

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Bogdan, B., 2013. Znižanje nivoja podzemne vode na primeru gradbene jame Tobačna mesto v Ljubljani. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Logar, J., somentor Kuder, S.): 82 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Bogdan, B., 2013. Znižanje nivoja podzemne vode na primeru gradbene jame Tobačna mesto v Ljubljani. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Logar, J., co-supervisor Kuder, S.): 82 pp.

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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

**BOJAN BOGDAN**

**ZNIŽANJE NIVOJA PODZEMNE VODE NA PRIMERU  
GRADBENE JAME TOBAČNA MESTO V LJUBLJANI**

Diplomska naloga št.: 3311/KS

**DEWATERING OF CONSTRUCTION PIT TOBAČNA  
MESTO IN LJUBLJANA**

Graduation thesis No.: 3311/KS

**Mentor:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

asist. mag. Sebastjan Kuder

**Član komisije:**

doc. dr. Živa Kristl

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 26. 06. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## **IZJAVE**

Podpisani Bojan Bogdan izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Znižanje nivoja podzemne vode na primeru gradbene jame Tobačna mesto v Ljubljani«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 11. 6. 2013

Bojan Bogdan

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>621.65:627.53(497.4Ljubljana)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Bojan Bogdan</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Janko Logar</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. mag. Sebastjan Kuder</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Znižanje nivoja podzemne vode na primeru gradbene jame Tobačna mesto v Ljubljani</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>82 str., 60 pregl., 65 sl., 42 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>odvodnjavanje, vodnjaki, delno penetrirani vodnjaki, koeficient prepustnosti, Tobačna mesto, črpalni preiskus</b>

### **Izvleček**

Diplomska naloga obravnava odvodnjavanje gradbene jame Tobačna mesta v Ljubljani. Predstavljen je izračun znižanj in pretokov. Račun za skupino vodnjakov je izveden z večimi analitičnimi metodami in z numeričnim modeliranjem. Koeficienti prepustnosti so določeni na podlagi črpalnega preizkusa in zrnastostnih krivulj. Narejene so primerjave med delovanjem polno in delno penetriranega vodnjaka. Končni rezultat je določitev potrebnih pretokov za že obstoječo razporeditev vodnjakov in primerjava rezultatov z meritvami. Narejena je primerjava med uporabljenimi analitičnimi in numeričnimi metodami in ocenjena njihova ustreznost.

*»Ta stran je namenoma prazna«*



## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDK:** 621.65:627.53(497.4Ljubljana)(043.2)  
**Author:** Bojan Bogdan  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Janko Logar, Ph. D.  
**Cosupervisor:** Sen. Lect. Sebastjan Kuder, M. Sc.  
**Title:** Dewatering of construction pit Tobačna mesto in Ljubljana  
**Document type:** Bachelor's degree thesis  
**Scope and tools:** 82 p., 60 tab., 65 fig., 42 eq.  
**Keywords:** dewatering, wells, partially penetrating wells, hydraulic conductivity, Tobačna mesto, pumping test

### **Abstract**

The main theme of the bachelor's degree thesis is dewatering of construction site of Tobačna mesto in Ljubljana. The work presents calculation of drawdowns and pumping quantities of wells. The calculations for a group of wells have been made with different analytical methods and with numerical methods. Hydraulic conductivity was obtained on the basis of the pumping tests and grain size curves. Comparisons between fully and partially penetrating wells were made and presented. The final result is determination of necessary flow rates for wells and comparison with field measurements. The distribution of wells is the same as in the actual project.

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## **ZAHVALA**

Za pomoč in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr Janku Logarju. Za pomoč bi se zahvalil tudi Vanji Selan in Melhiorju Preglu. Zahvalil bi se tudi očetu za nasvete pri iskanju literature.

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	V
ZAHVALA.....	VII
SIMBOLI .....	XV
1 UVOD .....	1
1.1 Namen in cilj diplomske naloge .....	1
1.2 Metode dela.....	1
1.3 Struktura poglavij .....	1
2 TEORETIČNE OSNOVE .....	2
2.1 Vodonosniki .....	2
2.2 Darcy-ev zakon.....	3
2.3 Določanje koeficienta prepustnosti.....	4
2.3.1 Koeficient prepustnosti določen iz zrnastostnih krivulj.....	5
2.3.2 Koeficient prepustnosti določen iz črpalnega preizkusa .....	5
2.4 Tok vode v vodnjak .....	8
2.4.1 Popolni vodnjak.....	8
2.4.2 Nepopolni vodnjak.....	10
2.4.3 Skupina vodnjakov.....	13
2.5 Maksimalni pretok v vodnjaku .....	14
2.6 Določila v EC 7 .....	15
3 PRIMERJAVA MED DELNO IN POLNO PENETRIRANIM VODNJAKOM .....	17
3.1 Računalniško modeliranje vodnjaka v Plaxis 2D.....	17
3.2 Popravek Butlerja.....	20
3.3 Popravek Forcheimerja.....	22
3.4 Enačba Borelija .....	24
3.5 Primerjava rezultatov.....	27
4 RAČUN ZNIŽANJA PODTALNICE V GRADBENI JAMI TOBAČNA MESTO .....	28
4.1 Zasnova.....	28
4.1.1 Zasnova objekta in gradbene jame .....	28
4.1.2 Raziskave sestave in lastnosti tal .....	30
4.1.3 Zasnova vodnjakov .....	33
4.2 Predpostavke za račun .....	35
4.3 Določanje koeficienta prepustnosti.....	36

---

4.3.1	Koeficient prepustnosti določen iz zrnastostnih krivulj.....	36
4.3.2	Koeficient prepustnosti dobljen iz črpalnih preizkusov .....	38
4.4	Maksimalne črpalne količine .....	40
4.5	Vplivni polmer .....	41
4.6	Step test vodnjaka.....	42
4.7	Analitični račun znižanj gladine podtalnice .....	43
4.7.1	Theisova metoda s popravkom za delno penetracijo .....	44
4.7.2	Metoda Forcheimer-ja s popravkom za delno penetracijo .....	47
4.7.3	Metoda Borelija .....	48
4.7.4	Uporaba koeficientov prepustnosti dobljenih po posamezni metodi .....	50
4.7.5	Povzetek rezultatov izračuna.....	51
4.8	Numerični izračun .....	52
4.8.1	Računski model brez upoštevanja tesnilne zavesa.....	53
4.8.2	Računski model z upoštevanjem tesnilne zavesa .....	57
4.8.3	Povzetek rezultatov numeričnega izračuna .....	60
4.9	Primerjava z meritvami.....	61
4.9.1	Primerjava z analitičnimi metodami .....	62
4.9.2	Primerjava z numeričnimi metodami.....	67
4.10	Preverjanje hidravličnih porušitev.....	75
5	ZAKLJUČEK .....	79
VIRI	.....	82

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrednosti $C_{p0}$ po Butlerju (Powers et al., 2007).....	11
Preglednica 2: Uporabljene stopnje penetracije.....	17
Preglednica 3: Karakteristične lastnosti posameznih slojev (INI d.o.o., 2007).....	31
Preglednica 4: Globine piezometrov.....	31
Preglednica 5: Globine vodonosnika oziroma neprepustne podlage glede na nadmorsko višino 283 m. .....	32
Preglednica 6: Koeficienti prepustnosti po metodi Hazena za vrtino T-4.....	36
Preglednica 7: Koeficienti prepustnosti po metodi Hazena za vrtino T-5.....	36
Preglednica 8: Koeficienti prepustnosti po metodi USBR za vrtino T-4.....	36
Preglednica 9: Koeficienti prepustnosti po metodi USBR za vrtino T-5.....	37
Preglednica 10: Koeficienti prepustnosti po metodi Alyamani & Sen za vrtino T-4.....	37
Preglednica 11: Koeficienti prepustnosti po metodi Alyamani & Sen za vrtino T-5.....	37
Preglednica 12: Koeficienti prepustnosti za posamezno vrtino po metodi Dupuita.....	38
Preglednica 13: Koeficienti prepustnosti po metodi Dupuita s popravkom Forcheimerja.....	39
Preglednica 14: Koeficienti prepustnosti po enačbi Borelija.....	39
Preglednica 15: Koeficienti prepustnosti dobljeni po metodi Cooperja in Jacoba s popravkom Butlerja. .....	39
Preglednica 16: Povprečni koeficienti prepustnosti, uporabljeno je logaritmično povprečje.....	39
Preglednica 17: Koeficienti prepustnosti za različna področja.....	40
Preglednica 18: Maksimalne črpalne količine za tri različna področja.....	41
Preglednica 19: Skupne maksimalne črpalne količine.....	41
Preglednica 20: Vplivni polmer pri znižanju gladine vode v vodnjaku za 1 m.....	41
Preglednica 21: Vplivni polmer pri znižanju gladine vode v vodnjaku za 3 m.....	41
Preglednica 22: Prikaz podatkov uporabljenih za izračun.....	42
Preglednica 23: Potrebna znižanja za različna primera višine podtalnice.....	44
Preglednica 24: Specifična izdatnost zemljin izražena v odstotkih (Powers et al., 2007).....	45
Preglednica 25: Potrebni pretoki in znižanja v vodnjakih za 1. primer znižanj in prepustnosti $k$ .....	45
Preglednica 26: Skupne potrebne črpalne količine in povprečna znižanja v vodnjakih za vse možnosti v prvem primeru znižanj.....	46
Preglednica 27: Potrebni pretoki in znižanja v vodnjakih za 2. primer znižanj in prepustnosti $k$ po Cooper-Jacobu.....	46
Preglednica 28: Skupne potrebne črpalne količine za vse možnosti v drugem primeru.....	47
Preglednica 29: Potrebne črpalne količine in znižanja v vodnjakih po metodi Forcheimerja za prvi primer znižanj in povprečne prepustnosti $k$ .....	48
Preglednica 30: Potrebne črpalne količine in znižanja v vodnjakih po metodi Forcheimerja za drugi primer in prepustnosti $k$ .....	48
Preglednica 31: Potrebni črpalni pretoki in znižanja v vodnjakih pri metodi Borelija za prvi primer in prepustnosti $k$ .....	49
Preglednica 32: Potrebni črpalni pretoki in znižanja v vodnjakih po metodi Borelija za drugi primer in prepustnosti $k$ .....	49
Preglednica 33: Koeficienti prepustnosti dobljeni po posamezni metodi.....	50
Preglednica 34: Dvojni koeficienti prepustnosti dobljeni po posamezni metodi.....	50
Preglednica 35: Potrebne skupne črpalne količine po metodi Cooperja in Jacoba.....	50
Preglednica 36: Potrebne skupne črpalne količine po metodi Forcheimerja.....	51
Preglednica 37: Potrebne skupne črpalne količine po metodi Borelija.....	51

Preglednica 38: Skupne potrebne črpalne količine za posamezne metode ob upoštevanju povprečnih koficientov prepustnosti. ....	52
Preglednica 39: Skupne potrebne črpalne količine za posamezne metode ob upoštevanju koeficientov prepustnosti, ki pripadajo posamezni metodi. ....	52
Preglednica 40: Potrebne črpalne količine in povprečno znižanje v vodnjakih v primeru, da ne upoštevamo vpliva tesnilne zavese. ....	60
Preglednica 41: Potrebne črpalne količine in povprečno znižanje v vodnjakih v primeru, da upoštevamo vpliv tesnilne zavese. ....	61
Preglednica 42: Največja izmerjena znižanja v vodnjakih. ....	62
Preglednica 43: Črpalne količine za vodnjake v dejanskem stanju. ....	62
Preglednica 44: Uporabljeni povprečni koeficienti prepustnosti. ....	63
Preglednica 45: Znižanja v vodnjakih v prvem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi povprečnih koeficientov prepustnosti (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa). ....	63
Preglednica 46: Uporabljeni koeficienti prepustnosti so dobljeni po posamezni metodi. ....	64
Preglednica 47: Znižanja v vodnjakih v prvem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi koeficientov prepustnosti dobljenih iz posameznih metod (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa). ....	64
Preglednica 48: Znižanja v vodnjakih v drugem opazovanem obdobju pri povprečnih koeficientih prepustnosti (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa). ....	65
Preglednica 49: Znižanja v vodnjakih v drugem opazovanem obdobju pri koeficientih prepustnosti dobljenih po posamezni metodi (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa). ....	66
Preglednica 50: Izmerjena in izračunana znižanja v prvem opazovalnem obdobju za povprečne koeficiente prepustnosti (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa)...	68
Preglednica 51: Izmerjena in izračunana znižanja v drugem opazovalnem obdobju (povprečni $k$ ) (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa). ....	69
Preglednica 52: Koeficienti prepustnosti za umerjen model. ....	71
Preglednica 53: Rezultati na umerjenem računskem modelu v primerjavi z meritvami za prvo obdobje (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa). ....	72
Preglednica 54: Rezultati na umerjenem računskem modelu v primerjavi z meritvami za drugo obdobje (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa). ....	73
Preglednica 55: Delni varnostni faktorji pri preverjanju vzgona (EC 7, dodatek A.4).....	76
Preglednica 56: Delni varnostni faktorji pri preverjanju hidravličnega loma (EC 7, dodatek A.5).....	76
Preglednica 57: Preverjanje porušitve zaradi erozije za primer črpanja 200 l/s. ....	77
Preglednica 58: Preverjanje porušitve zaradi erozije za primer črpanja 320 l/s. ....	78
Preglednica 59: Preverjanje porušitve zaradi erozije za primer črpanja 200 l/s (MODFLOW).....	78
Preglednica 60: Preverjanje porušitve zaradi erozije za primer črpanja 260 l/s (MODFLOW).....	78



**KAZALO SLIK**

Slika 1: Odprti vodonosnik.....	2
Slika 2: Zaprti vodonosnik s piezometrom.....	3
Slika 3: Totalna hidravlična višina $h$ glede na višino $z$ in piezometersko višino (Terzaghi, Peck in Mesri, 1996). ....	4
Slika 4: Delno penetrirani vodnjak .....	6
Slika 5: Vodnjak z eno opazovalno vrtino. ....	7
Slika 6: Popolni vodnjak v vodonosniku s prosto gladino talne vode.....	9
Slika 7: Primerjava Dupuitove in Cooper-Jacobove enačbe. ....	10
Slika 8: Delež izgub v vodnjaku (Kruseman, Ridder in Verweij, 1994).....	12
Slika 9: Nadomestni vodnjak za skupino vodnjakov. ....	13
Slika 10: Skupina vodnjakov. ....	14
Slika 11: Profil vodnjaka v zemljini. ....	15
Slika 12: Primer, kjer bi lahko prišlo do hidravličnega loma tal (EC 7).....	16
Slika 13: Razmerje med znižanji pri delno in polno penetriranim vodnjakom pri istih pretokih pri računalniški simulaciji. ....	18
Slika 14: Razmerje $s_{pp}/s_{fp}$ v odvisnosti od stopnje penetracije pri računalniški simulaciji. ....	18
Slika 15: $s_{pp}/s_{fp}$ v odvisnosti od razdalje $r$ za enake relativne pretoke pri računalniškem modeliranju. ....	19
Slika 16: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od stopnje penetracije za različne absolutne pretoke pri računalniškem modeliranju.....	20
Slika 17: Razmerje $s_{pp}/s_{fp}$ v odvisnosti od razdalje $r$ za postopek Butlerja.....	20
Slika 18: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od $P/H$ za metodo Butlerja. ....	21
Slika 19: Razmerje $s_{pp}/s_{fp}$ v odvisnosti od $r$ pri enakih relativnih pretokih za metodo Butlerja. ....	21
Slika 20: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od stopnje penetracije pri Butlerju, pri enakih relativnih pretokih. ....	22
Slika 21: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od polmera $r$ pri enakih absolutnih pretokih za popravek Forcheimerja. ....	23
Slika 22: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od stopnje penetriranosti pri enakih absolutnih pretokih za popravek Forcheimerja.....	23
Slika 23: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od polmera $r$ pri enakih relativnih pretokih pri popravku Forcheimerja. ....	24
Slika 24: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od stopnje penetracije za metodo Forcheimerja pri enakih relativnih pretokih. ....	24
Slika 25: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od razdalje $r$ pri enakih absolutnih črpalnih količinah (Boreli). ....	25
Slika 26: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od stopnje penetracije za različne razdalje (Boreli). ....	25
Slika 27: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od razdalje pri enakih relativnih pretokih (Boreli). ....	26
Slika 28: Odvisnost $s_{pp}/s_{fp}$ od stopnje penetriranosti za različne razdalje pri enakih relativnih pretokih (Boreli). ....	26
Slika 29: Tloris gradbene jame Tobačna mesto, 1. faza.....	29
Slika 30: Profili gradbene jame od 1-1 do 4-4.....	30
Slika 31: Tipični profil sestave tal pred odkopom. ....	30
Slika 32: Situacija gradbene jame z označenimi vrtinami in piezometri in področja različnih karakteristik tal. ....	32
Slika 33: Računski model za 2. področje. ....	33
Slika 34: Pozicije vodnjakov (zeleni krogi) in točk (rdeča brava) za preverjanje znižanja.....	34
Slika 35: Profil vodnjaka.....	35
Slika 36: Zrnavostna krivulja vrtine T-4 na globini 23-24m (IRGO, 2011).....	37
Slika 37: Znižanja v piezometrih pri črpanju iz vodnjaka V-T-1/11 (IRGO, 2011).....	38
Slika 38: Grafikon znižanja talne vode v odvisnosti od časa (IRGO, 2011).....	42
Slika 39: Graf odvisnosti $s/Q$ od pretoka $Q$ .....	43

Slika 40: Odvisnost učinkovitosti vodnjaka od pretoka.....	43
Slika 41: Primerjava znižanj pri uporabi različnih programov.....	53
Slika 42: Model gradbene jame brez diafragme (a) in označbe vodnjakov (zelena barva) in točk (rdeča barva) (b).....	54
Slika 43: Znižanja v gradbeni jami pri črpanju 260 l/s in prepustnosti $k$ .....	55
Slika 44: Znižanja gladine podtalne vode v primeru črpanja 360 l/s in prepustnosti $k$ .....	55
Slika 45: Znižanja v gradbeni jami za prepustnosti $2k$ in črpanje 370 l/s.....	56
Slika 46: Znižanje gladine podtalne vode ob črpanju 500 l/s pri dvojnih koeficientih prepustnosti.....	57
Slika 47: Znižanja ob upoštevanju tesnilne zavese in črpanju 200 l/s ter pri prepustnostih $k$ .....	58
Slika 48: Znižanja ob upoštevanju tesnilne zavese in črpanju 320 l/s ter pri prepustnostih $k$ .....	58
Slika 49: Znižanja ob upoštevanju tesnilne zavese in črpanju 320 l/s ter pri prepustnostih $2k$ .....	59
Slika 50: Znižanja ob upoštevanju tesnilne zavese in črpanju 480 l/s ter pri prepustnostih $2k$ .....	60
Slika 51: Znižanja v vodnjakih v prvem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi povprečnih koeficientov prepustnosti.....	63
Slika 52: Znižanja v vodnjakih v prvem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi koeficientov prepustnosti dobljenih po posamezni metodi.....	64
Slika 53: Znižanja v vodnjakih v drugem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi povprečnih koeficientov prepustnosti.....	65
Slika 54: Znižanja v vodnjakih v drugem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi koeficientov prepustnosti dobljenih po posamezni metodi.....	66
Slika 55: Izmerjena in izračunana znižanja v prvem opazovalnem obdobju za povprečne koeficiente prepustnosti.....	68
Slika 56: Znižanja v gradbeni jami ob črpanju istih količin kot v 1. opazovanem obdobju.....	69
Slika 57: Izmerjena in izračunana znižanja v drugem opazovalnem obdobju (povprečni $k$ ).....	70
Slika 58: Znižanja v gradbeni jami ob črpanju istih količin kot v 2. opazovanem obdobju (povprečni $k$ ).....	70
Slika 59: Razporeditev področij z enakimi prepustnostmi po umerjanju modela.....	71
Slika 60: Rezultati na umerjenem računskem modelu v primerjavi z meritvami za prvo obdobje.....	72
Slika 61: Plastnice znižanj na umerjenem računskem modelu za prvo opazovano obdobje.....	73
Slika 62: Rezultati na umerjenem računskem modelu v primerjavi z meritvami za drugo obdobje.....	74
Slika 63: Plastnice znižanj na umerjenem računskem modelu za drugo opazovano obdobje.....	74
Slika 64: Znižanja ob črpanju 260 l/s.....	75
Slika 65: Profil ob železnici.....	76

## SIMBOLI

$C_s$	koeficient uskladiščenja, ki je definiran kot volumen vode sproščen iz uskladiščenja na enoto površine, na enoto znižanja gladine talne vode
$d_{ef}$ [mm]	efektivni premer zrna
$D_{10}$ [mm]	premer zrn, pri katerem je 10% vseh ostalih zrn podmernih
$D_{20}$ [mm]	premer zrn, pri katerem je 20% vseh ostalih zrn podmernih
$h$ [m]	hidravlična višina
$H$ [m]	debelina vodonosnika
$h_w$ [m]	debelina vodonosnika v vodnjaku po začetku črpanja
$i$	hidravlični gradient
$k$ [m/s]	koeficient prepustnosti
$l$ [m]	dolžina omočenega dela filtra
$n$	poroznost zemljine
$P$ [m]	globina vodnjaka v vodonosniku
$q$	masni delež posamezne frakcije
$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	črpalni pretok
$Q_w$ [m <sup>3</sup> /s]	maksimalni črpalni pretok vodnjaka
$r$ [m]	polmer s središčem v središču vodnjaka, $r_0 \leq r \leq R$
$R$ [m]	vplivni polmer vodnjaka
$r_0$ [m]	polmer vodnjaka
$s$ [m]	znižanje gladine podtalne vode
$t$ [s]	čas
$u$ [kN/m <sup>2</sup> ]	porni pritisk
$U$ [m]	razdalja od dna vodnjaka do spodnje meje vodonosnika
$v$ [m/s]	navidezna hitrost vode skozi prerez zemljine
$\theta$ [cm <sup>2</sup> ]	specifična površina zrn

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## **1 UVOD**

### **1.1 Namen in cilj diplomske naloge**

Ker je pri nekaterih izkopih gradbenih jam prisotna voda in je zaradi nje nemogoče izvajati gradbena dela, je potrebno to vodo odstraniti ali kako drugače omejiti njen vpliv. Obravnaval sem zniževanje vode s pomočjo črpalnih vodnjakov. Namen te naloge je določanje koeficienta prepustnosti iz zrnastostnih krivulj in črpalnega preizkusa, primerjati vpliv stopnje penetriranosti vodnjaka na znižanje gladine in uporabiti različne načine izračuna znižanja podtalnice za gradbeno jamo Tobačna mesto. Dobljene rezultate sem primerjal z meritvami in tako dobil oceno ustreznosti uporabljenih metod. Končni cilj je določitev skupne potrebne količine črpanja vode in količine črpanja vode za posamezni vodnjak tako, da bo mogoče izvajanje gradbenih del v zadovoljivih pogojih.

