, elektronska pošta), Ljubljana, Agencija RS za okolje.

Uhan, J., 2008. Podatki o količini padavin, (2. 10. 2008, elektronska pošta), Ljubljana, Agencija RS za okolje.

Ulag, F., 2008. Podatki o pretokih in vodostajih rek, (22.9.2008, elektronska pošta), Ljubljana, Agencija RS za okolje.

Vodovod – kanalizacija, 2006. Poročilo za leto 2006. Celje, Vodovod – kanalizacija.

Vodovod – kanalizacija, 2008.

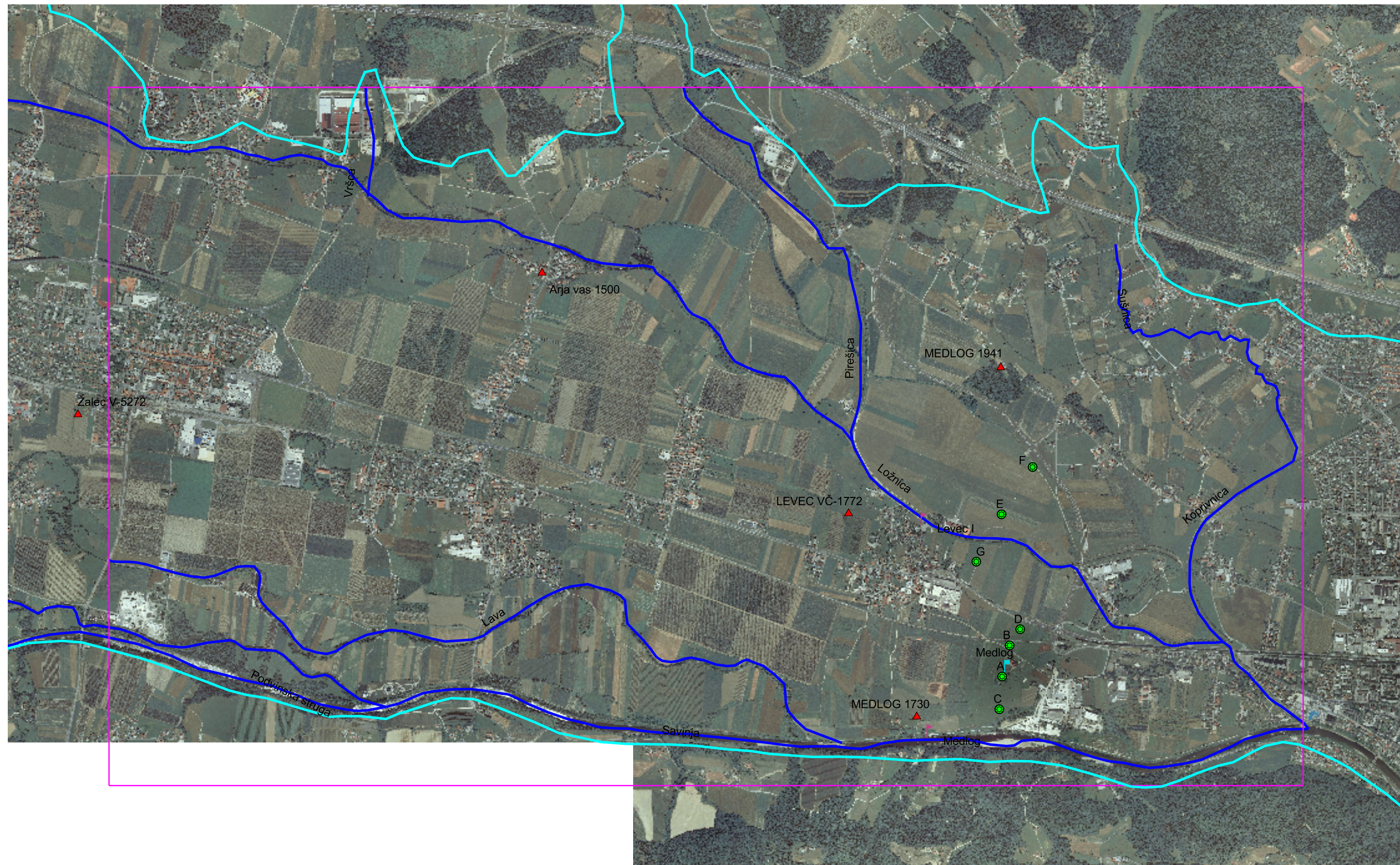
<http://www.vo-ka-celje.si/podjetje/dejavnost/vodovod.htm> (31. 4. 2008).

Vodovod – kanalizacija, 2008. Digitalni kataster podjetja.

Volfand, J. (ur.), 1998. 90 let celjskega vodovoda. Celje, Mestna občina Celje, Vodovod – kanalizacija: 31 str.