### **1.2 Metode dela**

S pomočjo strokovne literature sem najprej predelal osnove teorije toka podzemne vode, geotehničnih raziskav in zniževanja podtalnice v gradbenih jamah. Iz te literature sem sestavil teoretični del naloge, ki je osnova za vse nadaljnje izračune in postopke. Računalniško modeliranje sem izvajal v programu Plaxis 2D in Processing Modflow, večino računskih postopkov pa sem izvajal v programu Microsoft Excel 2010. Najprej sem primerjal računske metode za posamezen vodnjak, nato pa sem računal še za skupino vodnjakov. Za večino primerov sem izrisal grafe za lažjo predstavnost. Za lažjo interpretacijo enačb in označb so priložene slike.

### **1.3 Struktura poglavij**

Poglavja si sledijo od teoretičnih osnov pa vse do končnih primerjav in zaključka. Na začetku je nekaj teorije, potem sledijo analize in računanje toka proti posameznemu vodnjaku z določanjem vpliva stopnje penetracije. Sledi poglavje v katerem obravnavam gradbeno jamo Tobačna mesto. Tu so izvedeni vsi izračuni za določitev potrebnih pretokov. Sledita primerjava rezultatov z meritvami in zaključek.

## 2 TEORETIČNE OSNOVE

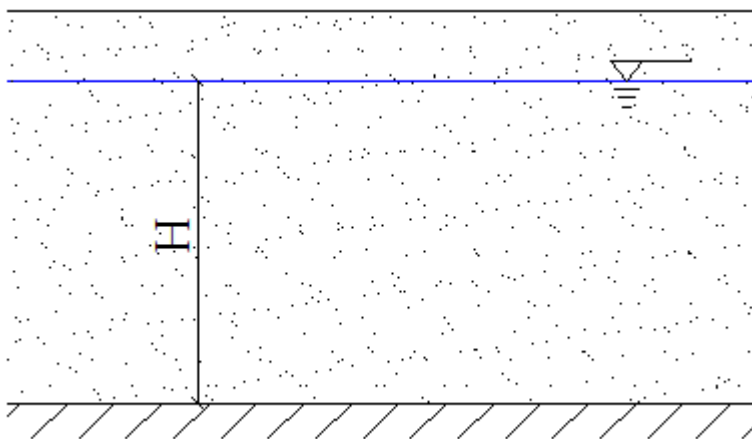
V teoretičnem delu sem opisal tok vode v vodnjake ter enačbe, s katerimi sem določeval koeficiente prepustnosti in računal zniževanje gladine podtalnice. Uporabljene enačbe so namenjene predvsem za analizo odprtih vodonosnikov. Opisane so tudi osnovne predpostavke, ki so potrebne za uporabo teh enačb. Na kratko so tudi predstavljeni vodonosniki in lastnosti idealnih vodonosnikov. Določila iz Evrokoda so predstavljena na koncu tega poglavja.

### 2.1 Vodonosniki

Vodonosnik je plast zemljine, ki ima sposobnost zadrževanja podzemne vode. V grobem bi vodonosnike lahko razdelili na odprte, arteške in polarteške. Zemljina vodonosnika vsebuje pore, ki so lahko zasičene z vodo. V vodonosniku so te pore pod koto gladine podzemne vode 100% zasičene. Na gladini podzemne vode so porni pritiski enaki 0 (Cashman in Preene, 2001).

Da bi lahko izpeljali kakršnekoli izračune na vodonosniku, je potrebno vpeljati fizikalni model, ki to omogoča. V ta namen je izdelan koncept idealnega vodonosnika, ki ima naslednje lastnosti, kot so navedene v Powers et al. (2007):

- vodonosnik je homogen in je v horizontalni smeri neskončen,
- debelina vodonosnika je vsepovsod enaka,
- vodonosnik je izotropen, koeficient prepustnosti je v vseh smereh enak,
- voda se trenutno sprosti iz vodonosnikove zaloge (uskладиščenja) pri znižanju gladine vode
- vodnjak je brez trenja, ima zelo majhen premer in polno penetrira vodonosnik.



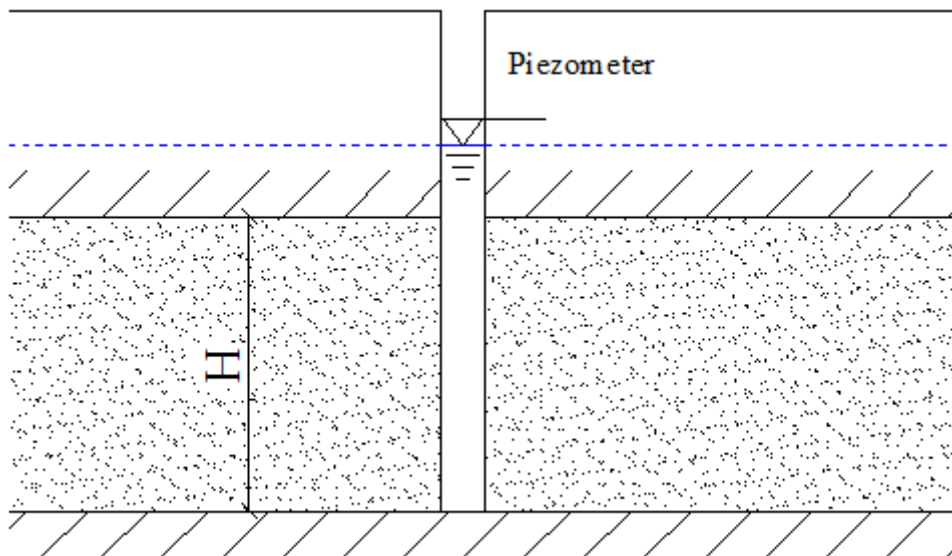
**Slika 1: Odprti vodonosnik.**

Z oznako  $H$  je na sliki 1 označena debelina odprtega vodonosnika.

Pri tem pa je treba pripomniti, da vodonosniki v naravi le redko izpolnjujejo vse zgoraj opisane karakteristike idealnega vodonosnika. Naravni vodonosniki so velikokrat anizotropni, niso neskončni in ne sprostijo uskladiščene vode trenutno.

Arteški vodonosniki se od odprtih razlikujejo po tem, da so tudi na zgornji strani omejeni z nepropustno plastjo zemljine (slika 2). Hidavlična višina (poglavje 2.2) arteškega vodonosnika je nad vrhom vodonosnika. Zemljina arteškega vodonosnika je popolnoma zasičena z vodo. Pri črpanju vode

iz takega vodonosnika prosta gladina vode ne obstaja, zmanjšajo se le porni pritiski in s tem piezometriška višina (poglavje 2.2) (Cashman in Preene, 2001).



**Slika 2: Zaprti vodonosnik s piezometrom.**

Sproščanje uskladiščene vode je proces, ki se zgodi pri znižanju začetne gladine podzemne vode. Pri tem nekaj vode ostane v zemljini, ki je nad gladino talne vode in ta se potem sprošča (počasi ali hitro) v sistem odvodnjavanja. V odprtih vodonosnikih lahko to sproščanje traja dlje časa. Pojav lahko opišemo z brezdimenzijskim koeficientom  $C_s$ , ki je definiran kot volumen vode sproščen iz uskladiščenja na enoto površine, na enoto znižanja gladine talne vode (Powers et al., 2007).

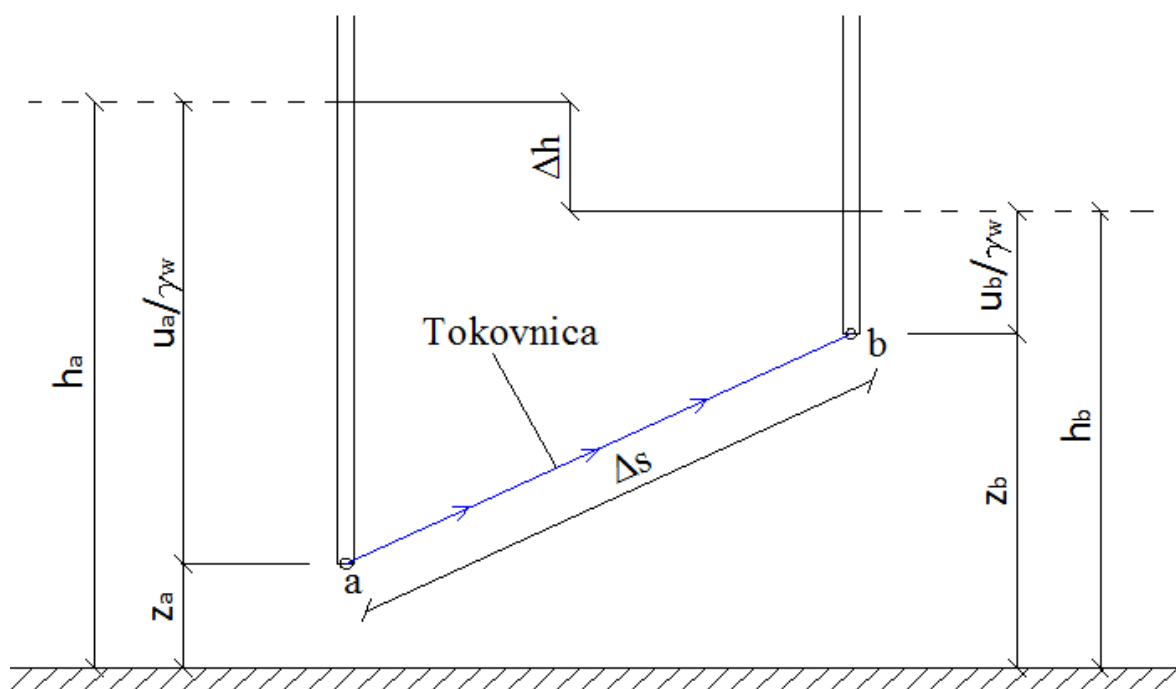
## 2.2 Darcy-ev zakon

Za zemljino pravimo, da je prepustna, če vsebuje kontinuirane pore. Takšne pore so prisotne v vseh zrnatih zemljinah, tudi pri glinah. Tok vode skozi vse take zemljine sledi približno enakim fizikalnim lastnostim. Razlika med tokom vode v čistem pesku in glino je tako samo v velikostnem razredu (Terzaghi, Peck in Mesri, 1996).

Tok vode skozi zemljine je odvisen od hidravličnega gradienta. Hidravlična višina je definirana z enačbo (1).  $z$  je višina glede na neko referenčno točko,  $\frac{u}{\gamma_w}$  pa je piezometriška višina.

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} \quad (1)$$

Hidravlična višina je prikazana na sliki 3, kjer  $a$  in  $b$  predstavljata dve točki na tokovnici v zemljini. Slika je povzeta po Terzaghi, Peck in Mesri (1996).



Slika 3: Totalna hidravlična višina  $h$  glede na višino  $z$  in piezometersko višino (Terzaghi, Peck in Mesri, 1996).

Do toka vode pride samo v primeru, če sta  $h_a$  in  $h_b$  na sliki 3 različna. Njuna razlika je  $\Delta h$ . Stopnjo izgube hidravlične višine skozi zemljinu zapišemo s hidravličnim gradientom  $i$ . Gradient zapišemo z enačbo (2).

$$i = \frac{\partial h}{\partial s} \quad (2)$$

Darcy je določil empirično enakbo (3) s katero je določil navidezno hitrost vode skozi zemljinu. V enačbi (3) predstavlja  $v$  navidezno hitrost vode skozi prerez zemljine,  $k$  pa koeficient prepustnosti (Terzaghi, Peck in Mesri, 1996)

$$v = k i \quad (3)$$

Koeficient prepustnosti ima enoto [m/s].

### 2.3 Določanje koeficienta prepustnosti

Koeficient prepustnosti ima velik vpliv na reševanje problema, ki je zastavljen v tej diplomski nalogi. Velikost koeficienta prepustnosti je v osnovi odvisna od zemljinine poroznosti in oblike por.

Koeficient  $k$  se lahko med drugim oceni tudi na podlagi zrnastostne krivulje, pri tem pa moramo biti pozorni na omejitve pri takih metodah. Najbolj zanesljiva metoda določanja  $k$ -ja pa je črpalni preiskus (Powers et al., 2007).



### 2.3.1 Koeficient prepustnosti določen iz zrnastostnih krivulj

Hazen je uporabil empirično enačbo (4) za račun koeficienta prepustnosti iz podatkov, ki jih pridobimo iz zrnastostne krivulje.  $D_{10}$  v enačbi (4) je premer zrn pri katerem je 10% vseh zrn podmernih.

$$k = (0,1 * D_{10})^2 \quad (4)$$

$D_{10}$  podamo v [mm], rezultat pa dobimo v [m/s]. Ta rezultat je lahko razumna aproksimacija, če uporabimo reprezentativne vzorce. Metoda ima tudi svoje omejitve. Hazen je eksperimente opravljal na enakomernih peskih z vrednostmi koeficienta enakomernosti  $C_u$  manjšimi od 5 in vrednostmi  $D_{10}$  med 0,1 in 3 mm (Powers et al., 2007).

Pri metodi USBR se v enačbi za določanje prepustnosti (5) uporabi  $D_{20}$ .

$$k = 0,36 * (D_{20})^{2,3} \quad (5)$$

$D_{20}$  je podan v milimetrih,  $k$  pa dobimo v [cm/s] (Filipovič, 1980).

Enačba Krueger-ja (6) se najpogosteje uporablja za določanje koeficienta prepustnosti pri vrednostih  $C_u$  večjih od 5. Najboljše rezultate da pri srednjezrnatih peskih. Avtor izraža odvisnost  $k$ -ja od zrnastostne krivulje skozi specifično površino zrn.

$$k = 0,16 * 10^6 \frac{n}{\theta^2} \left[ \frac{m}{dan} \right] \quad (6)$$

$n$  je poroznost vzorca,  $\theta$  pa specifična površina v [cm<sup>2</sup>]. Za določitev specifične površine se uporabi enačba (7), za določitev  $d_{ef}$  pa enačba (8).  $d_{ef}$  je efektivni premer zrna v [mm].

$$\theta = \frac{60(1-n)}{d_{ef}} \quad (7)$$

$$d_{ef} = \frac{1}{\sum_i \left( \frac{q_i}{d_{sr_i}} \right)} \quad (8)$$

$q$  je masni delež vsake posamezne frakcije,  $d_{sr}$  srednji premer vsake posamezne frakcije (Filipovič, 1980).

Metoda Alyamani-ja in Sen-a je opisana v enačbi (9).

$$k = 1300[I_0 + 0,025(D_{50} - D_{10})]^2 \quad (9)$$

Koeficient prepustnosti dobimo v [m/dan],  $I_0$  je vrednost, ki jo dobimo s presečiščem premice, ki poteka skozi točki na zrnastostni krivulji, ki pripadata premerom  $D_{10}$  in  $D_{50}$  in osjo s premeri zrn (Odong J., 2007).

### 2.3.2 Koeficient prepustnosti določen iz črpalnega preizkusa

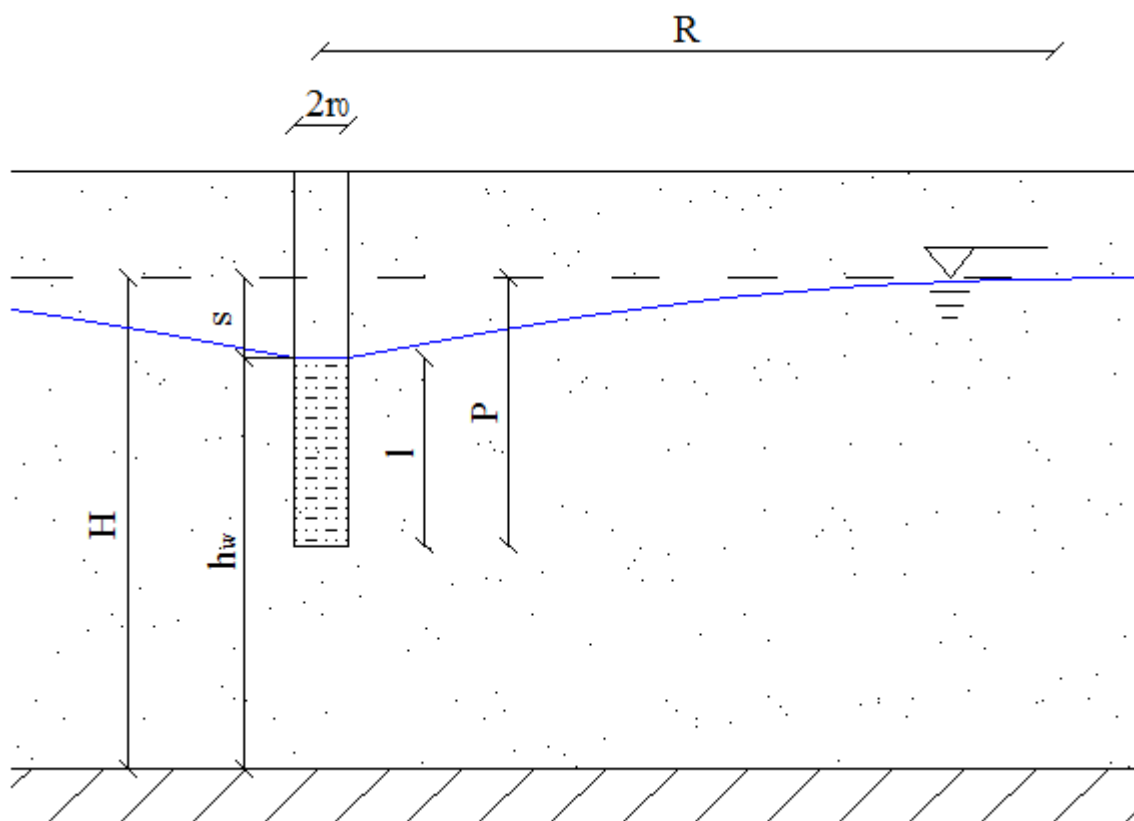
Črpanje lahko izvajamo na posamezni vrtini in opazujemo znižanje samo v tej vrtini. Glede na podatke lahko izračunamo koeficient prepustnosti. Za račun so predlagani mnogi empirični obrazci, v nalogi pa

je predstavljen le obrazec Dupuita (9) za delno penetrirani vodnjak. Enačbe v tem podpoglavju so podane za vodonosnik s prosto gladino talne vode. V enačbi (9) je  $b$  popravek Forcheimer-ja, določimo ga po enačbi (10). Enačbe so podane v Filipovič (1980).

$$k = \frac{0,733 * Q * \log \frac{R}{r_0}}{H^2 - h_w^2} * \frac{1}{b} \quad (9)$$

$$b = \sqrt{\frac{l}{h_w}} * \sqrt[4]{\frac{2H-l}{h_w}} \quad (10)$$

$Q$  je črpalni pretok,  $R$  vplivni radij,  $r_0$  pa polmer vodnjaka.  $h_w$  je višina vodonosnika po znižanju v vodnjaku,  $s$  znižanje gladine talne vode,  $l$  pa je dolžina omočenega dela filtra. Veličine so prikazane na sliki 4.

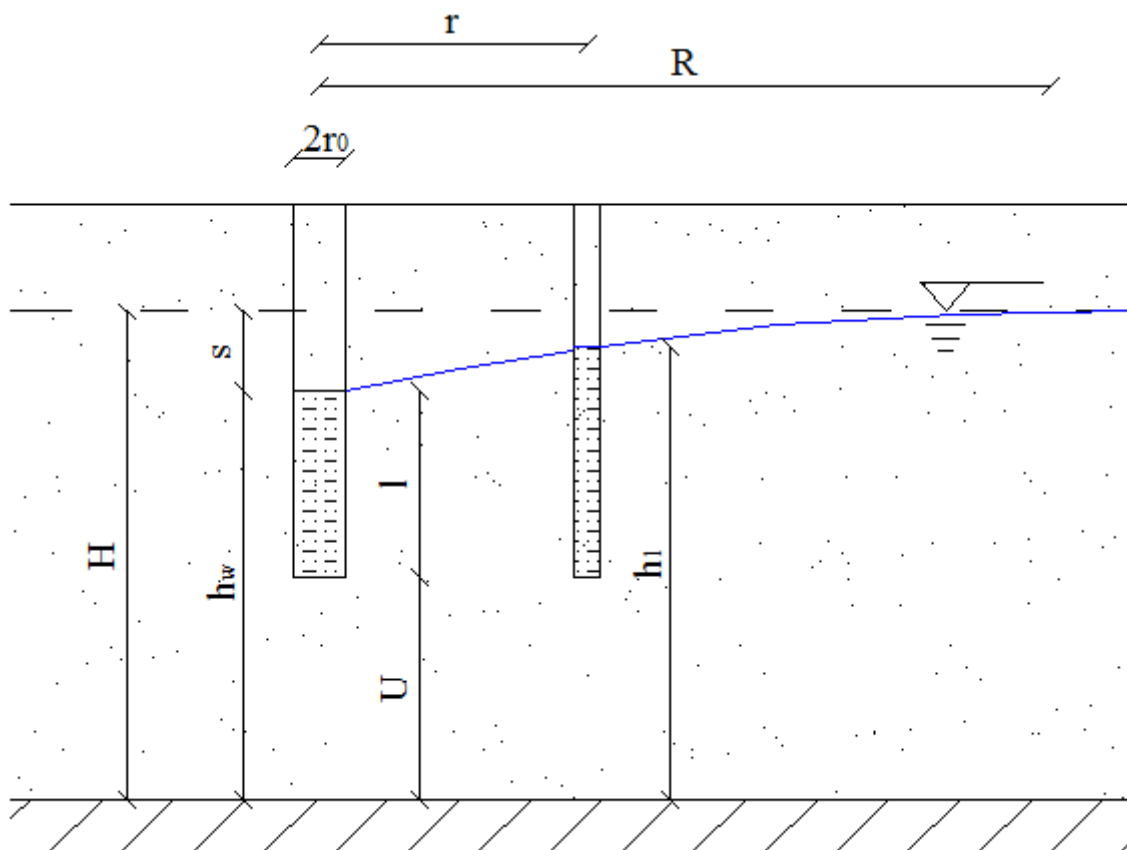


Slika 4: Delno penetrirani vodnjak

Boljšo oceno koeficienta prepustnosti dobimo, če med črpalnim preizkusom na testnem vodnjaku opazujemo znižanja v okolišnih piezometrih. Da bi določili  $k$  iz meritev narejenih na testnem vodnjaku in enem piezometru, lahko uporabimo enačbo Dupuita (11).

$$k = \frac{\ln R - \ln r}{\pi(h_1^2 - h_w^2)} * Q * \frac{1}{b} \quad (11)$$

V enačbi je uporabljen koeficient  $b$ , ki upošteva nepopolnost vodnjaka. Sam sem v nadaljevanju uporabljal popravek Forcheimerja po enačbi (10). Ta metoda je podrobneje opisana v poglavju tok vode v vodnjak. Na sliki 5 je prikazan testni vodnjak s piezometrom na oddaljenosti  $r$ .



Slika 5: Vodnjak z eno opazovalno vrtino.

Boreli je napisal enačbo za tok vode v delno penetrirani vodnjak. Če iz enačbe izrazimo koeficient prepustnosti  $k$  in upoštevamo, da imamo eno opazovalno vrtino, dobimo izraz (12).

$$k = \frac{Q(\ln R - \ln r)}{\pi((h_1 - U)^2 - l^2) \left[ 1 + \left( 0,30 + \frac{10r_0}{H} \right) \sin \left\{ 1,8 \left( 1 - \frac{H-U}{H} \right) \right\} \right]} \quad (12)$$

Pri računanju z enačbo (12) si pomagamo s sliko 5. Enačba Borelija velja v primeru delno penetriranega vodnjaka v odprtem vodonosniku, v primeru da dolžina filtrov znaša vsaj 30% začetne zasičene debeline vodonosnika (Petrović, 1956).

S poenostavitvijo Cooperja in Jacoba Theisove enačbe (13) lahko v posebnih primerih računamo tudi koeficient prepustnosti v odprtem vodonosniku (Cashman in Preene, 2001). Ti pogoji so opisani v poglavju Tok vode v vodnjak.

$$H - h_1 = \frac{Q}{4k\pi H} \left[ -0,5772 - \ln \left( \frac{r^2 C_s}{4kHt} \right) \right] * \frac{1}{C_{p0}} \quad (13)$$

Enačbo (13) sem reševal tako, da sem iz črpalnega preizkusa vstavil vse znane količine v enačbo, nato pa sem numerično spreminjal koeficient prepustnosti, dokler nisem dobil željenega znižanja  $H - h_1$  z zadostno natančnostjo.  $C_{p0}$  je koeficient, ki upošteva vpliv nepopolnosti vodnjaka. Pri računu sem upošteval vrednosti po Butlerju, kot so podane v Powers et al. (2007) (preglednica 1).

## 2.4 Tok vode v vodnjak

Da bi matematično opisali tok podzemne vode v odprtem vodonosniku pri črpanju iz vodnjaka, je potrebno uvesti predpostavke o idealnem vodonosniku, predstavljene v poglavju 2.1. Tok vode sledi Dupuitovim predpostavkam: hidravlični gradient takšnega toka je enak naklonu gladine talne vode ter da so tokovnice horizontalne, ekvipotencialne linije pa vertikalne (Powers et al., 2007).

Pri odvodnjavanju gradbene jame je največja neznanka pretok  $Q$ , s katerim moramo črpati iz vodnjaka, da dosežemo zastavljen cilj oziroma znižanje gladine podzemne vode. Glede na  $Q$  sledijo vse nadaljnje odločitve glede razporeda, zasnove in izvedbe vodnjakov ter izbire opreme. Za analizo obstajajo različni analitični modeli, ki dajo razumne ocene, kadar jih uporabimo razsodno. Za zelo zapletene sisteme s kompleksno geometrijo, pa se priporoča uporaba numeričnih metod (Powers et al., 2007).

### 2.4.1 Popolni vodnjak

Za popolni vodnjak velja, da polno penetrira celotni vodonosnik do neprepustne podlage, da je polmer vodnjaka  $r_0$  majhen v primerjavi z vplivnim polmerom  $R$  ter da v vodnjaku ni trenja. Tok vode je lahko v stacionarnem ali nestacionarnem stanju. Ti dve stanji se razlikujeta po vplivnem polmeru, znotraj katerega vodnjak vpliva na okolišni vodonosnik. V nestacionarnem stanju je vplivni polmer najprej 0, potem pa se veča do vrednosti, ki jo ima v stacionarnem stanju. To se kaže v spreminjanju depresijskega lijaka. Stacionarno stanje je nek teoretični koncept v katerem se depresijski lijak preneha spreminjati. To spreminjanje je pomembno, saj pri manjšem vplivnem polmeru  $R$  in enakih vseh ostalih spremenljivkah dobimo večje pretoke  $Q$  (Cashman in Preene, 2001).

Vrednost vplivnega polmera  $R$  v stacionarnem stanju lahko določimo po empirični enačbi Sichardta (14). Vidimo, da je po tej enačbi  $R$  odvisen od znižanja gladine talne vode v vodnjaku  $s$  in koeficienta prepustnosti (Powers et al., 2007). Vrednost  $R$  dobimo v [m].

$$R = 3000 * s * \sqrt{k} \quad (14)$$

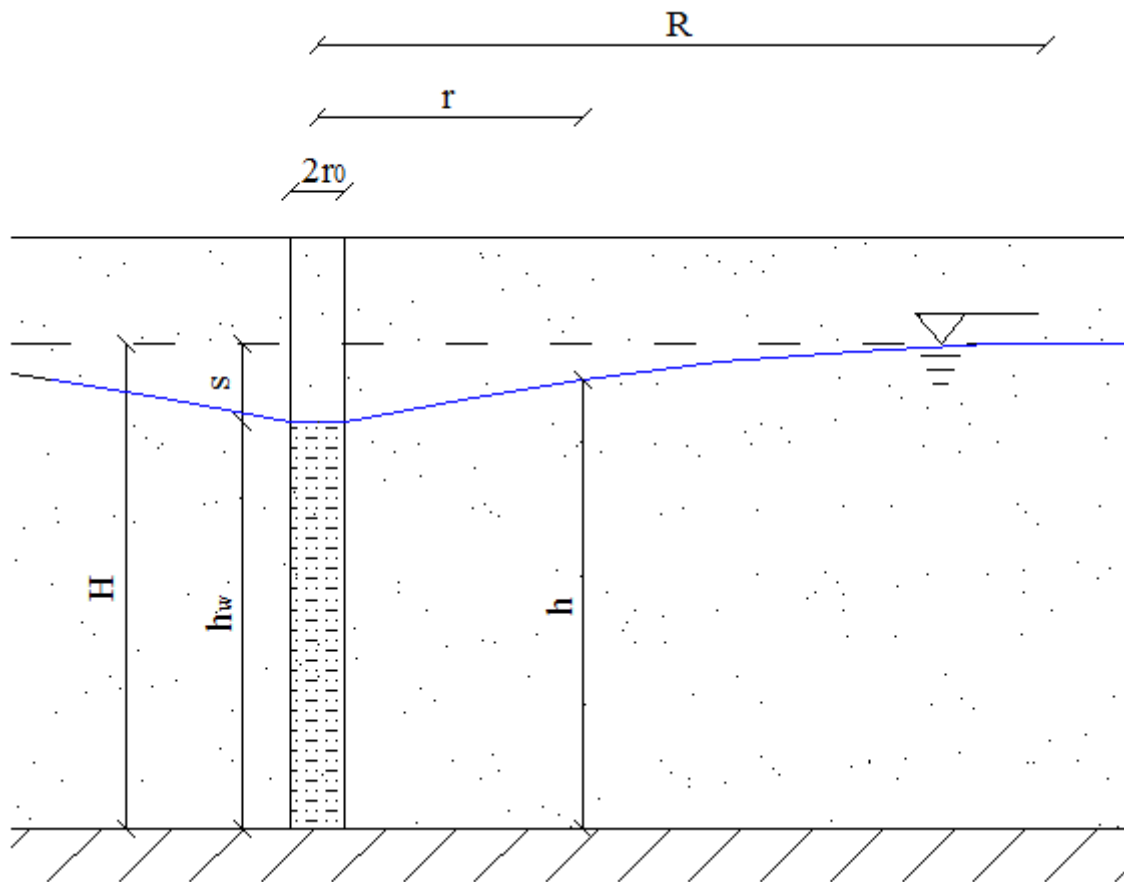
Časovno odvisno spremembo vplivnega polmera v nestacionarnem stanju lahko opišemo z enačbo Cooperja in Jacoba (15), kot je podana v Cashman in Preene (2001).  $C_s$  je koeficient uskladiščenja.

$$R = \sqrt{\frac{2,25 * H * k * t}{C_s}} \quad (15)$$

Upoštevajoč predpostavke o idealnem vodonosniku in popolnem vodnjaku, je Dupuit izpeljal enačbo (16), s katero je opisal stacionarno stanje toka talne vode proti vodnjaku v odprtem vodonosniku.  $R$ , uporabljen v Dupuitovi enačbi, je določen po enačbi (14).

$$Q = k\pi \frac{H^2 - h_w^2}{\ln R - \ln r_0} \quad (16)$$

Pri uporabi enačbe (16) si lahko pomagamo s sliko 6, kjer je prikazan polno penetrirani vodnjak v odprtem vodonosniku.



Slika 6: Popolni vodnjak v vodonosniku s prosto gladino talne vode.

Če poznamo pretok  $Q$ , lahko določimo višino gladine talne vode  $h$  na poljubni oddaljenosti  $r$  od osi vodnjaka.  $h$  določimo po enačbi (17).

$$h = \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r}} \quad (17)$$

Enačba Theisa (18) opisuje nestacionarno stanje toka vode proti popolnemu vodnjaku v arteškem vodonosniku.

$$H - h = \frac{Q}{4k\pi H} W(x) \quad (18)$$

Čeprav enačba (18) teoretično ne velja za odprti vodonosnik, so jo v praksi uspešno uporabili tam, kjer so znižanja gladine talne vode manjša od 20% začetne zasičene debeline vodonosnika (Cashman in Preene, 2001).

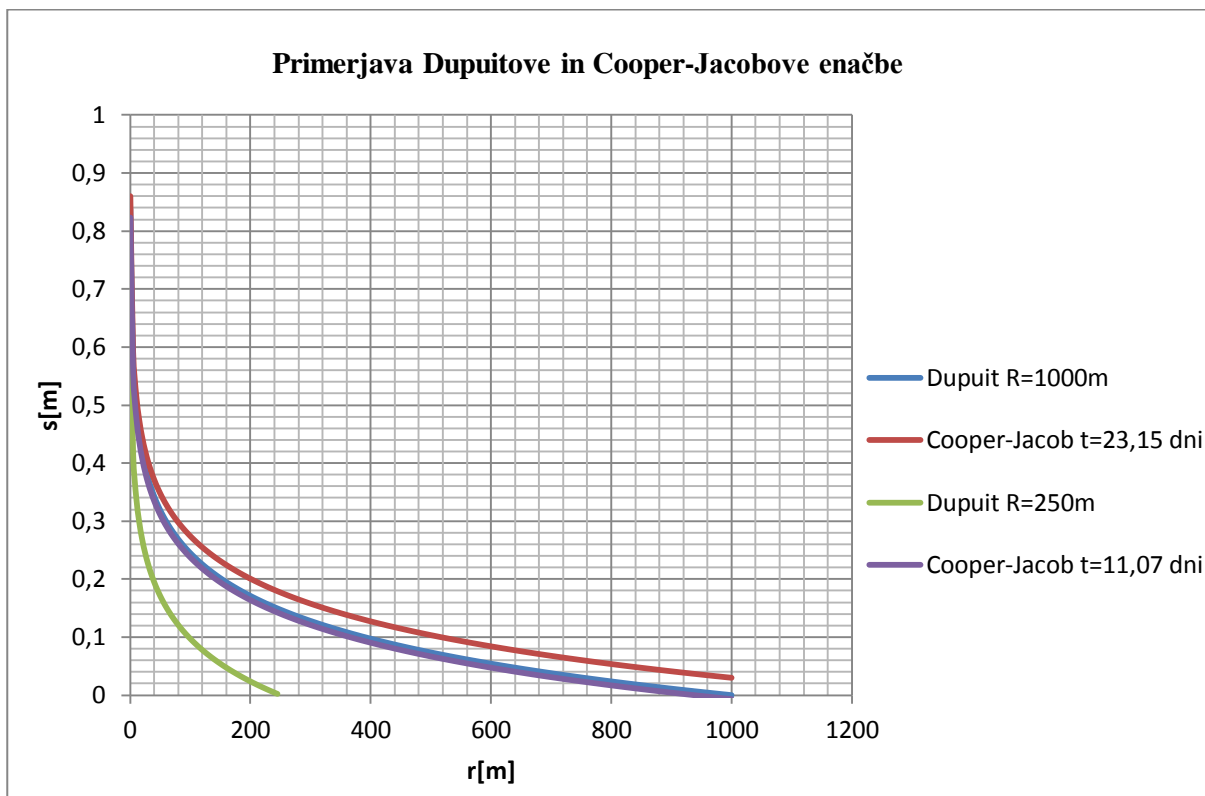
$W(x)$  je Theisova funkcija vodnjaka. Spremenljivko  $x$  lahko zapišemo z izrazom (19).

$$x = \frac{r^2 C_s}{4kHt} \quad (19)$$

Tam, kjer velja, da je  $x$  manjši kot 0,05, lahko uporabimo poenostavitev Cooperja in Jacoba (20). Pri računu pretokov moramo uporabiti redukcijski faktor  $J$  (21), ki naj znaša med 0,8 in 0,9 (Cashman in Preene, 2001).

$$H - h = \frac{Q}{4k\pi H} \left[ -0,5772 - \ln \left( \frac{r^2 c_s}{4kHt} \right) \right] \quad (20)$$

$$Q = \frac{1}{j} Qi \quad (21)$$



Slika 7: Primerjava Dupuitove in Cooper-Jacobove enačbe.

Na sliki 7 je izrisan grafikon odvisnosti znižanja  $s$  v odvisnosti od polmera  $r$ . V dveh različnih enačbah so uporabljene iste veličine, spreminjata se le čas oziroma vplivni polmer. Vidimo, da če vplivni polmer izračunamo po enačbi (14) vzamemo bolj konzervativno oceno, kot če bi računali po enačbi Cooper-Jacoba za 11 ali 23 dni.

#### 2.4.2 Nepopolni vodnjak

Predpostavke o popolnem vodnjaku v naravi velikokrat niso izpolnjene. Vodnjaki dostikrat samo delno penetrirajo vodonosnik, namerno ali nenamerno. V primeru analize problema po postopkih za popolni vodnjak lahko pride do resnejših napak. Tudi predpostavka o vodnjaku brez trenja je pogosto neupravičena (Powers et al., 2007).

V nadaljevanju podpoglavja so predstavljeni pristopi s katerimi lahko upoštevamo delno penetriranost vodnjaka in pripomoček za določanje učinkovitosti vodnjaka z izgubami. Delna penetracija je upoštevana s popravkom Forcheimerja, popravkom Butlerja in enačbo Borelija.

Popravek Forcheimerja upošteva delno penetriranost vodnjaka s koeficientom  $b$ .

$$Q_{pp} = b Q_{fp} \quad (22)$$

V enačbi (22) predstavlja  $Q_{pp}$  pretok za delno penetrirani vodnjak,  $Q_{fp}$  pa pretok za polno penetriran vodnjak. Za določanje koeficienta  $b$  uporabimo enačbo (10), pri tem si pomagamo s sliko 5.

Ta metoda torej pove, da moremo pri delno penetriranemu vodnjaku črpati manj vode, da dosežemo isti učinek znižanja.

Popravek Butlerja, kot je opisan v Powers et al. (2007), je predviden za arteški vodonosnik. Ker pa je tudi enačba Cooper-Jacoba v osnovi izpeljana za zaprti vodonosnik, bom metodo vseeno uporabil. Razmerje med znižanji delno in polno penetriranega vodnjaka je opisano z enačbo (23).

$$(H - h)_{fp} = C_{p0} * (H - h)_{pp} \quad (23)$$

Koeficient  $C_{p0}$  lahko določimo po preglednici 1.  $C_{p0}$  je odvisen od razdalje od vodnjaka, stopnje penetracije  $\frac{P}{H}$  in razmerja  $\frac{R}{H}$ , kjer je  $R$  vplivni polmer. V preglednici nastopa tudi razmerje med vertikalno in horizontalno prepustnostjo  $\frac{k_v}{k_h}$ . Preglednica je povzeta po Powers et al. (2007).

**Preglednica 1: Vrednosti  $C_{p0}$  po Butlerju (Powers et al., 2007).**

Vrednosti $C_{p0}$				Vrednosti $C_{p0}$			
$\frac{r}{P} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$	Stopnja penetracije $P/H$			$\frac{r}{P} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$	Stopnja penetracije $P/H$		
	30%	50%	70%		30%	50%	70%
$R/H = 3$				$R/H = 10$			
0,318	0,621	0,768	0,882	0,318	0,753	0,848	0,923
0,4	0,716	0,817	0,905	0,4	0,823	0,884	0,941
0,5	0,792	0,86	0,927	0,5	0,874	0,917	0,956
0,6	0,848	0,897	0,943	0,6	0,913	0,94	0,968
0,8	0,918	0,941	0,966	0,8	0,957	0,968	0,983
1	0,954	0,967	0,98	1	0,978	0,983	0,989
1,4	0,984	0,988	0,993	1,4	0,993	0,994	0,998
2,23	0,998	0,999	0,999	2,23	0,999	0,999	1
$R/H = 5$				$R/H = 100$			
0,318	0,691	0,811	0,904	0,318	0,853	0,909	0,954
0,4	0,774	0,854	0,925	0,4	0,897	0,933	0,966
0,5	0,837	0,891	0,943	0,5	0,929	0,953	0,976
0,6	0,884	0,921	0,957	0,6	0,953	0,968	0,983
0,8	0,94	0,957	0,975	0,8	0,978	0,984	0,99
1	0,969	0,976	0,986	1	0,99	0,993	0,996
1,4	0,991	0,993	0,996	1,4	0,997	0,998	0,999
2,23	0,999	0,999	1	2,23	1	1	1

Enačba Borelija (24) velja za delno penetrirani vodnjak v odprtem vodonosniku, v primeru, da dolžina filtrov znaša vsaj 30% začetne zasičene debeline vodonosnika (Petrović, 1956).