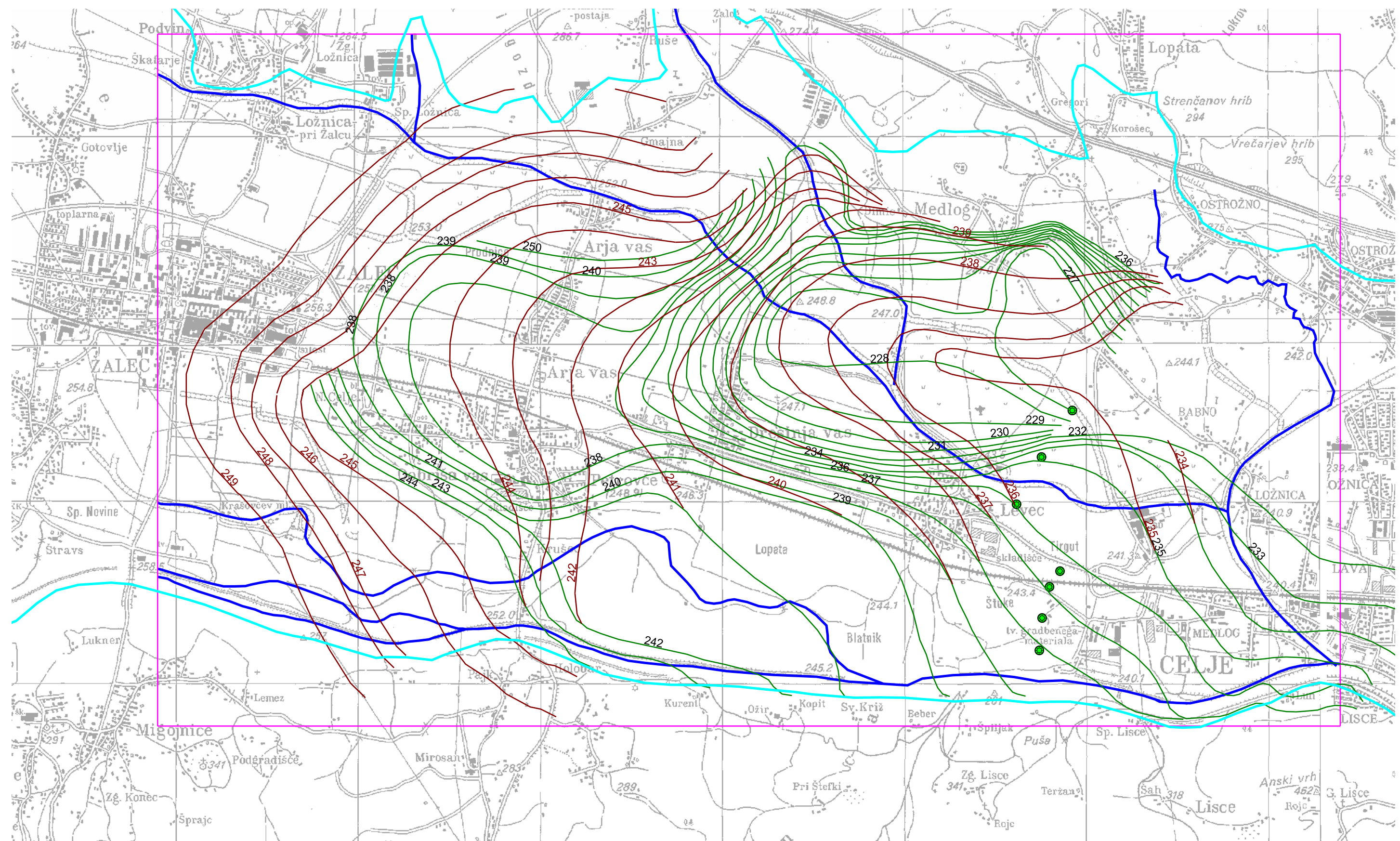
PRILOGE

1. Priloga A: Prikaz območja modela in merilnih mest uporabljenih pri izdelavi modela
2. Priloga B: Izohipse neprepustne podlage in meje med slojema vodonosnika
3. Priloga C: Hidrogeološka karta s prikazom območja modela
4. Priloga D: Karta gladin izdelana za obdobje avgusta 2000 s prikazom območja modela
5. Priloga E: Hidroizohipse podzemne vode pri različnih količinah črpanja
6. Priloga F: Prikaz lokacije nalivalnega vodnjaka in drenaž za umetno bogatenje
7. Priloga G: Hidroizohipse podzemne vode pri umetnem bogatenju podzemne vode z nalivalnim vodnjakom z drenažami
8. Priloga H: Hidroizohipse podzemne vode pri umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakom C
9. Priloga I: Hidroizohipse podzemne vode pri črpanju trenutnih maksimalnih količin izračunane s prvotnim in razširjenim modelom
10. Priloga J: Hidroizohipse podzemne vode pri črpanju povečanih maksimalnih količin izračunane s prvotnim in razširjenim modelom
11. Priloga K: Hidroizohipse podzemne vode pri umetnem bogatenju podzemne vode z nalivalnim vodnjakom z drenažami izračunane s prvotnim in razširjenim modelom



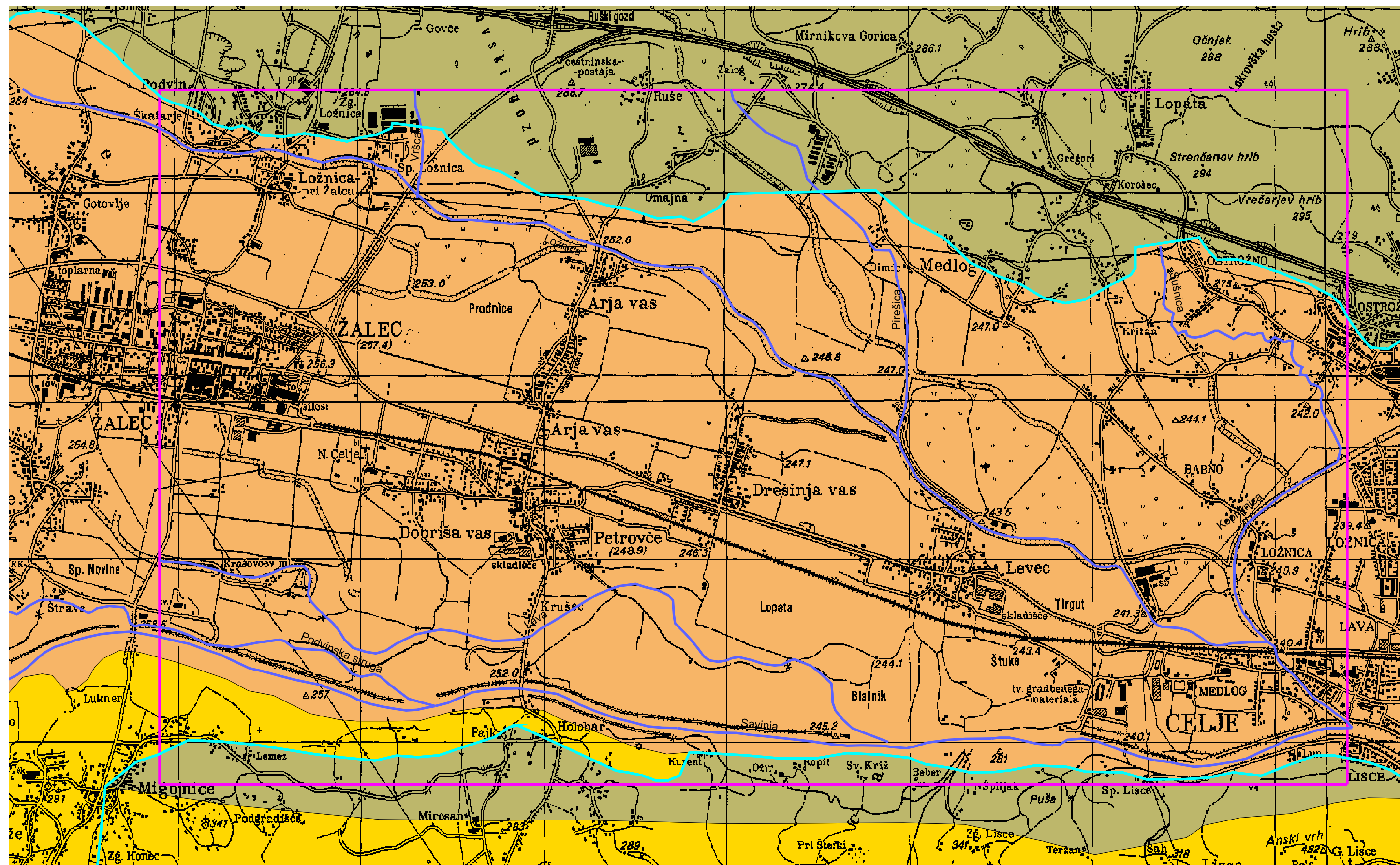
- Meja vodonosnika
- Območje modela
- Vodnjak
- Vodomerna postaja
- Os vodotoka
- Piezometer
- Meteorološka postaja

Priloga A: Prikaz območja modela in merilnih mest uporabljenih pri izdelavi modela
Merilo 1 : 20.000



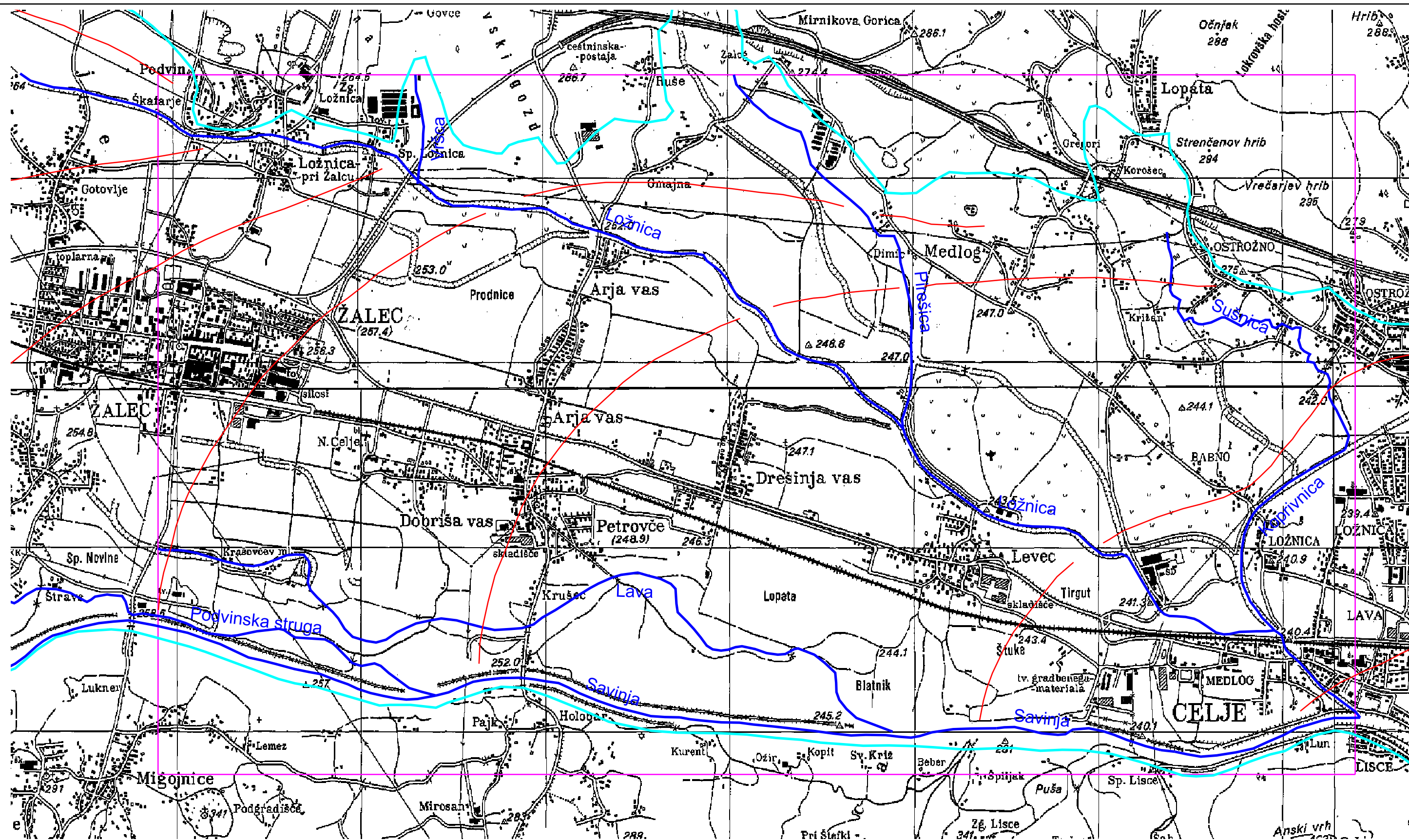
- meja vodonosnika
- višina meje med slojema vodonosnika
- višina neprepustne podlage
- območje modela
- vodnjak
- Os vodotoka