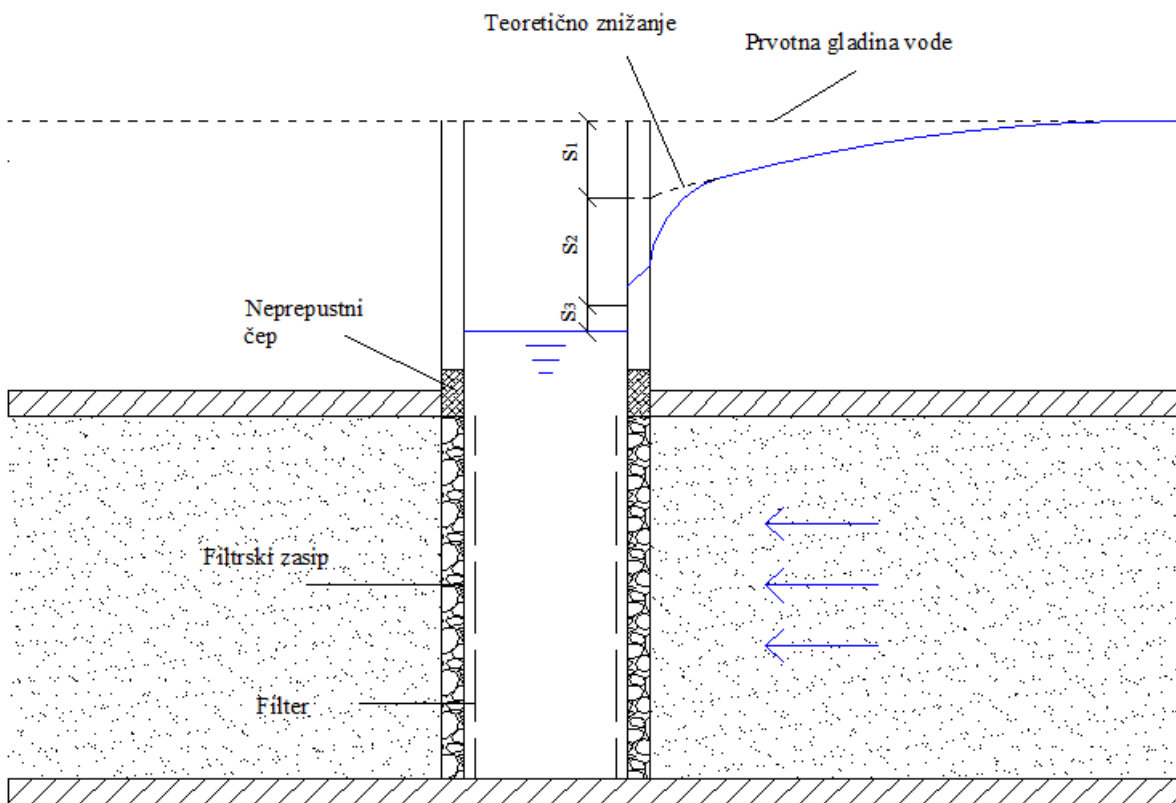
$$Q = \pi k \frac{((H-U)^2 - l^2)}{\ln R - \ln r_0} \left[ 1 + \left( 0,30 + \frac{10r_0}{H} \right) \sin 1,8 \left( 1 - \frac{H-U}{H} \right) \right] \quad (24)$$

Iz enačbe (24) lahko izrazimo višino  $t$  na poljubni oddaljenosti  $r$ , podobno kot v enačbi (17). V primeru, da znaša dolžina filtrov manj kot 30% začetne zasičene debeline vodnjaka, pa lahko uporabimo enačbo Babuškina (25) (Dragomir, 1966).

$$Q = 1,36 * k * (H - U - l) * \left[ \frac{H-u}{\log\left(\frac{R}{r_0}\right)} + \frac{l}{\log\left(\frac{0,66l}{r_0}\right)} \right] \quad (25)$$

Znižanje v vodnjaku se sestoji iz dveh komponent: znižanja v vodonosniku in izgub v vodnjaku. Znižanje v vodonosniku je znižanje tam, kjer je v vodonosniku laminarni tok. Tudi dodatno znižanje zaradi delne penetriranosti je del znižanja v vodonosniku. Izgube v vodnjaku so razdeljene na linearne in nelinearne izgube. Linearne izgube so posledica izgradnje vodnjaka, nelinearne izgube pa so posledica turbulentnih tokov. Vse te izgube povzročajo, da je znižanje vode v vodnjaku večje kakor tisto, ki ga izračunamo na teoretični podlagi (Kruseman, Ridder in Verweij, 1994).

Na sliki 8 so prikazana znižanja v vodnjaku.  $s_1$  so izgube v vodonosniku,  $s_2$  linearne izgube v vodnjaku,  $s_3$  pa nelinearni del izgub v vodnjaku. Vodonosnik na sliki je arteškega tipa.



Slika 8: Delež izgub v vodnjaku (Kruseman, Ridder in Verweij, 1994)

Step-drawdown test je test na posamezni vrtini, pri katerem se iz vodnjaka črpa manjša količina vode, dokler se znižanje ne umiri. Črpalna količina se nato poveča in se črpa dokler se znižanje ponovno ne umiri. Ta postopek izvedemo vsaj trikrat (Kruseman, Ridder in Verweij, 1994). S tem testom lahko ocenimo učinkovitost delovanja vodnjaka in velikost izgub. Jacob je znižanje v vodnjaku v odvisnosti od pretoka  $Q$  opisal z enačbo (26).

$$s = BQ + CQ^2 \quad (26)$$

Učinkovitost vodnjaka  $E_w$  lahko potem določimo z enačbo (27)

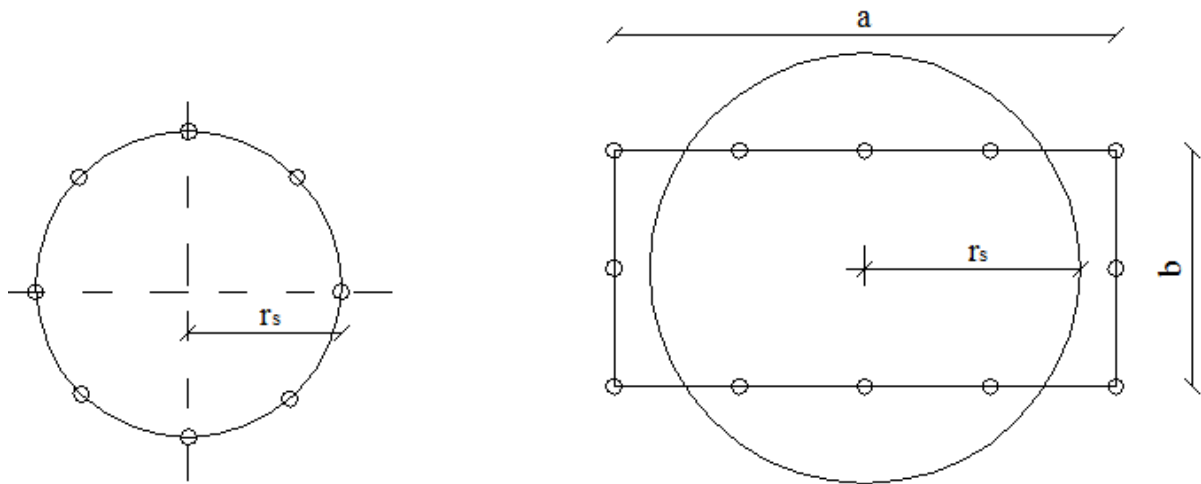
$$E_w = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} * 100\% \quad (27)$$



Postopek izračuna je podrobneje opisan v poglavju 4.6.

### 2.4.3 Skupina vodnjakov

V primerih, ko so vodnjaki precej blizu drug drugega in razporejeni v pravilnih oblikah, lahko problem analiziramo z velikim nadomestnim vodnjakom s polmerom  $r_s$  (slika 9).



**Slika 9: Nadomestni vodnjak za skupino vodnjakov.**

Nadomestni polmer  $r_s$  pri pravokotni razporeditvi vodnjakov lahko izračunamo z enačbo (27) ali (28) (Powers et al., 2007).

$$r_s = \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}} \quad (27)$$

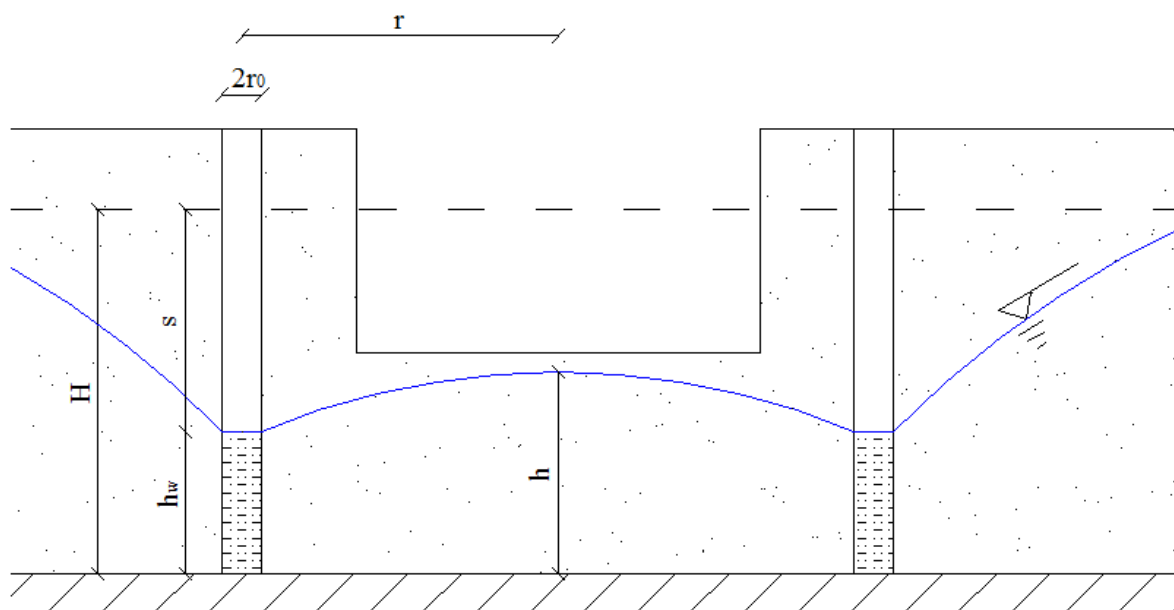
$$r_s = \frac{a+b}{\pi} \quad (28)$$

Ta predpostavka o nadomestnem vodnjaku velja, če je vplivni polmer  $R$  velik v primerjavi z  $r_s$  in če razmerje  $\frac{a}{b}$  ni večje od 1,5. Če pa so vodnjaki dokaj narazen, bo dejanski pretok  $Q$  precej večji, kot bi ga dobili po analizi z nadomestnim vodnjakom (Powers et al., 2007). V primeru, da so vodnjaki dokaj narazen, bi bilo boljše uporabiti metodo kumulativnih znižanj. Pri tej metodi upoštevamo znižanje v neki točki kot seštevek znižanj zaradi posameznega vodnjaka.

Z metodo Forcheimerja (29) določimo črpalno količino skupine vodnjakov, ki črpajo enako količino vode. Vplivni polmer lahko določimo po enačbi Sichardta (14), s tem, da predpostavimo znižanje gladine vode v vodnjaku.

$$Q = k\pi \frac{H^2 - h_0^2}{\ln R - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln r_i} \quad (29)$$

$r_i$  so razdalje od vodnjakov do točke v kateri preverjamo znižanje nivoja vode,  $n$  pa je število vodnjakov. Pretok  $Q_i$  posameznega vodnjaka dobimo tako, da  $Q$  delimo s številom vodnjakov. Preveriti moramo tudi znižanje gladine vode v vodnjakih. Če se to ujema s predpostavljenim znižanjem končamo računanje, drugače iteriramo do zadovoljivih rezultatov (Logar in Majes, 2010). Primer je prikazan na sliki 10.



Slika 10: Skupina vodnjakov.

Tudi za poenostavljeno enačbo Cooper-Jacoba lahko zapišemo superpozicijo znižanj (30).

$$H - h = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4k\pi H} \left[ -0,5772 - \ln \left( \frac{r_i^2 C_s}{4kHt} \right) \right] \quad (30)$$

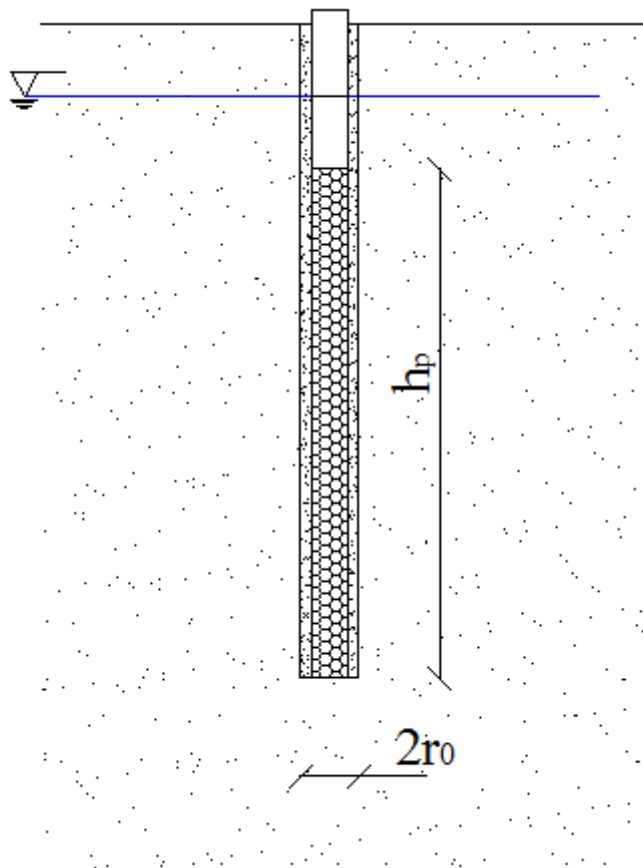
Če ne poznamo izgube v vodnjakih, je ta metoda primerna za analizo točk, ki niso v neposredni bližini vodnjakov. Metoda predpostavi, da vodnjaki ne vplivajo na črpanje drugih vodnjakov (Cashman and Preene, 2001).

## 2.5 Maksimalni pretok v vodnjaku

Kapaciteta posameznega vodnjaka je pomemben faktor, saj določa potrebno število vodnjakov. Kapaciteta vodnjaka  $Q_w$  je odvisna od višine filtra  $h_p$ , koeficienta prepustnosti  $k$  in od polmera vodnjaka  $r_0$ . Maksimalni pretok, ki ga vodnjak lahko črpa, je določen z izrazom (31) (Cashman in Preene, 2001).

$$Q_w = 2\pi * r_0 * h_p \frac{\sqrt{k}}{15} \quad (31)$$

Vrednost  $\frac{\sqrt{k}}{15}$  predstavlja kritično hitrost  $v_{max}$ , s katero lahko voda teče v vodnjak tik ob obodu vrtine. To pomeni, da je maksimalni hidravlični gradient ob obodu vodnjaka  $\frac{1}{15\sqrt{k}}$ . To je vrednost, ki jo je predlagal Sichardt (Cashman in Preene, 2001). Vodnjak je narisana na sliki 11. Če iz vodnjaka črpamo večjo količino vode kot je  $Q_w$  se bo vodnjak izsušil.



Slika 11: Profil vodnjaka v zemljini.

## 2.6 Določila v EC 7

Evrokod 7 predvideva štiri načine porušitve tal, ki jih povzroča tlak ali precejanje porne vode:

- porušitev zaradi vzgona,
- porušitev zaradi hidravličnega loma tal,
- porušitev zaradi notranje erozije
- porušitev zaradi oblikovanja kanalov v tleh.

Pri porušitvi zaradi vzgona je treba preveriti, ali stalni ugodni vplivi prevladujejo nad stalnimi in spremenljivimi neugodnimi vplivi zaradi vode in drugih vzrokov, ki zmanjšujejo stabilnost (enačba 34).  $R_d$  je projektna vrednosti katerekoli dodatne odpornosti proti dvigu.

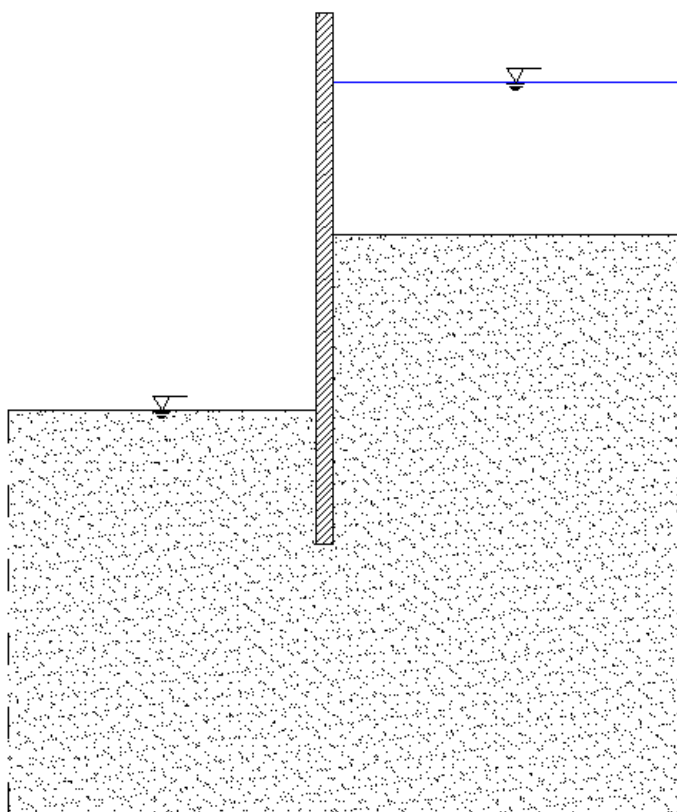
$$V_{dst,d} \leq D_{dst,d} + R_d \quad (34)$$

Hidravlični lom tal se preverja z enačbama (35) ali (36) za vsak merodajni stolpec zemljine. Enačba (35) je zadoščena, če je tlak porne vode na dnu stolpca manjši ali enak totalni navpični napetosti, ki povečuje stabilnost. Enačba (36) je zadoščena, če je projektna vrednost strujne sile v stolpcu zemljine manjša ali enaka potopljeni teži istega stolpca zemljine.

$$u_{dst,d} \leq \sigma_{stb,d} \quad (35)$$

$$S_{dst,d} \leq G'_{stb,d} \quad (36)$$

Primer, kjer je potrebno preverjati hidravlični lom, je prikazan na sliki 12.



**Slika 12: Primer, kjer bi lahko prišlo do hidravličnega loma tal (EC 7)**

Za omejitev nevarnosti transporta zrn zemljine zaradi notranje erozije je treba uporabiti filterski kriterij. Če lahko pride do MSN zaradi notranje erozije, je treba na prosti (dolvodni) površini tal uporabiti ukrepe, kot je filtrska zaščita.

Kjer prevladujoči hidravlični in geološki pogoji lahko vodijo do pojava oblikovanja kanalov v tleh in kjer ta pojav ogroža stabilnost ali uporabnost vodnih zgradb, je treba predpisati ukrepe za preprečitev začetka procesa oblikovanja kanalov. Ukrepi lahko zajemajo uporabo filtrov ali izvajanje konstrukcijskih ukrepov za nadzorovanje ali zmanjšanje hidravličnega gradienta podzemne vode.

Vsak sistem odvodnjavanja tal ali zniževanja vodnega tlaka mora biti zasnovan na rezultatih geotehničnih ali hidrogeoloških preiskav. Voda se lahko iz tal odvaja z gravitacijskim dreniranjem, črpanjem iz zbiralnikov, vodnjakov, vrtin ali z elektroosmozo. V črpalni sposobnosti sistema mora obstajati dovolj velika rezerva in ob okvari morajo biti na voljo rezervne zmogljivosti.

### 3 PRIMERJAVA MED DELNO IN POLNO PENETRIRANIM VODNJAKOM

V 2. poglavju so bile predstavljene osnovne razlike med popolnim in nepopolnim posameznim vodnjakom. V tem poglavju bo prikazana primerjava računskih korekcij analitičnih metod pri delni penetraciji z računalniško modeliranimi primeri. Modeliral sem v programu Plaxis 2D.

#### 3.1 Računalniško modeliranje vodnjaka v Plaxis 2D

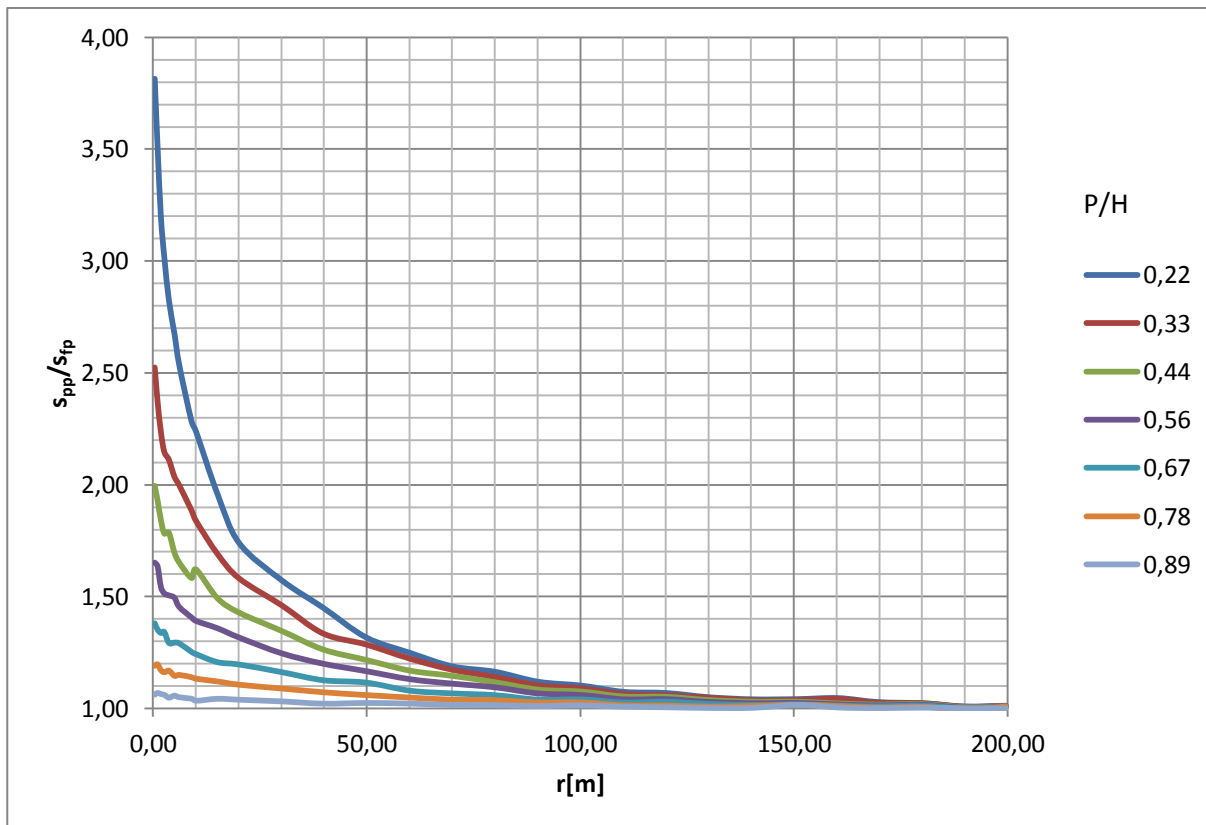
V programu Plaxis 2D sem izdelal osnosimetrični model, ki mi bo pomagal prikazati zvezo med znižanji za polno penetrirani in delno penetrirani vodnjak. Zemljino sem modeliral kot homogeno, vodonosnik pa se razteza 500 m v horizontalni smeri in je konstantne višine. Pretoke sem podajal v  $\left[ \frac{m^3}{dan \cdot rad} \right]$ . Najprej sem uporabil za vse stopnje penetriranosti iste pretoke in preverjal znižanja. Sledil je še račun znižanja gladine talne vode, pri tem pa je razmerje med pretoki in maksimalnimi pretoki ostalo enako. Vodnjak sem modeliral kot zemljino s koeficientom prepustnosti 1 m/s. Namen takšnega modeliranja je prikaz vpliva delne penetracije in učinkovitosti takšnega sistema glede na polno penetriran vodnjak, pri enakih ali spreminjajočih se pretokih.