Priloga B: Izohipse neprepustne podlage in meje med slojema vodonosnika
 Merilo 1 : 20.000



Priloga C: Hidrogeološka karta s prikazom območja modela

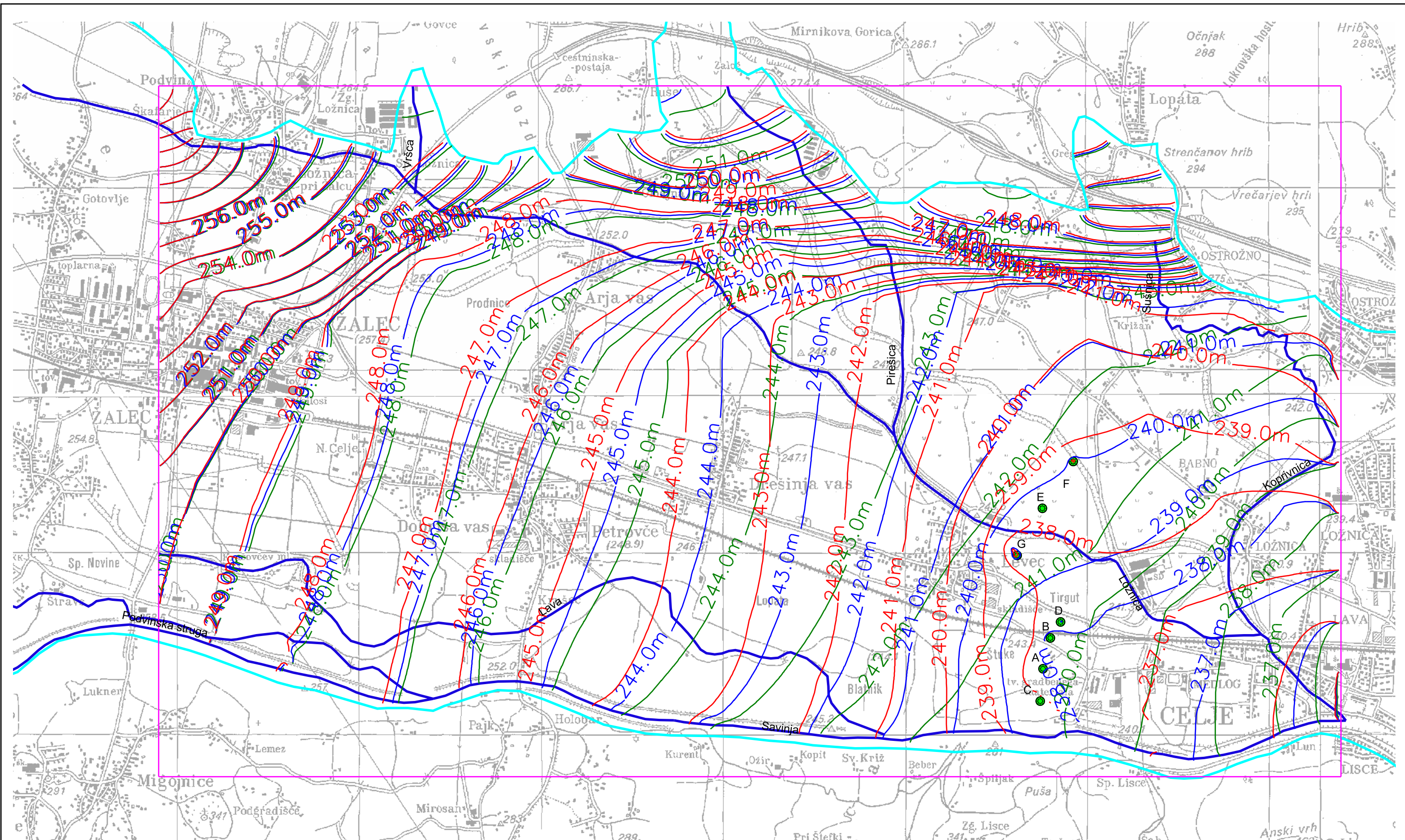
Merilo 1 : 20.000



 rmeja vodonosnika

 Hidroizohipse
 Os vodotoka
 Območje modela

Priloga D: Karta gladin izdelana za obdobje avgusta 2000 s prikazom območja modela
 Merilo 1 : 20.000



Hidroizohipse pri povečanem črpanju

Hidroizohipse pri trenutnem črpanju

Hidroizohipse brez črpanja

Vodnjak

Območje modela

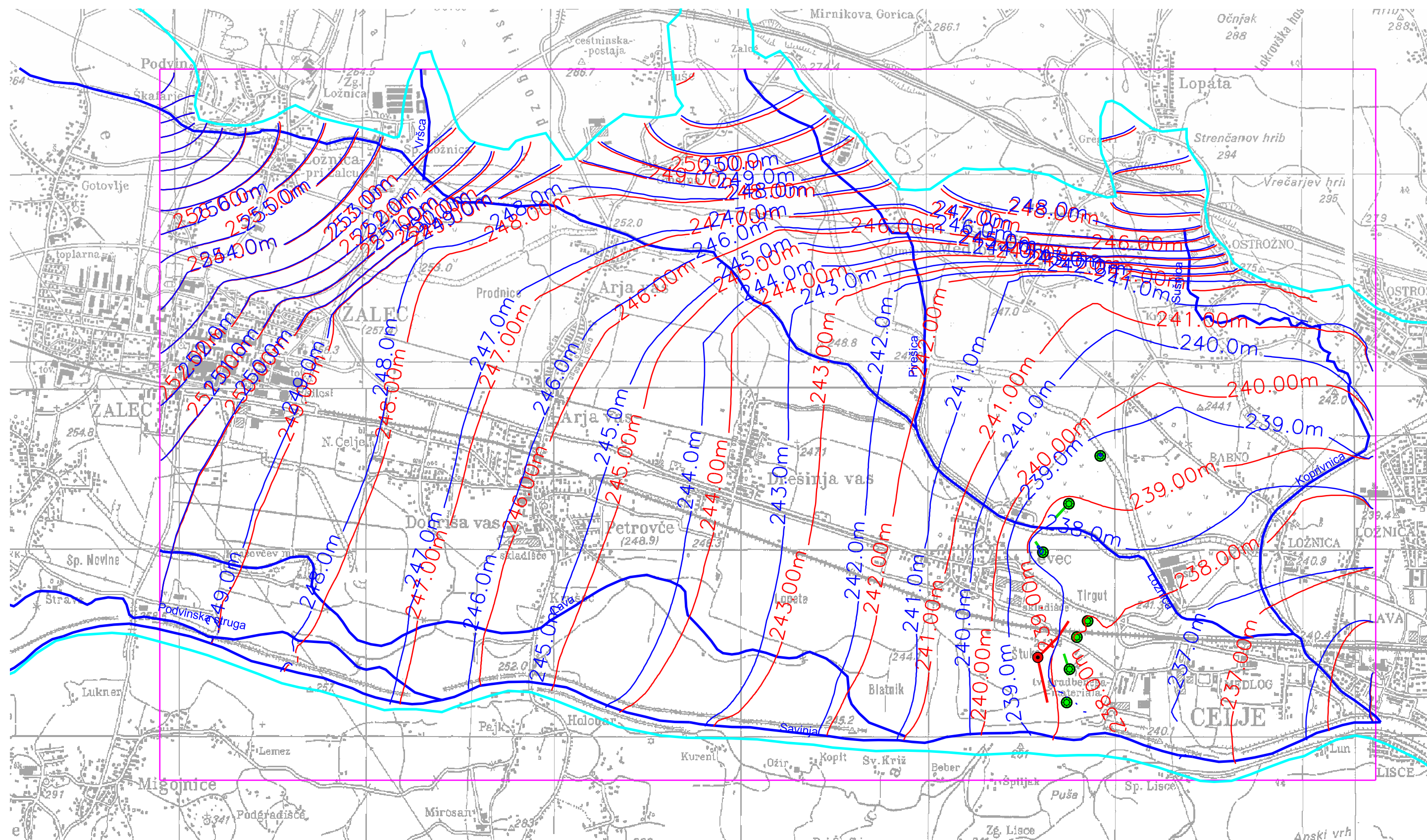
Meja vodonosnika

7

Os vodotoka

Priloga E: Hidroizohipse podzemne vode pri različnih količinah črpanja

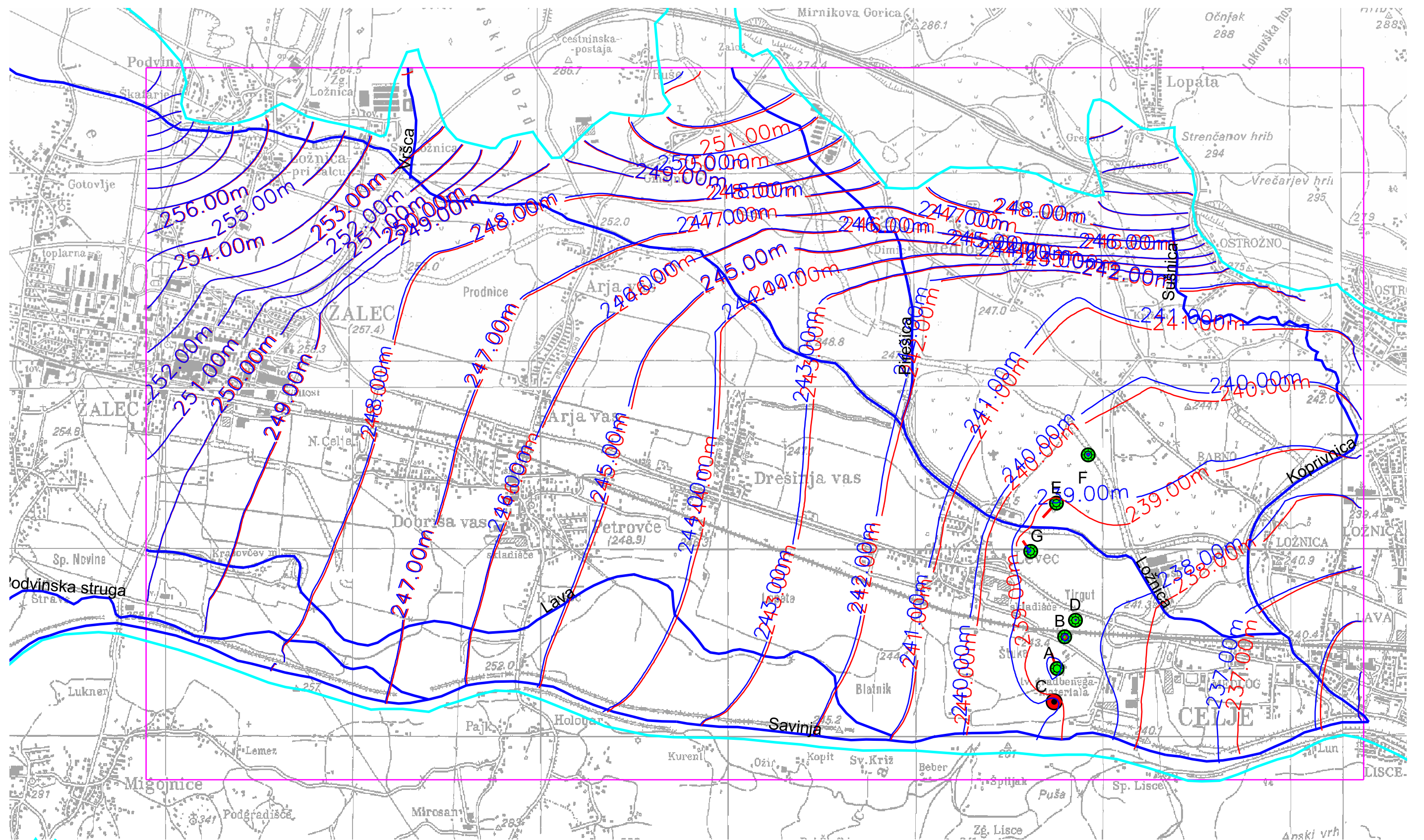
Merilo 1 : 20.000



- hidroizohipse pri povecanem crpanju
- hidroizohipse pri bogatenju z nalivalnim vodnjakom
- Vodnjak
- infiltracijska drenaža
- drenaža črpalnega vodnjaka
- meja vodonosnika
- os vodotoka
- območje modela

Priloga G: Hidroizohipse podzemne vode pri umetnem bogatenju podzemne vode z nalivalnim vodnjakom z drenažami