V prvem delu podpoglavja sem spreminjal globino penetracije vodnjaka  $P$ . Parametre sem izbral tako, da so čim bolj podobni tistim na gradbišču Tobačna mesto. Pri računu sem upošteval stopnje penetracije podane v preglednici 2. Za koeficient prepustnosti v horizontalni smeri sem vzel 0,001 m/s, v vertikalni smeri pa 10 krat manjši.

**Preglednica 2: Uporabljene stopnje penetracije.**

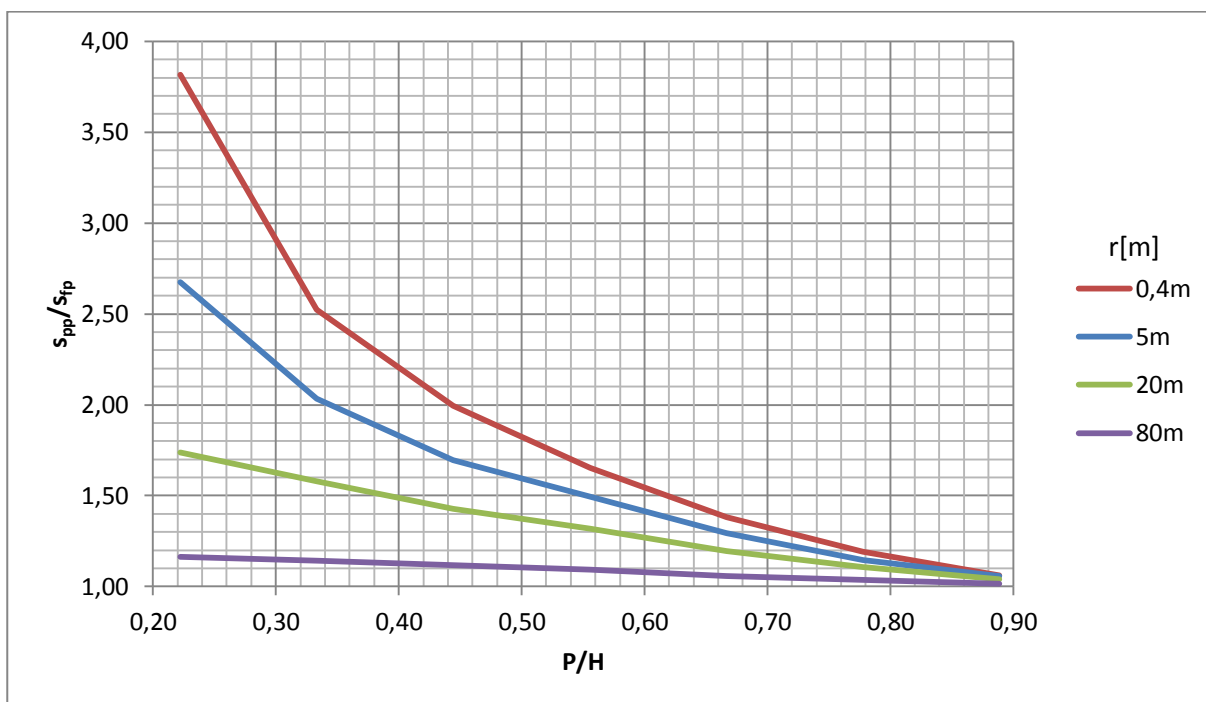
$H[m]$	$P[m]$	$P/H$
45	10	0,22
	15	0,33
	20	0,44
	25	0,56
	30	0,67
	35	0,78
	40	0,89
	45	1,00

Grafikoni prikazujejo razmerje med znižanji za delno penetrirani ( $s_{pp}$ ) in polno penetrirani ( $s_{fp}$ ) vodnjak v odvisnosti od razdalje  $r$  od vodnjaka. Na nekaterih je prikazana odvisnost od stopnje penetracije. Na sliki 13 je prikazan graf odvisnosti  $s_{pp}/s_{fp}$  od razdalje  $r$  pri modeliranju z računalniškim programom. Razvidno je, da če iz vseh vodnjakov črpamo isto absolutno količino vode, dobimo pri delno penetriranih vodnjakih večje znižanje. Lahko rečemo, da plitvejši kot je vodnjak, bolj se bo gladina znižala. Vpliv delne penetracije se zmanjšuje z oddaljenostjo od vodnjaka, dokler se na neki razdalji izniči. Skupni pretok je v vseh prerezi vzdolž horizontalne osi modela enak, spreminja pa se razporeditev toka in hitrosti vode. Ko postane znižanje pri delno penetriranem vodnjaku enako kot pri polno penetriranem, postane tudi tok enak tistemu pri polno penetriranem vodnjaku.



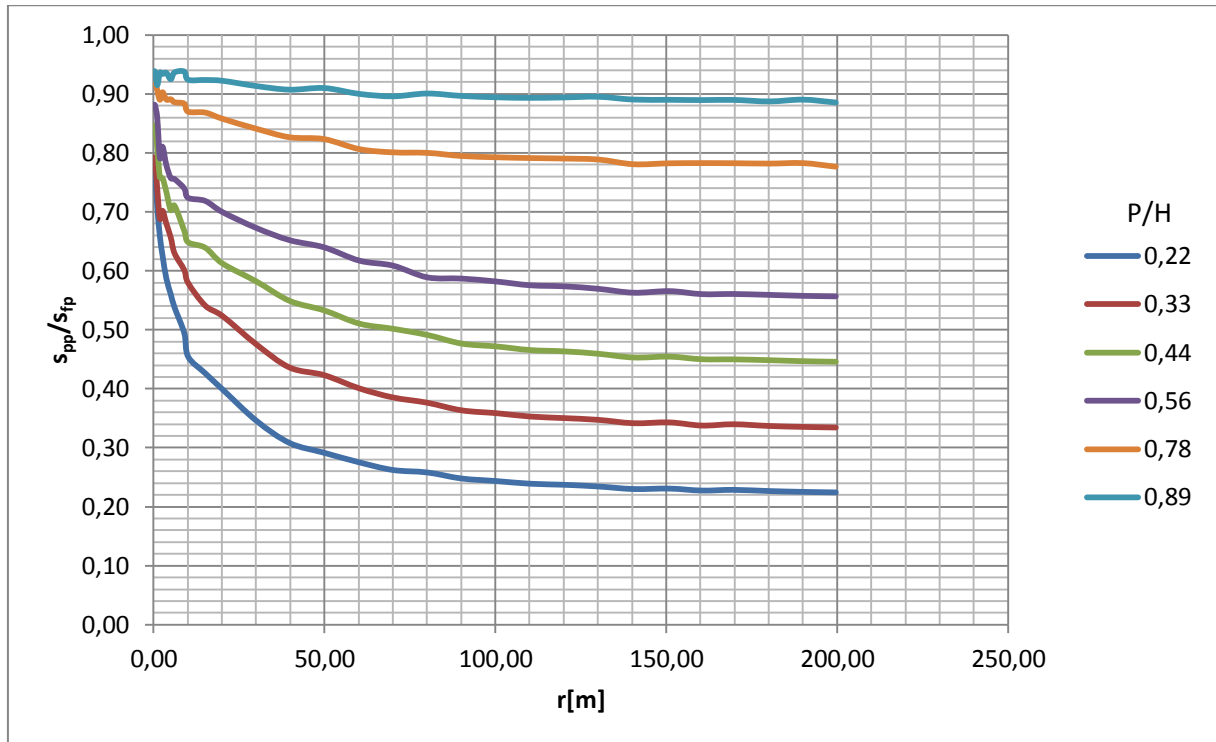
Slika 13: Razmerje med znižanji pri delno in polno penetriranim vodnjakom pri istih pretokih pri računalniški simulaciji.

Podoben grafikon je prikazan na sliki 14, le da je tu prikazana odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od stopnje penetracije in za različne oddaljenosti. Vidimo, da plitvejši vodnjaki izkazujejo večja znižanja na večji razdalji. Na razdalji 80 m pa se vpliv delne penetracije skoraj popolnoma izniči.



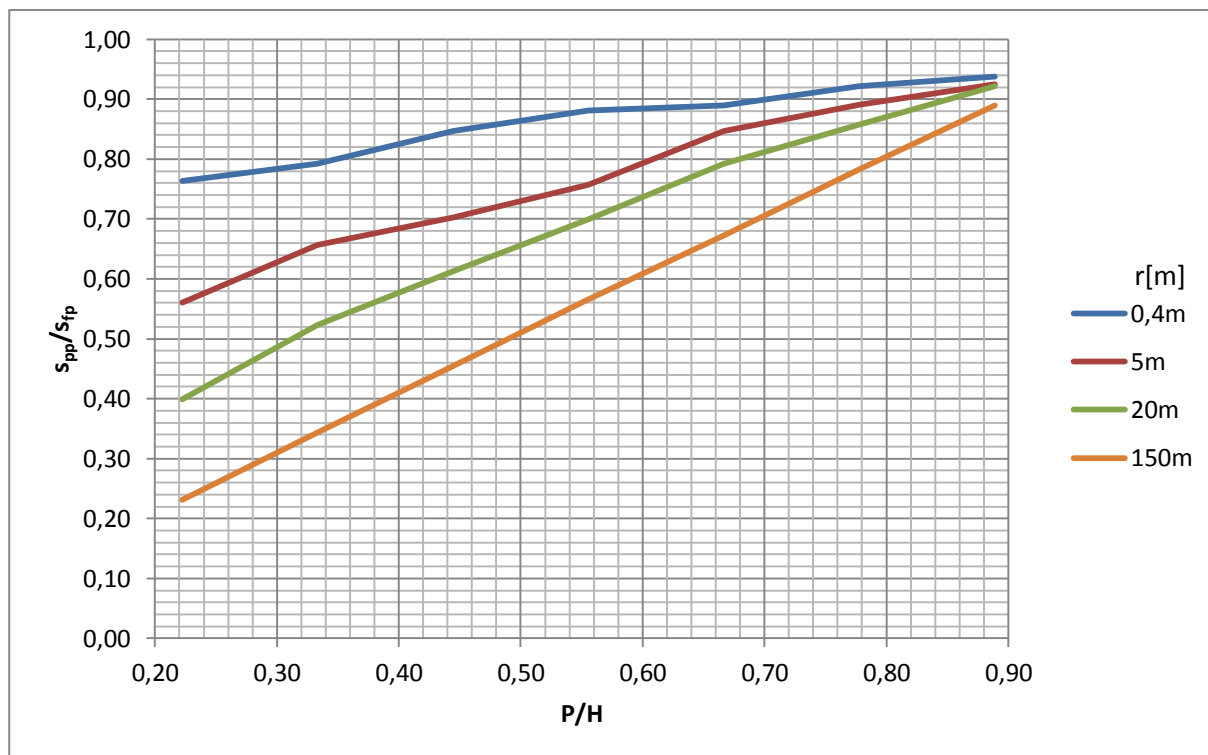
Slika 14: Razmerje  $s_{pp}/s_{fp}$  v odvisnosti od stopnje penetracije pri računalniški simulaciji.

V drugem primeru sem poleg stopnje penetracije spreminjal tudi absolutno vrednost pretokov. Pretoke sem spreminjal tako, da je razmerje  $\frac{Q}{Q_w}$  ostalo enako 0,75. To je razmerje med dejansko črpalno količino in maksimalno možno črpalno količino. Veličina  $Q_w$  se je večala z večjo dolžino filtrov po enačbi (30). Pri tem sem polmer vodnjaka pustil enak v vseh primerih (0,4 m). Rezultati so prikazani na slikah 15 in 16.



Slika 15:  $s_{pp}/s_{fp}$  v odvisnosti od razdalje  $r$  za enake relativne pretoke pri računalniškem modeliranju.

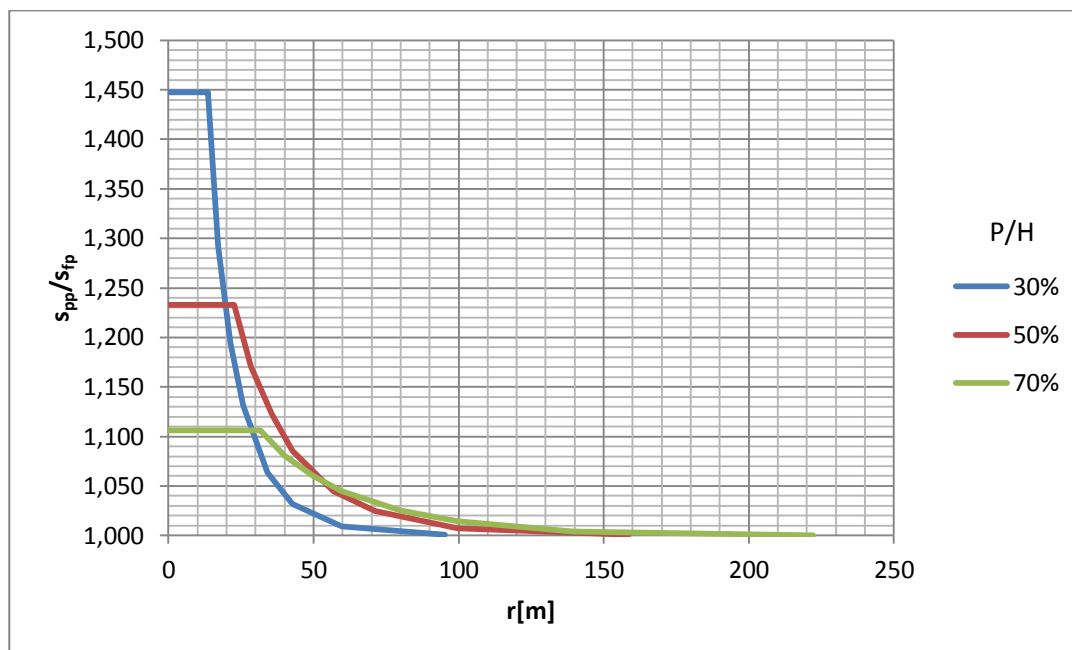
Na sliki 15 vidimo, da s polno penetriranimi vodnjaki dosežemo večje znižanje. To se pozna predvsem na večjih razdaljah. Razmerje  $s_{pp}/s_{fp}$  konvergira z razdaljo proti minimalni vrednosti, ki je odvisna od stopnje penetracije. Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od delne penetracije je prikazana na sliki 16. Razvidno je, da z večanjem dolžine filtrov in s tem tudi črpalne količine, dobimo večja znižanja. Polno penetrirani vodnjaki kažejo svojo prednost predvsem na večjih razdaljah od vodnjaka, kjer je znižanje veliko večje kot pri delno penetriranem vodnjaku.



Slika 16: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od stopnje penetracije za različne absolutne pretoke pri računalniškem modeliranju.

### 3.2 Popravek Butlerja

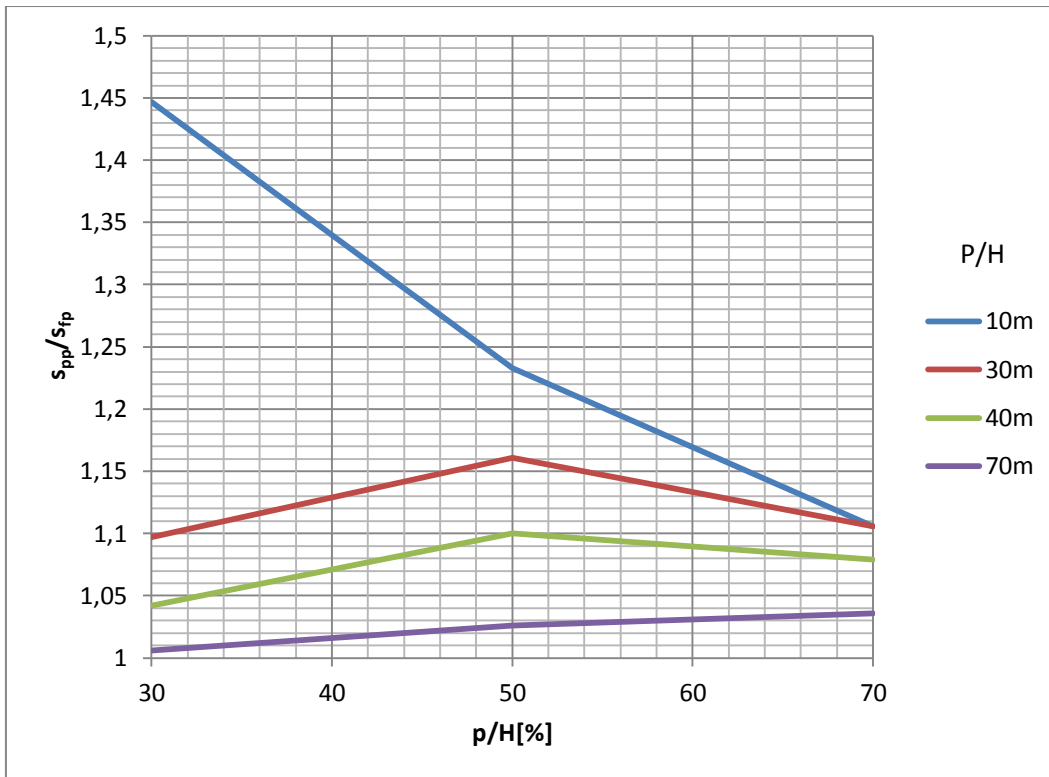
Na grafikonu (slika 17) sem tudi tu izrisal razmerje med znižanjem pri delni in polni penetraciji v odvisnosti od razdalje. Uporabil sem iste koeficiente prepustnosti kot so podani v podpoglavju 3.1. Pretok je enak v vseh treh primerih. Vodnjak z majhno stopnjo penetracije ima na majhni razdalji od vodnjaka največji vpliv, vendar se ta vpliv hitreje izniči, kot pri večjih stopnjah penetracije.



Slika 17: Razmerje  $s_{pp}/s_{fp}$  v odvisnosti od razdalje  $r$  za postopek Butlerja.

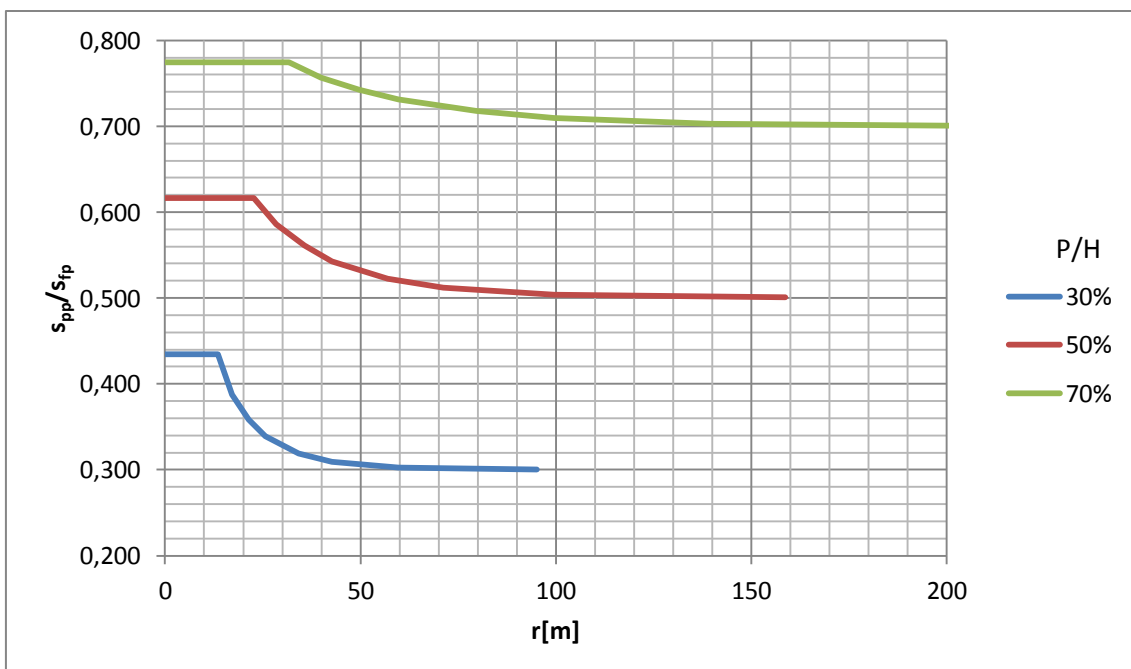


Odvisnost razmerja  $s_{pp}/s_{fp}$  od stopnje penetracije je narisana na sliki 18. Na grafu lahko vidimo, da je vpliv delne penetracije pri plitvih vodnjakih dosti večji na majhnih oddaljenostih od vodnjaka, ta vpliv pa pade precej hitro.