Merilo 1 : 20.000



meja vodonosnika

Hidroizohipse pri bogatenju z vodnjakom C

Hidroizohipse pri bogatenju z vodnjakoma B in C

Infiltracijski vodnjak

Črpalni vodnjak

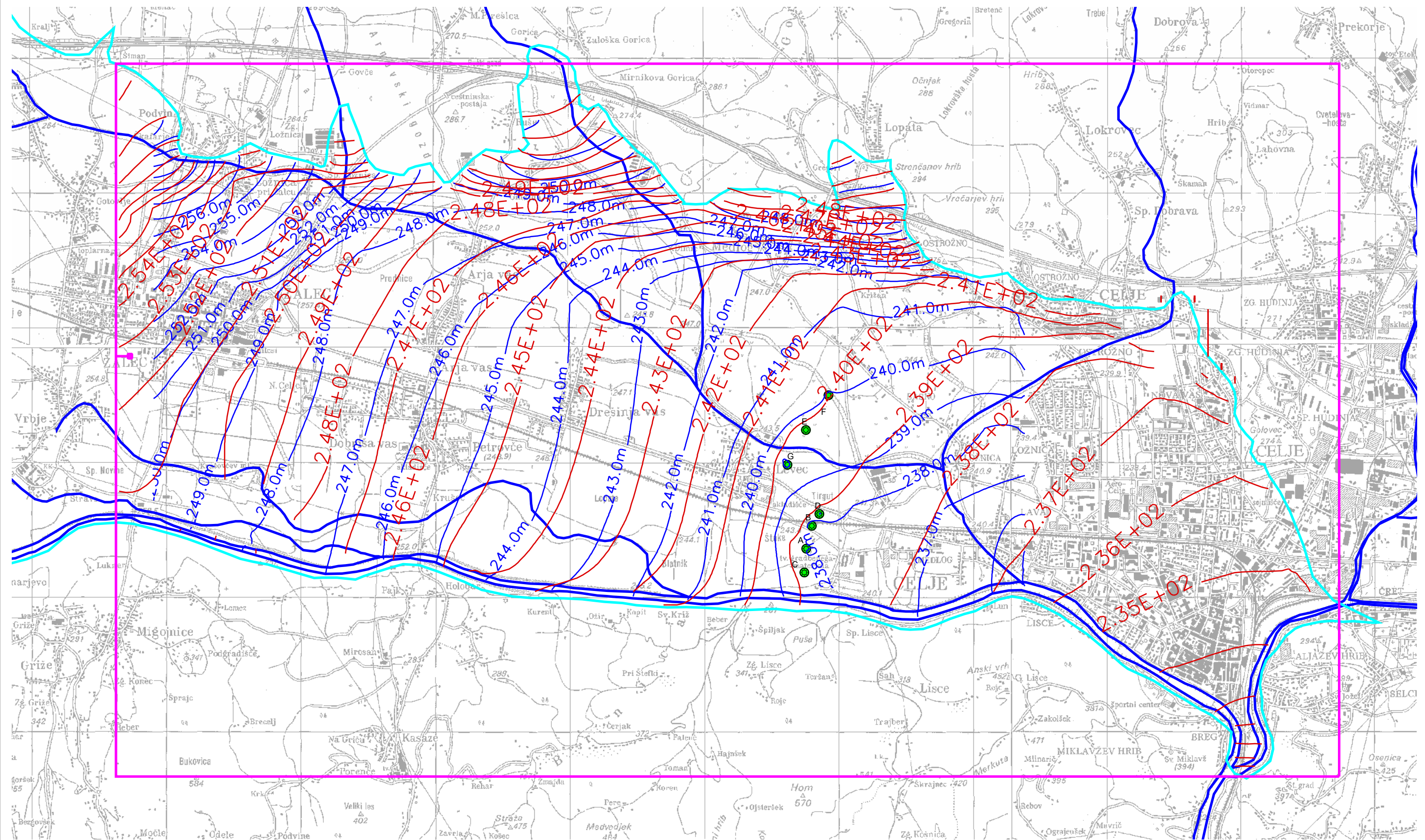
Drenaža črpanega vodnjaka

Os vodotoka

Območje modela

Priloga H: Hidroizohipse podzemne vode pri umetnem bogatenju podzemne vode z vodnjakom C in z vodnjakoma B in C

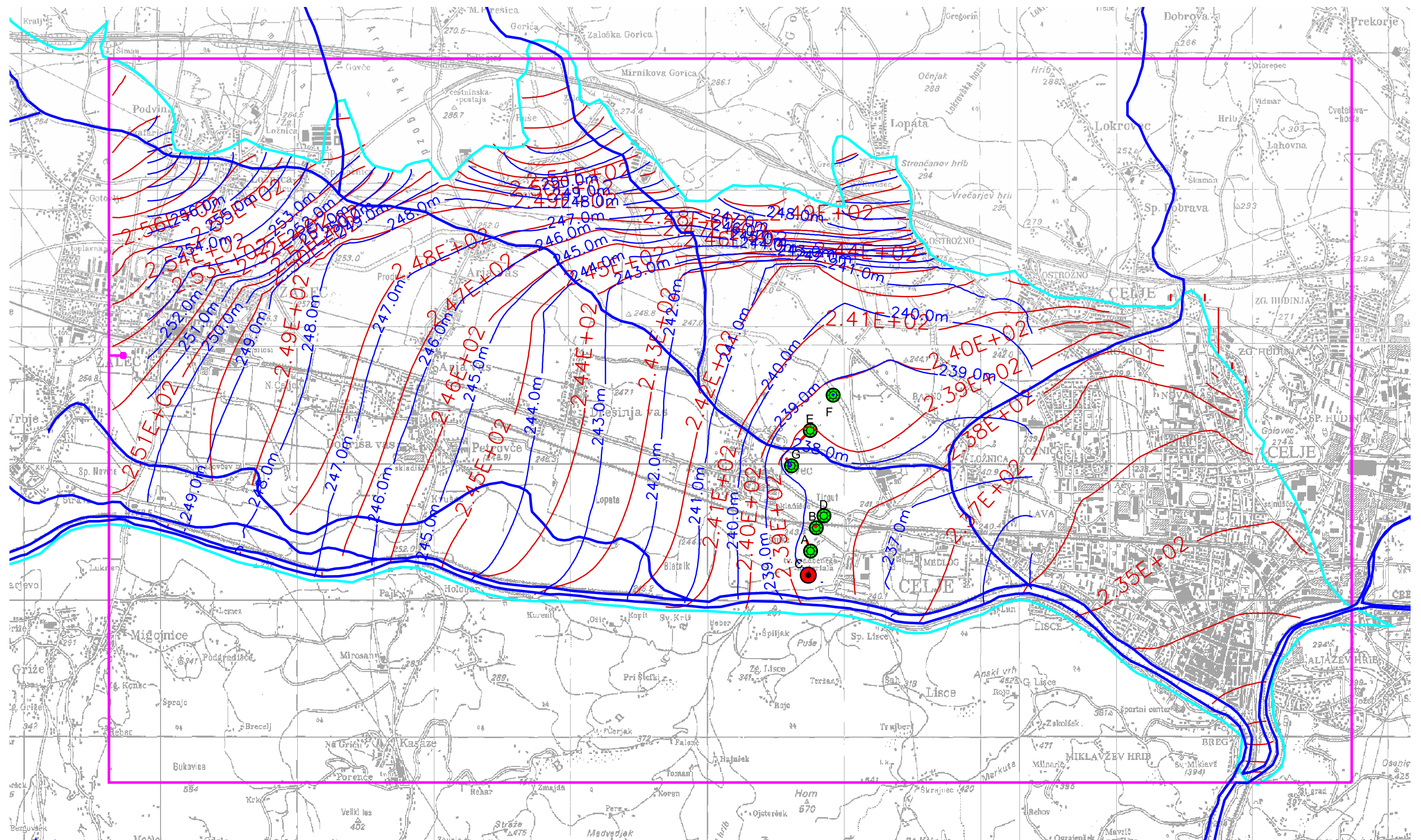
Merilo 1 : 20.000



- Hidroizohipse izračunane z razširjenim modelom
- Hidroizohipse izračunane s prvotnim modelom
- Meja vodonosnika
- Območje modela
- Vodotoki.dxf
- Os vodotoka
- Vodnjak