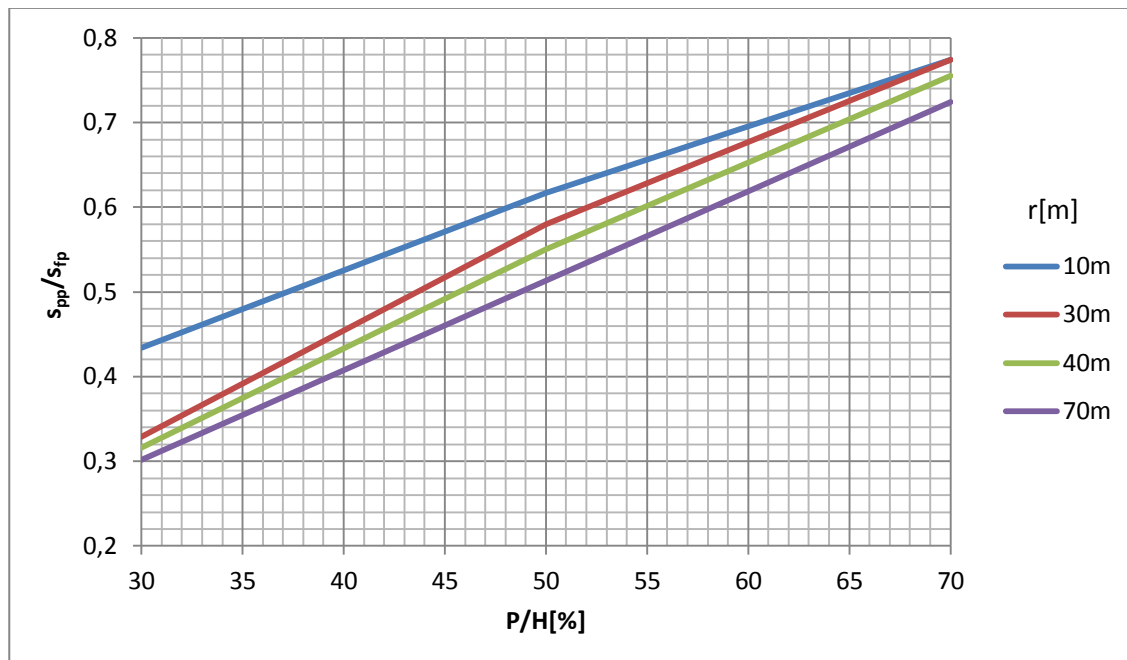
Slika 18: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od  $P/H$  za metodo Butlerja.

Pri spreminjanju količine črpanja sem dobil sliko 19. Pretoke sem spreminjal tako, da je razmerje  $\frac{Q}{Q_w}=0,75$  ostalo vsepovsod enako.



Slika 19: Razmerje  $s_{pp}/s_{fp}$  v odvisnosti od  $r$  pri enakih relativnih pretokih za metodo Butlerja.

Podobno kot pri računalniškem modeliranju, dobimo večja znižanja pri večjih stopnjah penetracije. Vpliv se tudi obdrži na večjih razdaljah. Podoben grafikon lahko narišemo tudi za odvisnost od stopnje penetracije (slika 20). Vidimo, da na tem grafu z manjšo stopnjo penetracije dobimo manjša znižanja, prav tako je njihov vpliv na večjih razdaljah manjši.



Slika 20: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od stopnje penetracije pri Butlerju, pri enakih relativnih pretokih.

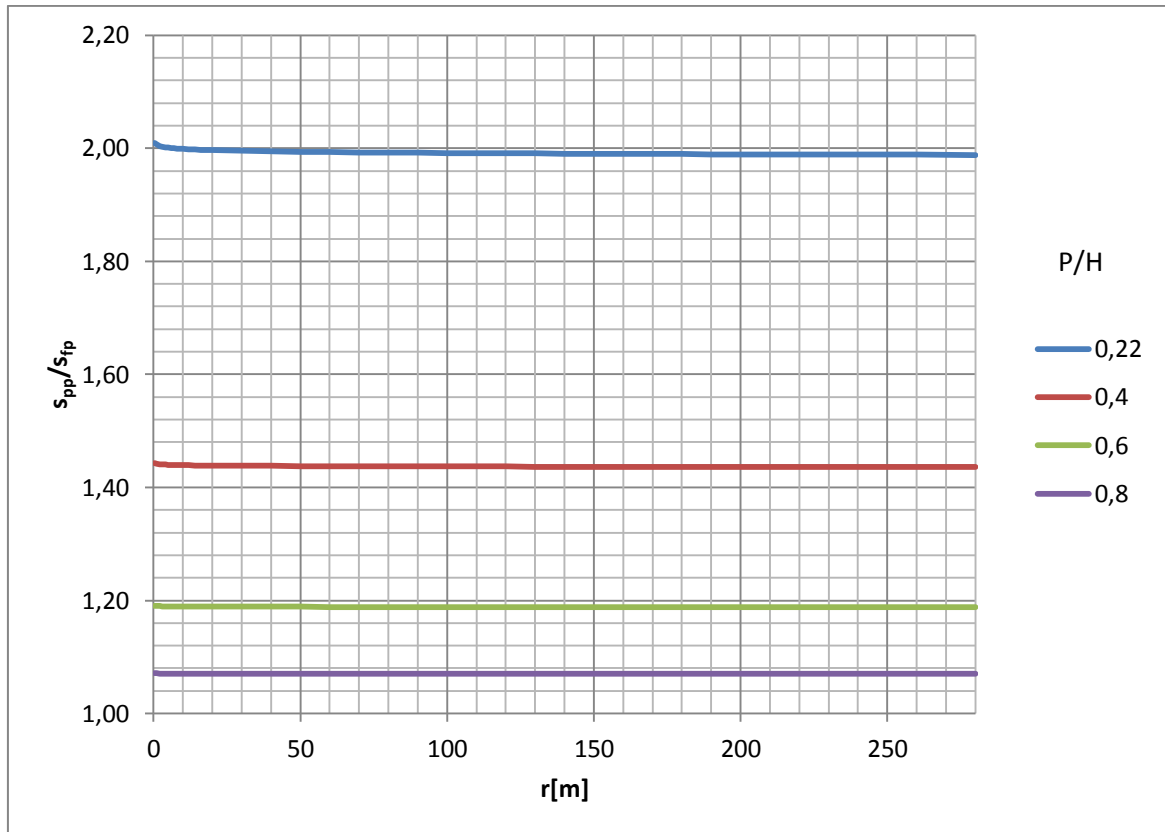
### 3.3 Popravek Forcheimerja

Pretok delno pentriranega vodnjaka glede na polno pentrirani vodnjak opišemo z enačbo (37). Pri tem je koeficient  $b$  dobljen po enačbi (38).

$$Q_{pp} = b Q_{fp} \quad (37)$$

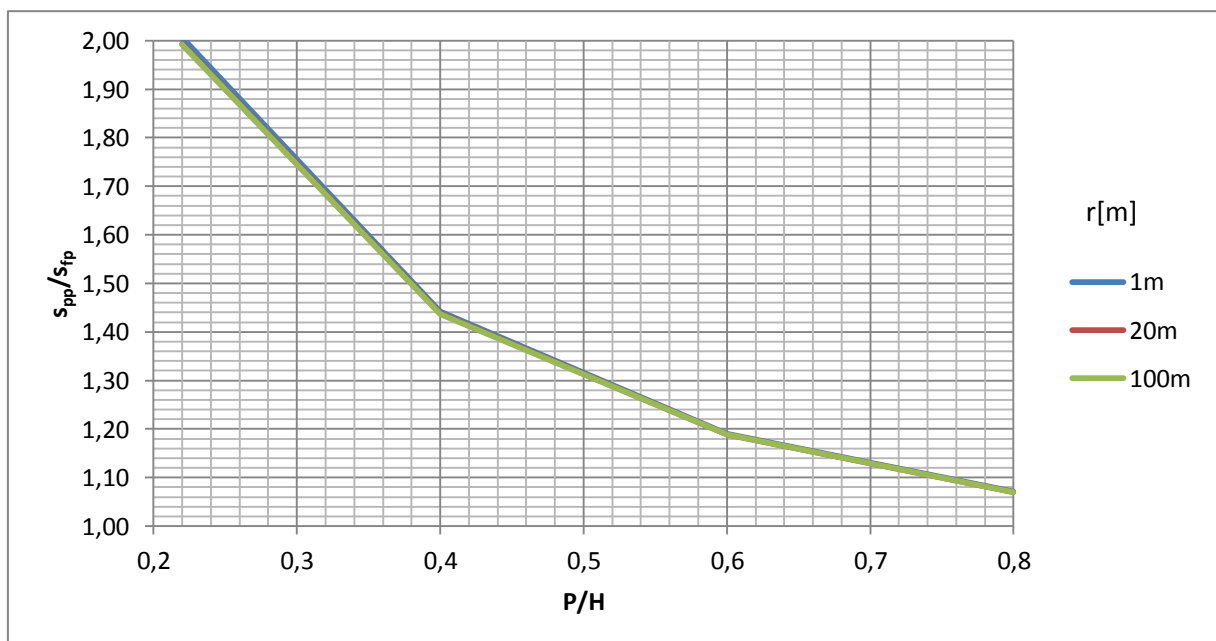
$$b = \sqrt{\frac{l}{h_w}} * \sqrt[4]{\frac{2H-l}{h_w}} \quad (38)$$

Rezultati za absolutno enake pretoke so prikazani na slikah 21 in 22. Vidimo, da koeficient  $b$  praktično ni odvisen od razdalje. Razmerje  $s_{pp}/s_{fp}$  pada s stopnjo penetracije. To pomeni, da če črpamo enako količino vode, dajo plitvejši vodnjaki večja znižanja. Na sliki 22 ponovno vidimo neodvisnost od razdalje od vodnjaka. V primeru, da bi bila znižanja večja v primerjavi z debelino vodonosnika, bi bila verjetno tudi odvisnost od razdalje bolj izrazita.



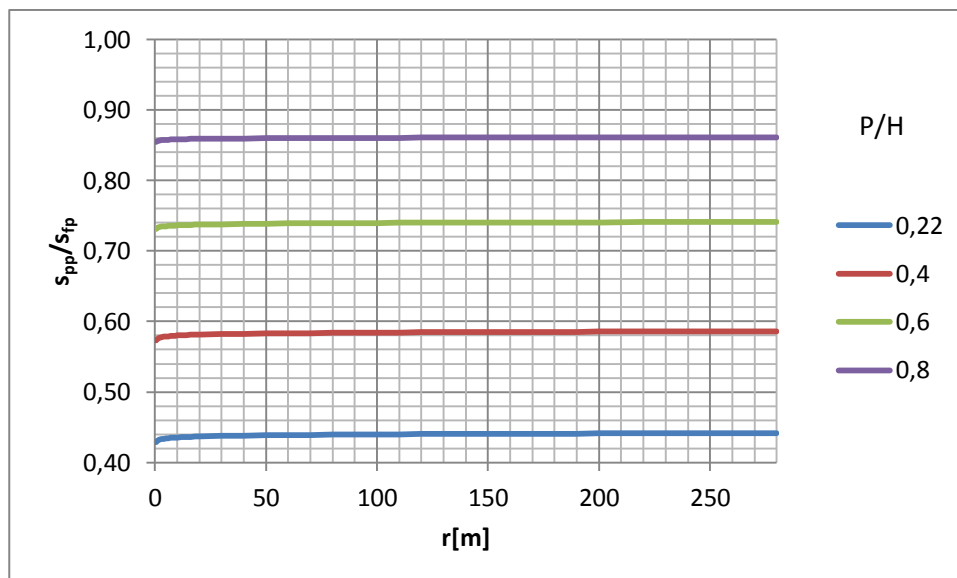
Slika 21: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od polmera  $r$  pri enakih absolutnih pretokih za popravek Forcheimerja.

Razmerje  $s_{pp}/s_{fp}$  s stopnjo penetracije pada.



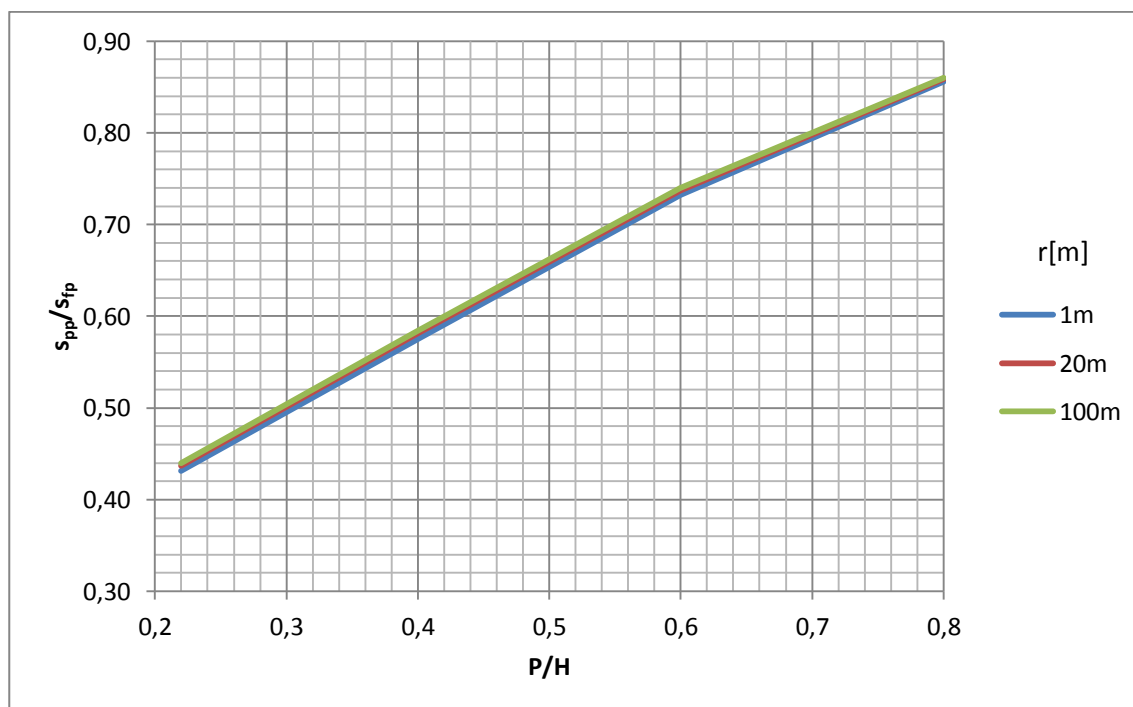
Slika 22: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od stopnje penetriranosti pri enakih absolutnih pretokih za popravek Forcheimerja

Pri drugi možnosti sem znova uporabil enaka relativna razmerja pretokov  $\frac{Q}{Q_w} = 0,75$ . Grafi so prikazani na sliki 23 in 24. Grafikon odvisnosti razmerja  $s_{pp}/s_{fp}$  od polmera  $r$  je prikazan na sliki 23. Odvisnosti tudi tu ni, kot je bilo tudi za pričakovat.



Slika 23: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od polmera  $r$  pri enakih relativnih pretokih pri popravku Forcheimerja.

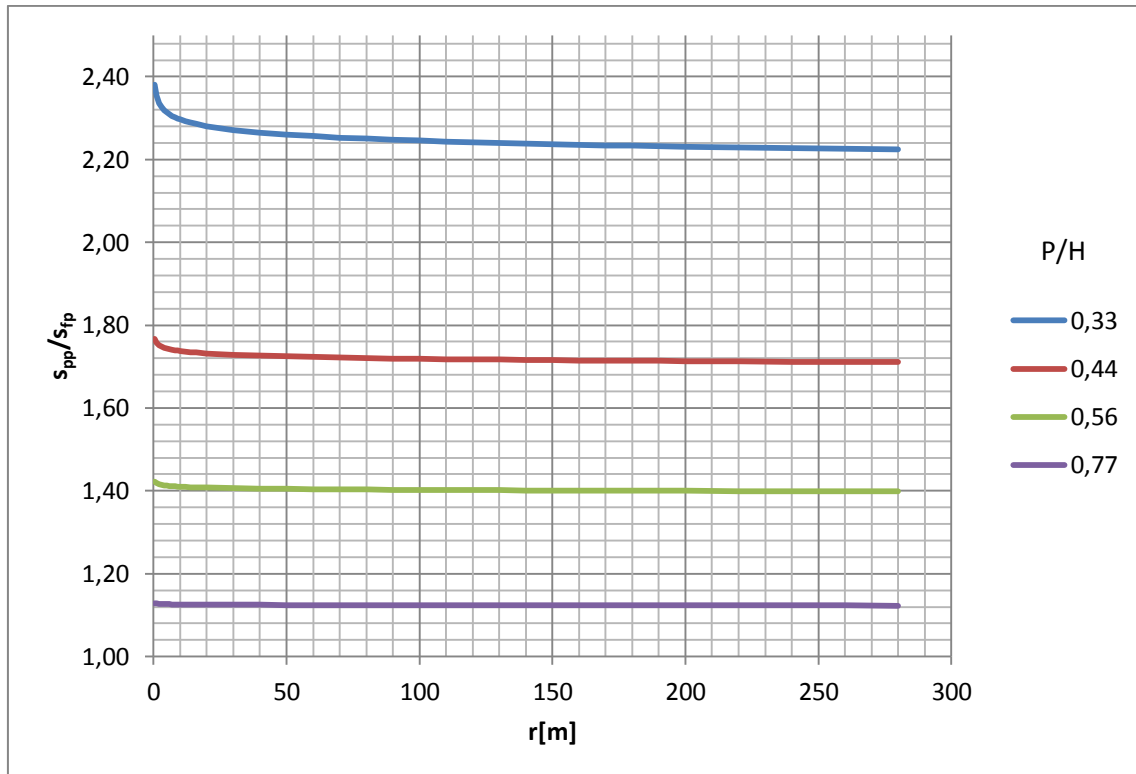
Na sliki 24 je prikazana odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od stopnje penetracije. Lahko rečemo, da količnik  $s_{pp}/s_{fp}$  raste s stopnjo penetracije in s tem z absolutnim pretokom. Podobno kot na ostalih grafih dobimo večja znižanja z globljimi vodnjaki.



Slika 24: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od stopnje penetracije za metodo Forcheimerja pri enakih relativnih pretokih.

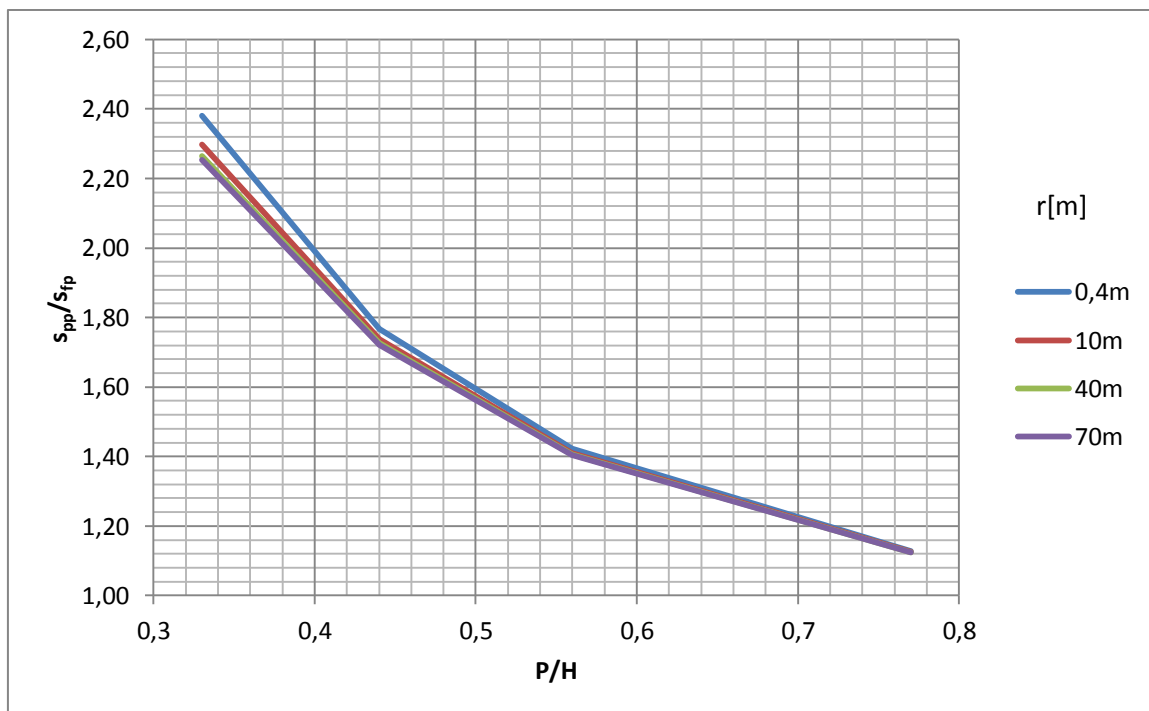
### 3.4 Enačba Borelija

Enačba Borelija velja za delno penetrirane vodnjake, kjer je dolžina filtrov vsaj 30% začetne zasičene debeline vodonosnika. Enačba Boreli-ja preide v primeru polne penetriranosti v enačbo Dupuit-a (16) za polno penetrirani vodnjak. Tudi tu sem najprej analiziral znižanja pri istih absolutnih pretokih in pri različnih stopnjah penetracije. Grafi so prikazani na slikah 25 in 26.



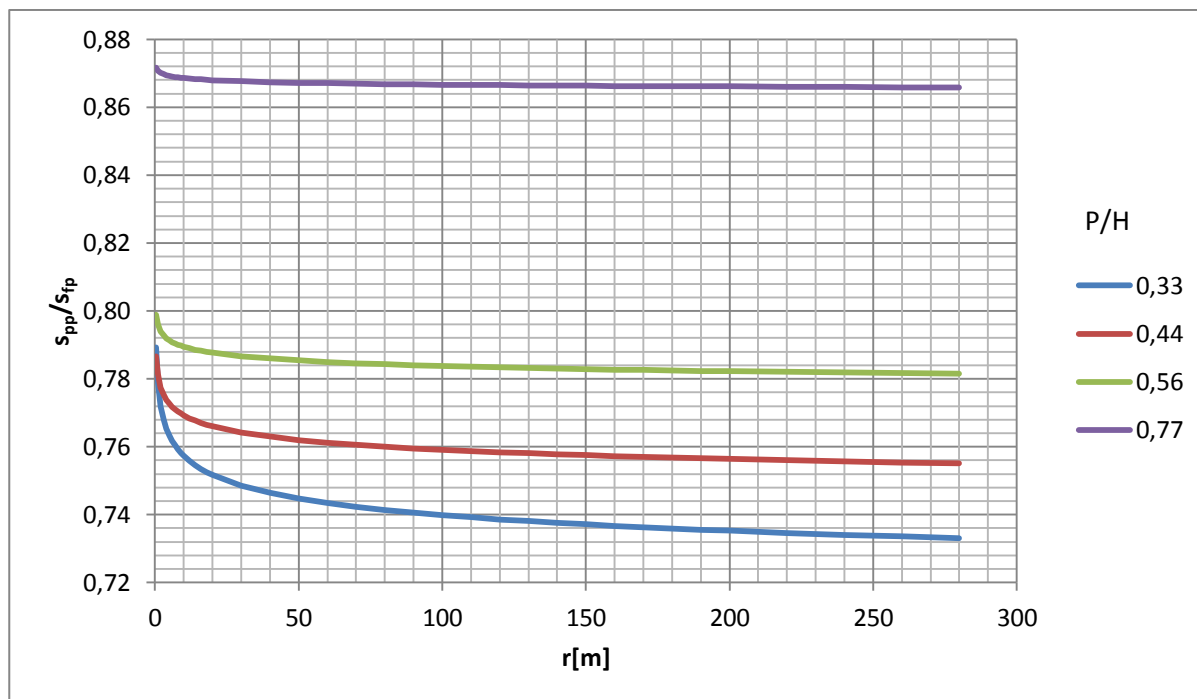
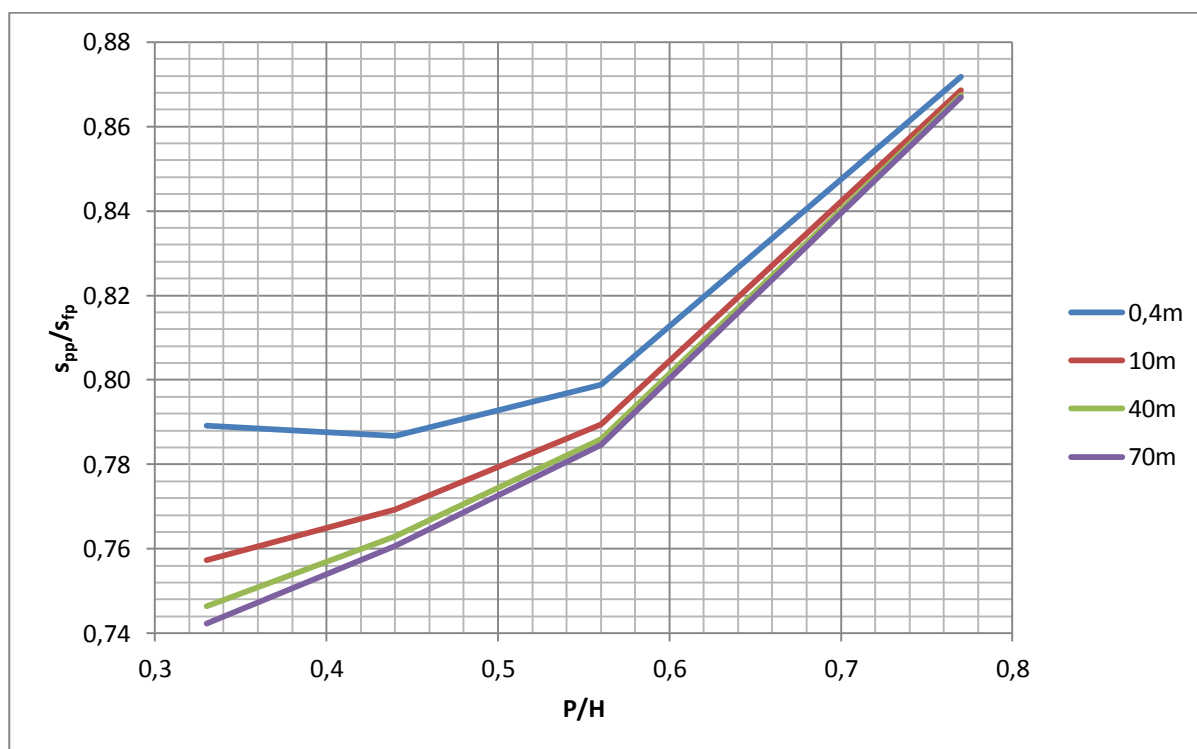
Slika 25: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od razdalje  $r$  pri enakih absolutnih črpalnih količinah (Boreli).

Pri enačbi Borelija razmerje  $s_{pp}/s_{fp}$  z razdaljo skoraj nič ne pada. To se odraža tudi na sliki 27, kjer se vse krivulje skoraj čisto prekrivajo.



Slika 26: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od stopnje penetracije za različne razdalje (Boreli).

Drugi postopek pa je upošteval, da so relativni pretoki, tako kot v prejšnjih podpoglavjih enaki. Razmerje med dejanskim in maksimalnim pretokom je tako za vse stopnje penetracije 0,75. Rezultati so na slikah 27 in 28.

Slika 27: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od razdalje pri enakih relativnih pretokih (Boreli).Slika 28: Odvisnost  $s_{pp}/s_{fp}$  od stopnje penetriranosti za različne razdalje pri enakih relativnih pretokih (Boreli).

Tudi pri tej metodi se izkaže, da pri enakih relativnih pretokih dosežemo večja znižanja z globljimi vodnjaki. Pri tej metodi pa ni tako izrazit pozitiven vpliv polne penetracije na znižanje na večjih razdaljah. Na sliki 27 vidimo, da tudi v primeru 33% penetracije vodnjaka razmerje  $s_{pp}/s_{fp}$  ne pade pod 0,7, čeprav je pretok pri polno penetriranem vodnjaku v tem primeru 3-krat večji.

### 3.5 Primerjava rezultatov

Uporabljene metode za račun delne penetracije se razlikujejo. Numerično modelirani vodnjak in metoda Butlerja nakazujejo, da se vpliv delne penetracije z razdaljo od vodnjaka zmanjšuje, popravek Forcheimerja in Borelija pa predvidita skoraj konstanten vpliv delne penetracije glede na oddaljenost.

V primeru če črpamo enako (absolutno) količino vode so boljši delno penetrirani vodnjaki. Če pa povečujemo globino vodnjaka in s tem tudi proporcionalno povečamo količino črpanja iz tega vodnjaka, dajo globlji vodnjaki boljši rezultat na vseh razdaljah, še posebej pa je to izrazito na večjih razdaljah. Vpliv delne penetracije pri različnih metodah se razlikuje predvsem v velikostnem redu  $s_{pp}/s_{fp}$ . Metodi Borelija in Forcheimerja se od drugih dveh metod razlikujeta po tem, da je vpliv delne penetracije skoraj neodvisen od razdalje  $r$ . Metoda Butlerja da od vseh metod najbolj konzervativne rezultate.

Prvi dve metodi nakazujeta na to, da se pri enakih relativnih pretokih vpliv delne penetracije razblini na neki razdalji od vodnjaka. Kot konzervativno oceno, bi lahko rekli, da je ta razdalja približno  $1,5 H$ . Takšna vrednost je omenjena tudi v Powers et al.(2007). Od tiste razdalje naprej vrednosti  $s_{pp}/s_{fp}$  konvergirajo proti vrednosti  $P/H$ , ki je v primeru enakega polmera vodnjaka enako razmerju  $Q_{pp}/Q_{fp}$ . Tako konvergiranje je posledica majhnih znižanj gladin talne vode v primerjavi z veliko globino vodonosnika (45 m) in dejstva, da je bila sprememba maksimalne črpalne količine odvisna le od dolžine filtra (polmer vodnjaka je bil konstanten). Pri metodah Borelija in Forcheimerja se vpliv delne penetracije čuti približno enako na vseh razdaljah, zato vrednosti  $s_{pp}/s_{fp}$  ne padajo proti vrednosti  $Q_{pp}/Q_{fp}$ , ampak so večje.

Če povzamem rezultate, lahko rečem, da s črpanjem enake količine vode dosežemo boljši učinek s čim bolj plitvimi vodnjaki, ki pa še zmorejo črpati takšne količine vode. Z boljšim učinkom mislim predvsem na večje znižanje gladine talne vode. Vpliv delne penetracije je najbolj viden do oddaljenosti  $1,5 H$  od vodnjaka. Ker pa je maksimalni pretok določen tudi z dolžino filtra, lahko pri globljih vodnjakih črpamo več vode. In ker je črpanje večje količine vode ponavadi cenejše kot gradnja večjih vodnjakov, je polna penetriranost ponavadi bolj optimalna (Powers et al., 2007). Po drugi strani je delna penetriranost boljša tam, kjer moramo z manjšo količino črpane vode doseči iste rezultate. To je na primer tam, kjer je vodo potrebno čistiti ali pa je nimamo kam odvajati. Z delno penetriranimi vodnjaki dosežemo tudi to, da so znižanja bolj lokalna in ne obsegajo prevelikega področja. S tem se lahko izognemo nezaželenim posedkom zaradi zmanjšanja pornih pritiskov.

## 4 RAČUN ZNIŽANJA PODTALNICE V GRADBENI JAMI TOBAČNA MESTO

V tem poglavju bo predstavljen projekt Tobačne mesto. Najprej je prikazana zasnova gradbišča in gradbene jame ter geotehnične raziskave na tem področju. Na podlagi teh raziskav sem določal karakteristike zemljin potrebne za račun. S temi podatki sem želel določiti potrebne črpalne količine v vodnjakih, da bo v jami možno izvajati gradbena dela v zadovoljivih pogojih. Račun sem izvajal z metodami, predstavljenimi v prejšnjih poglavjih. Izvedel sem tudi numerični račun v programu Processing MODFLOW. Rezultate sem nato primerjal z meritvami, ki so bile opravljene na terenu.

### 4.1 Zasnova

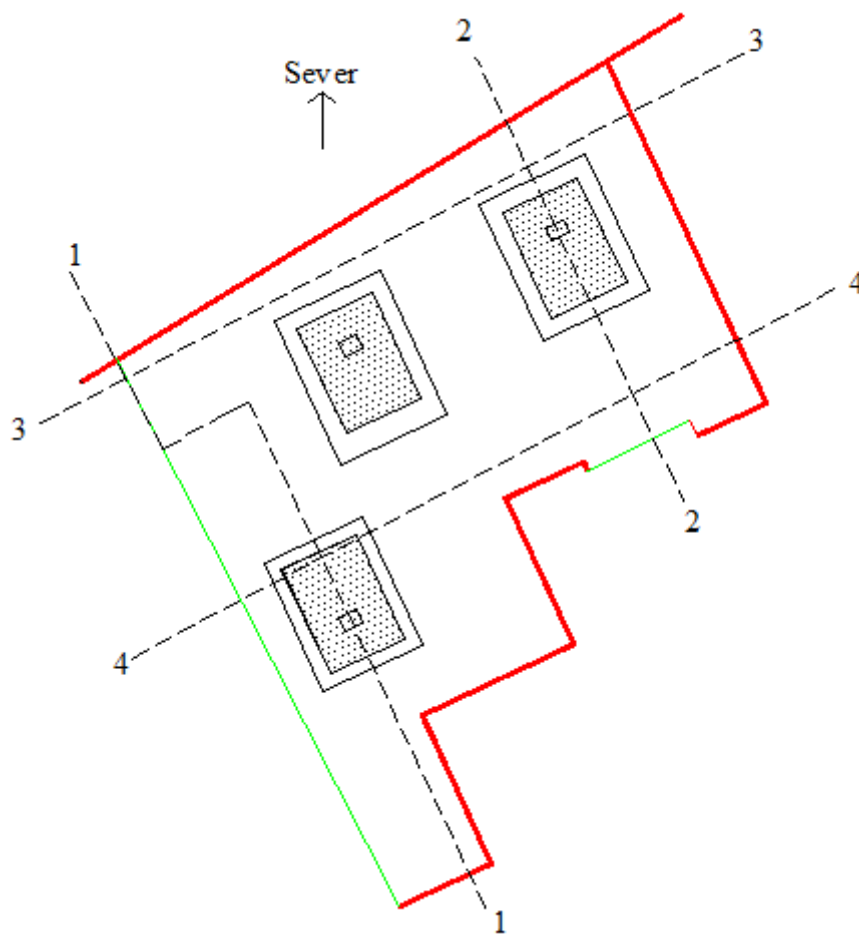
Pri nalogi bo moj cilj znižati gladino talne vode z vodnjaki do te mere, da bo možna gradnja objektov v zadovoljivih pogojih. Obravnaval bom končno stanje izkopa, kjer bom upošteval 12 vodnjakov razporejenih kot v dejanskem projektu. Račun sem naredil za dva primera, za znižanja 1,5 oz 2 m po gradbeni jami in drug primer za znižanja 2,5 oz 3 m.. Gladino talne vode je potrebno znižati vsaj pol metra pod koto gradbene jame.

#### 4.1.1 Zasnova objekta in gradbene jame

Tobačna mesto naj bi postala večstanovanjska četrt. Na tem področju so predvidene stolpnice, pod njimi pa podzemna garaža. Izgradnja takega kompleksa je razdeljena v več faz. Sam sem obravnaval prvo fazo. V neposredni bližini gradbišča se nahajajo objekti stare Tobačne tovarne, nekateri od njih so kulturno zaščiteni. Za potrebe gradnje je izkopana gradbena jama, ki je zaščiten z diafragma. Jama je v povprečju globoka 13 m. Tloris gradbene jame je prikazan na sliki 29.

Dno gradbene jame se nahaja na 282 m.n.v, poglobitve za jedra pa do 281,52 m.n.v. Kot zadovoljivo stanje sem vzel znižanje gladine vode 0,5 m pod najnižjo koto, to je na 281,02 m.n.v. Zaradi enostavnosti bom upošteval koto 281 m.n.v. Potrebno znižanje pod objekti tako znaša v prvem primeru 2 m, v drugem primeru pa 3 m. Zadostno znižanje za ostali del gradbene jame pa znaša 1,5 m oz 2,5 m. Najnižja kota temeljev se na določenih mestih nahaja še globlje (jašek za dvigala), vendar le teh v računu nisem upošteval. Na teh mestih se lahko po potrebi lokalno zniža nivo podzemne vode.

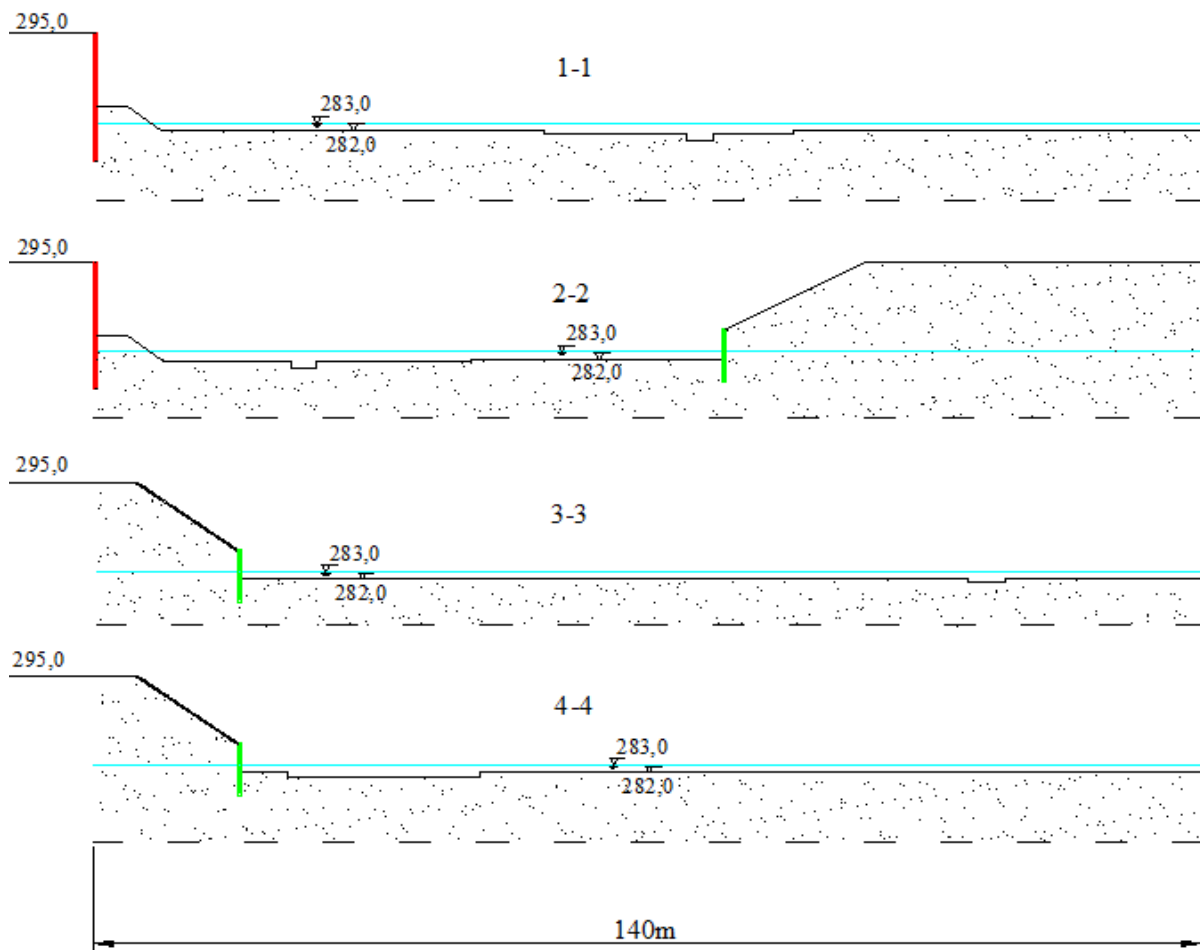




**Slika 29: Tloris gradbene jame Tobačna mesto, 1. faza.**

Rdeče odebeljene črte na sliki 29 prikazujejo diafragma, šrafirani pravokotniki pa so temelji pod stolpnici. Zelene črte označujejo jet grouting kole, ki segajo do kote 279 m.n.v. Jet grouting koli imajo 60 cm premera in so skupaj s povezovalno gredo visoki 7 m. Na robovih jame, kjer ni diafragme so narejeni vkopi, tam bo potekala povezava do sledečih faz izgradnje. Diafragma deluje tudi kot tesnilna zavesa. Diafragma je visoka 16 m, debela 60 cm in sega do kote 278 m.n.v. Prerezi so označeni s številkami od 1-1 do 4-4.