Priloga I: Hidroizohipse podzemne vode pri črpanju trenutnih maksimalnih količin izračunane s prvotnim in razširjenim modelom

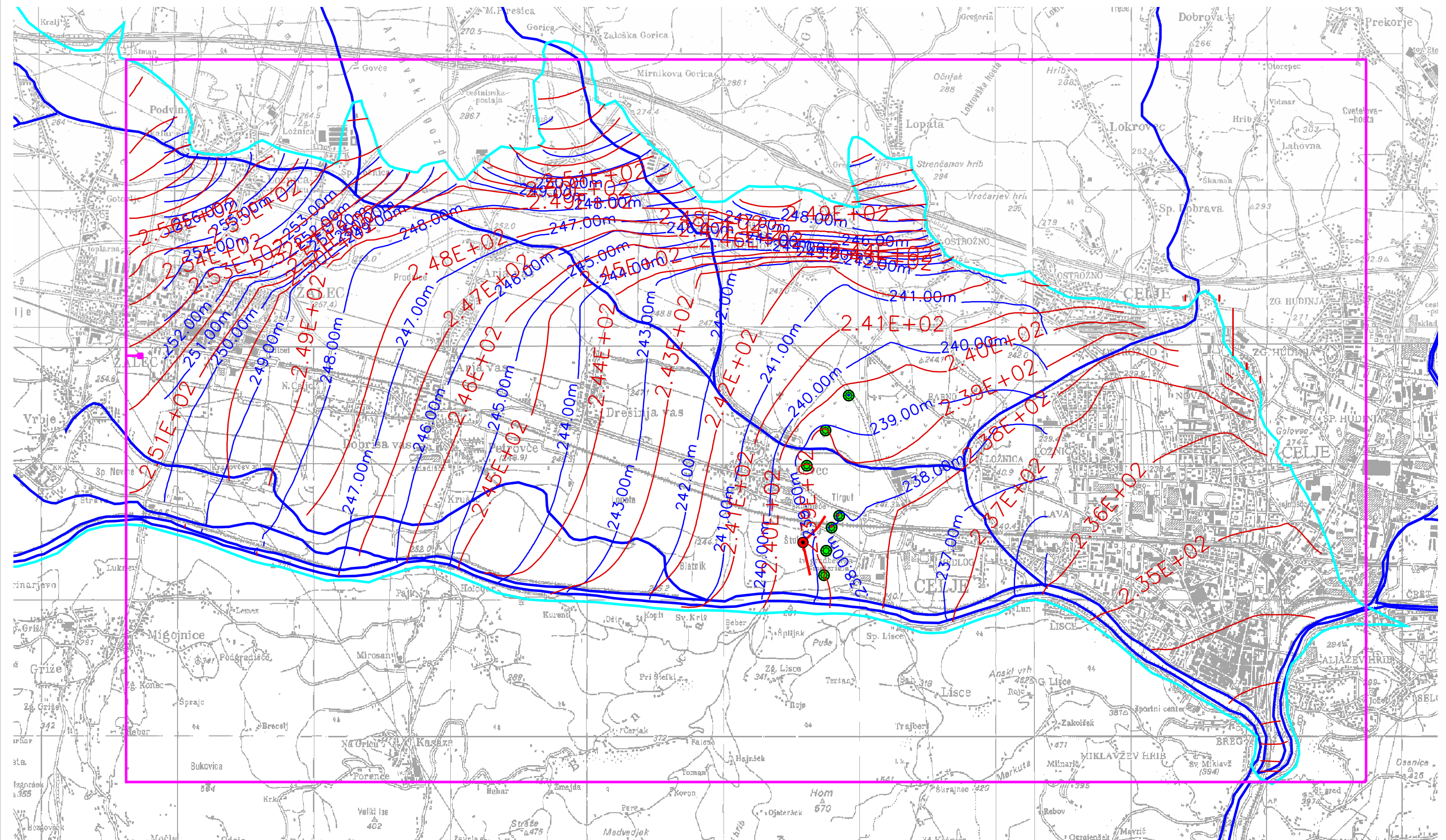
Merilo 1 : 27.500



-  Os vodotoka
-  Meja vodonosnika
-  Območje razširjenega modela
-  Hidroizohipse izračunane z prvotnim modelom
-  Hidroizohipse izračunane z razširjenim modelom
-  Infiltracijski vodnjak
-  Črpalni vodnjak
-  Drenaža črplanega vodnjaka

Priloga J: Hidroizohipse podzemne vode pri črpanju povečanih maksimalnih količin izračunane s prvotnim in razširjenim modelom

Merilo 1 : 27.500



- Hidroizohipse izračunane z razširjenim modelom
- Hidroizohipse izračunane s prvotnim modelom
- Meja vodonosnika
- Območje razširjenega modela
- Infiltracijski vodnjak
- Vodnjak.shp
- Infiltracijska drenaža
- Os vodotoka

Priloga K: Hidroizohipse podzemne vode pri umetnem bogatenju podzemne vode z nalivalnim vodnjakom z drenažami izračunane s prvotnim in razširjenim modelom

Merilo 1 : 27.500