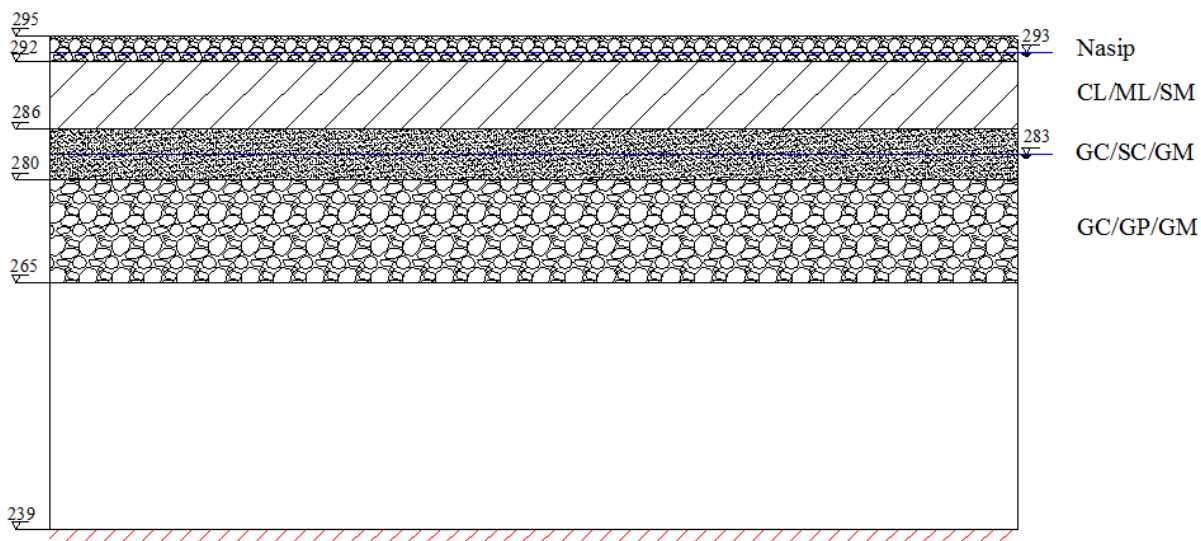
Na sliki 30 so prikazani prerezi od 1-1 do 4-4. Zemljine so vse enako šrafirane zaradi lažje preglednosti. Z rdečo barvo so šrafirane diafragme, z zeleno barvo pa jet grouting koli. Vkopi na jugozahodni strani so zaščiteni z brizganim betonom. Brizgani beton omejuje dotok iz zgornjega vodonosnika. Kota neprepustne podlage ni prikazana zaradi lažje preglednosti. Dotok iz zgornjega vodonosnika je tako popolnoma omejen z diafragma oziroma brizganim betonom, izjema je le južni del prereza 2-2. Dotok iz spodnjega vodonosnika pa je le deloma omejen z diafragma, ki sega do kote 278 m.n.v. oziroma z jet grouting koli, ki segajo do kote 279 m.n.v.



Slika 30: Profili gradbene jame od 1-1 do 4-4.

#### 4.1.2 Raziskave sestave in lastnosti tal

Gradbišče se nahaja na Ljubljanskem polju. Če bi prikazali sestavo zemljine pred odkopom, bi to lahko v grobem razdelili na štiri plasti (slika 31) (INI d.o.o., 2007).



Slika 31: Tipični profil sestave tal pred odkopom.

Na sliki 31 je prikazna sestava tal do globine 30 m. To je posledica tega, da geotehnične vrtine segajo do 30 m. Globino neprepustne podlage, ki je šrafirana z rdečo črto, se lahko oceni na podlagi izvrtanih piezometrov. Nekateri piezometri so bili izvrtani do nepropustne podlage in na ta način je bilo mogoče oceniti globino. Podtalnica se nahaja v dveh nivojih, na -2 m in na -12 m. Pri tem upoštevam, da je ničta kota 295 m.n.v. Voda se tako nahaja v zgornjem in spodnjem vodonosniku. Lastnosti posameznih slojev zemljin so podane v preglednici 3 in so povzeti iz Geotehničnega poročila (INI d.o.o., 2007).

**Preglednica 3: Karakteristične lastnosti posameznih slojev (INI d.o.o., 2007)**

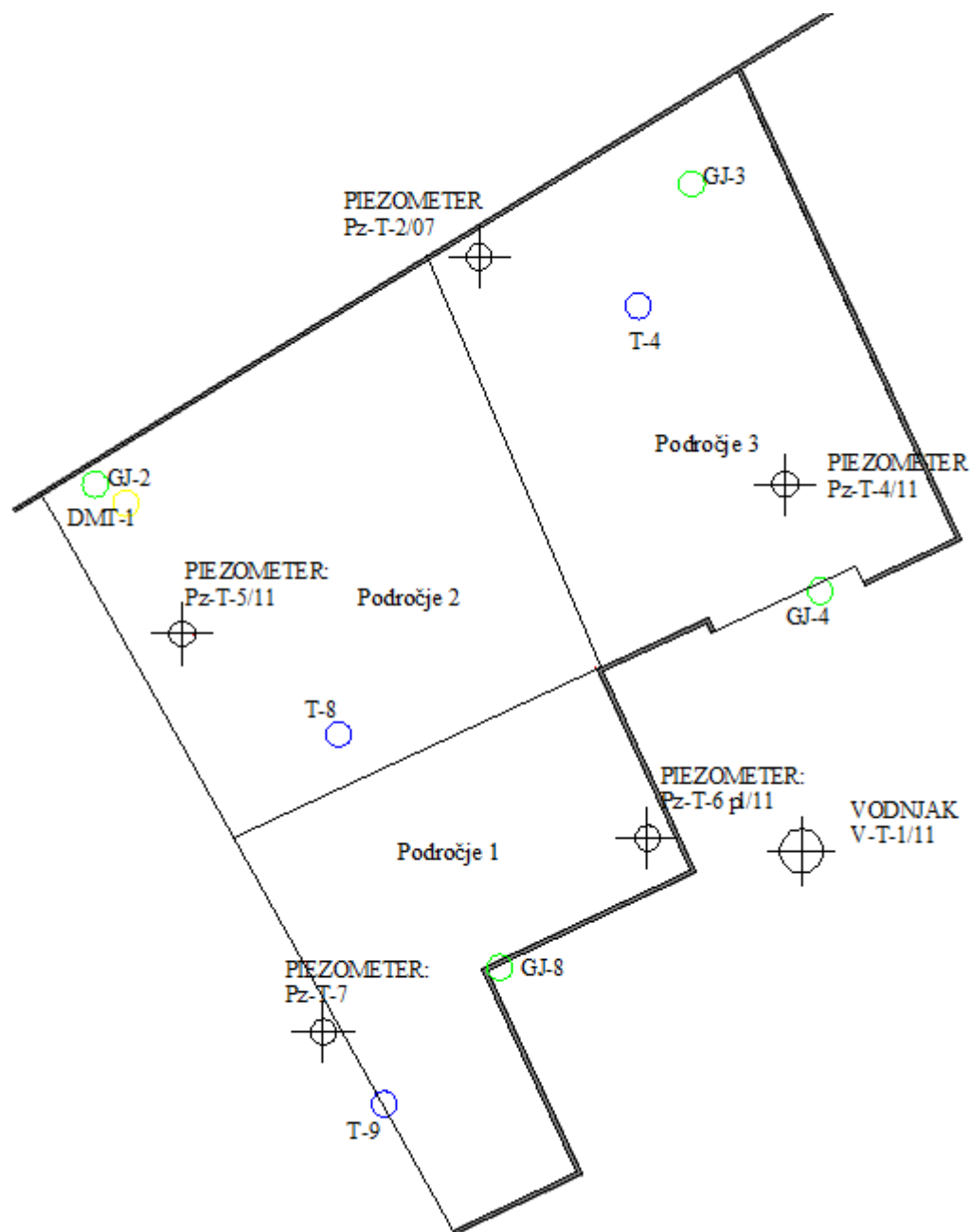
Sloj	Globina [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi$ [°]	$c$ [kPa]	$M_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Nasip	2	19	30	2	30000
CL/ML/SM	9	17	20	2	8000
GC/SC/GM	15	21	34	2	20000
GC/GP/GM	30	22	38	5	45000

Ker pa je gradbena jama precej velika, je predstavitev kot na sliki 31 mogoče neupravičena. Taka predstavitev je zgolj za okvirno oceno lastnosti zemljin. Prav tako je globina neprepustne podlage drugačna za različna področja. Lastnosti zemljin so določene na podlagi vrtin in piezometrov, ki so prikazane na sliki 32. Modri krogi so globoke vrtine (do 30m), zeleni krogi pa plitve vrtine (do 20 m). Rumeni krogi označujejo dilatometrsko preiskavo. Sam sem za potrebe izračuna razdelil gradbeno jamo na tri področja z različnimi sestavami tal. Ker pa se za temeljenje objekta odkopljejo vse glinene plasti, ostanejo na vseh treh področjih samo plasti GC/SC/GM in GC/GP/GM. Področja se tako razlikujejo samo po koeficientih prepustnosti in globini neprepustne podlage. Podatki o globinah piezometrov prikazanih na sliki 32 so prikazani v preglednici 4. Prikazane so tudi globine na katerih se nahajajo filtrni odseki. Pri vrtini Pz-T-2/07 se filtri nahajajo v dveh odsekih.

**Preglednica 4: Globine piezometrov.**

Vrtina	Globina vrtine[m]	Filtrni odsek[m], globina
Pz-T-2/07	57	31-42, 49-55
Pz-T-4/11	30	16-28
Pz-T-5/11	30	16-28
Pz-T-6p1/11	8	3-4
Pz-T-7	?	?
V-T-1/11	36,2	18,06-33,15

Za piezometer Pz-T-7 ni podatkov. Piezometer Pz-T-6p1/11 sega le v zgornji vodonosnik. Pz-T-2/07 je bil zarušen, tako na opazovanem področju ostanejo trije piezometri, na podlagi kateri lahko med črpalnim preiskusom določamo koeficient prepustnosti.



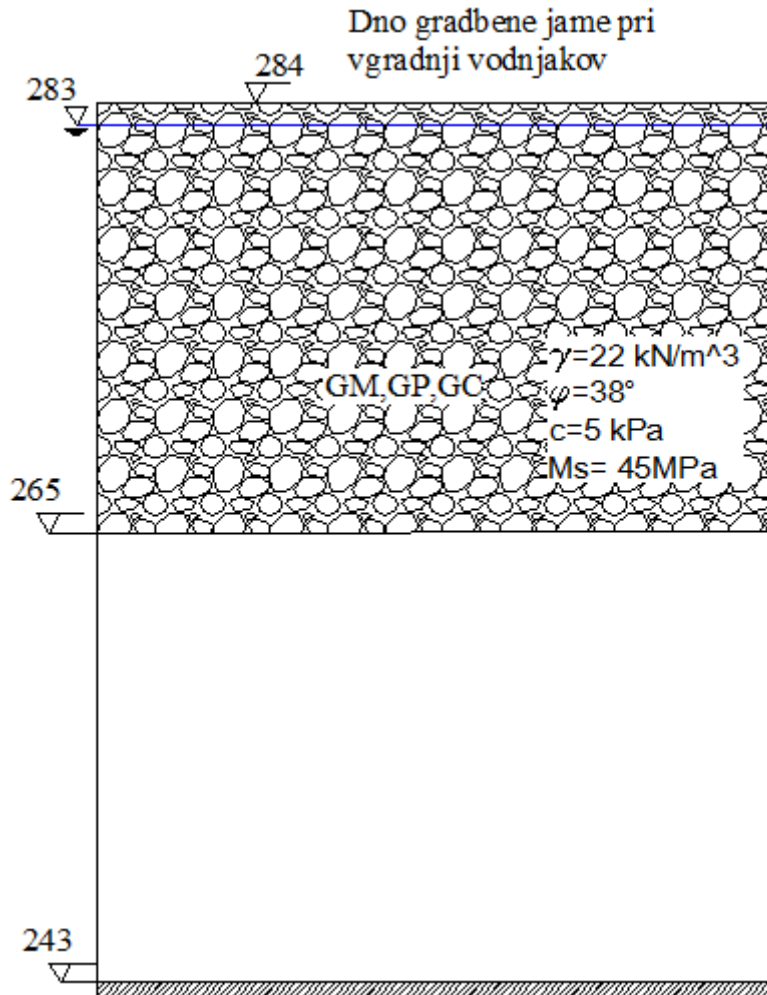
Slika 32: Situacija gradbene jame z označenimi vrtnami in piezometri in področja različnih karakteristik tal.

Za izbiro področij na sliki 32 sem se odločil, ker sem koeficient prepustnosti določal glede na rezultate v piezometrih. Ker je določanje koeficienta prepustnosti opisano v poglavju 4.3, sem v preglednici 5 podal samo različne povprečne globine vodonosnika.

Preglednica 5: Globine vodonosnika oziroma neprepustne podlage glede na nadmorsko višino 283 m.

Področje	$H[m]$
1	45
2	40
3	45

Sestava zemljine v odkopanem stanju je prikazana na sliki 33. Prikazana je sestava za področje 2. Raziskave so narejene do globine 265 m.n.v., vendar lahko iz vrtin piezometrov sklepamo, da se podobna sestava zemljin nadaljuje do dna vodonosnika.

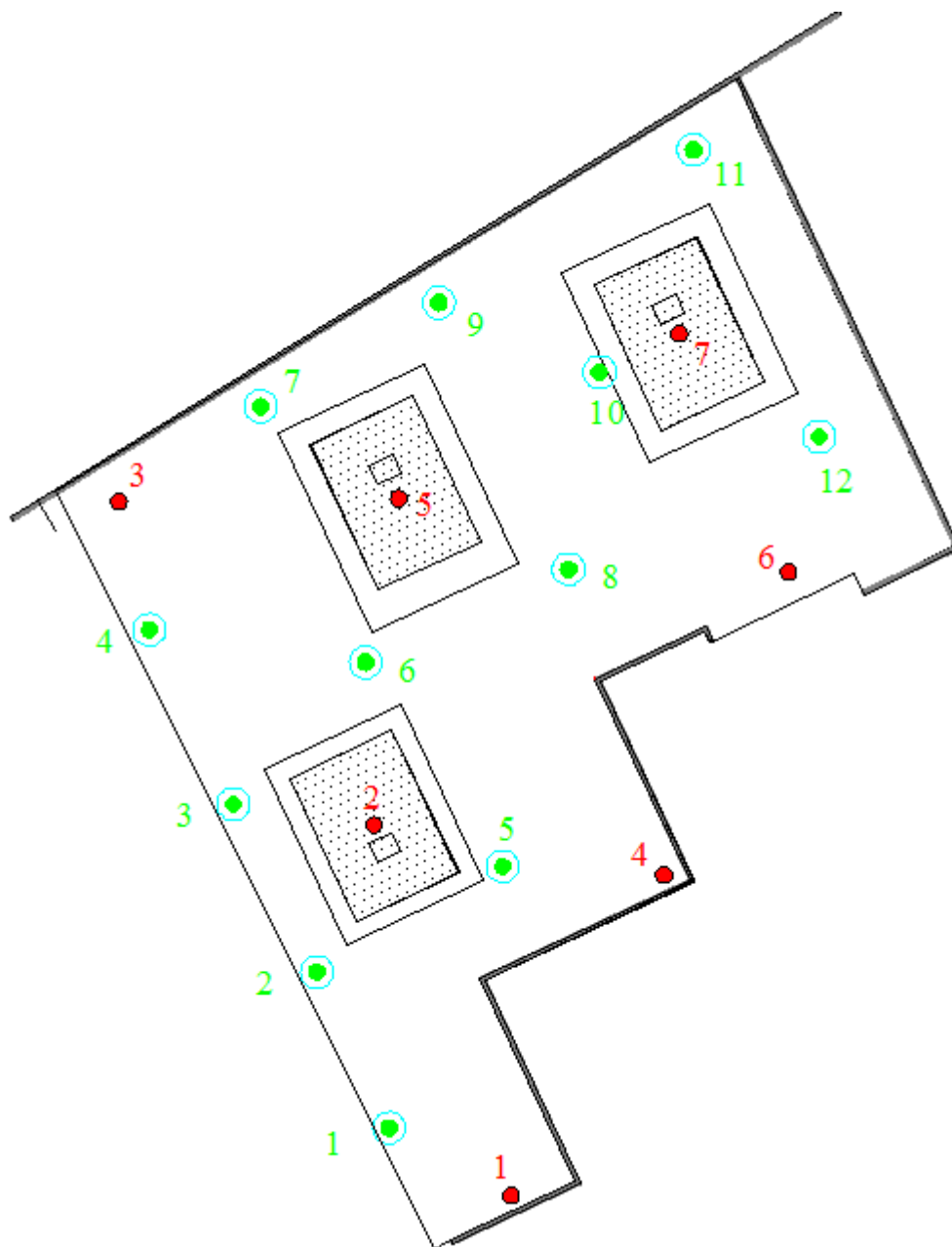


**Slika 33: Računski model za 2. področje.**

Analogne skice lahko uporabimo tudi za ostali dve področji, le da uporabimo globine vodonosnika iz preglednice 5. Koeficienti prepustnosti za različna področja pa so podani v poglavju 4.3. Model prikazan na sliki 33 je tudi osnova za vse nadaljnje računske postopke v tej nalogi.

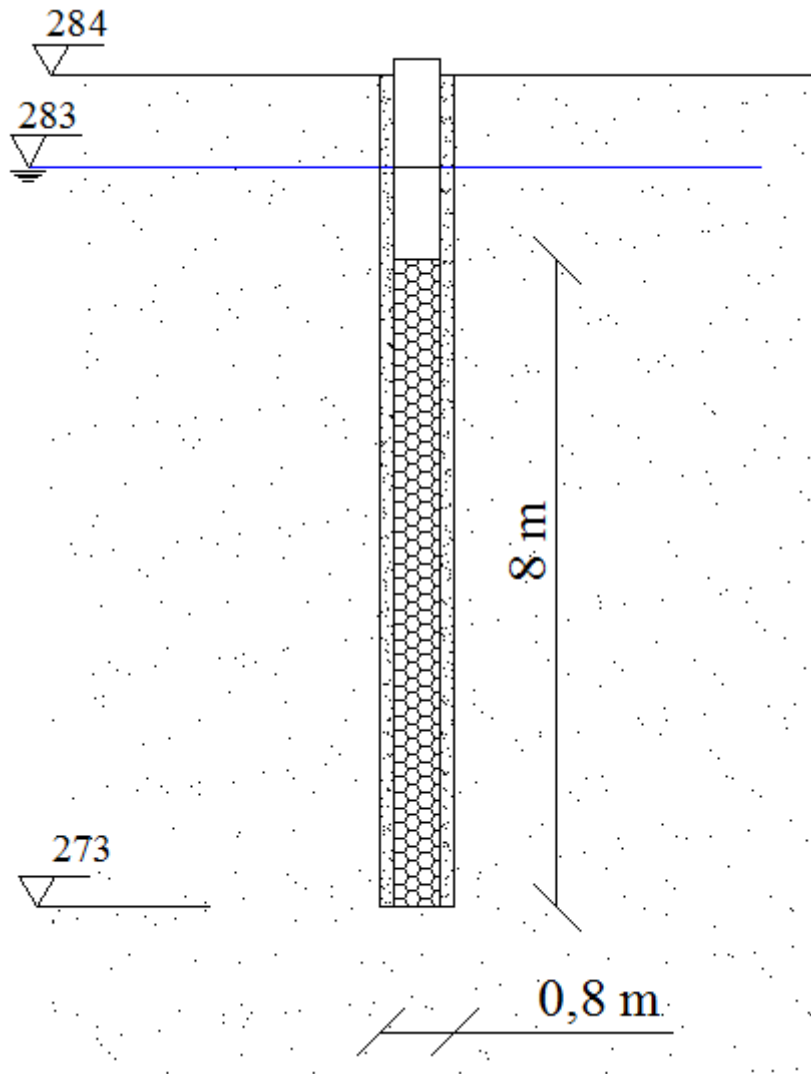
#### 4.1.3 Zasnova vodnjakov

Pri računu črpanja podtalnice z vodnjaki bom upošteval že obstoječ raspored vodnjakov in dimenzije posameznih vodnjakov. Za gradbišče je projektiranih 12 vodnjakov, njihova razporeditev pa je prikazana na sliki 34. Na isti sliki so tudi točke, ki sem jih izbral za preverjanje znižanja gladine talne vode. Točke sem izbral tam, kjer sem ocenil, da bodo znižanja najmanjša. Načeloma pa se znižanje preverja v sredini jame in v vogalih, saj so tam najmanjša znižanja. Vodnjaki so označeni s zelenimi krogi in zelenimi številkami, točke za preverjanje pa so označene z rdečimi krogi in rdečimi številkami.



**Slika 34: Pozicije vodnjakov (zeleni krogi) in točk (rdeča brava) za preverjanje znižanja.**

Račun sem izvajal tako, da sem upošteval, da vodnjaki ležijo v odprtem vodonosniku (slika 33). Vodnjaki so delno penetrirani, pokrov pa leži na koti 284 m.n.v. ali 286 m.n.v. Vodnjaki so v obeh primerih izkopani do globine 273 m.n.v. Filtri so vstavljeni na dnu izkopa, dolgi pa so 8 m. Premer filtrov je 508 mm, do 800 mm premera pa je zasut filtrski granulat frakcije 4-8 mm. Kot premer vodnjaka sem tako upošteval 800 mm, saj je prepustnost filtrskega zasutja veliko večja, kot prepustnost okolišnje zemljine. Kljub temu, da imajo nekateri vodnjaki vrh na 286 m.n.v., sem v računskem modelu narisal ustje na 284 m.n.v., saj ta podatek nima vpliva na rezultate izračuna. Profil vodnjaka je narisal na sliki 35. Vodnjaki so med seboj oddaljeni približno od 30 do 40 metrov.



Slika 35: Profil vodnjaka.

#### 4.2 Predpostavke za račun

Da bi za takšen projekt lahko uporabil analitične metode, sem moral narediti nekaj predpostavk.

Predpostavke so navedene, kot sledi:

- Vodonosnik je homogen in neskončen v horizontalni smeri. Čeprav to ne drži, pa je to potrebna predpostavka. V sloju pod dnom gradbene jame se izmenjujejo plasti zameljenega ali zaglinjenega gramozja in plasti zameljenega peska. Vmes lahko najdemo tudi plasti konglomerata.
- Vodonosnik je izotropen, tam kjer je potrebno pa sem uporabil razmerje 10 med horizontalno in vertikalno prepustnostjo.
- Tesnilna zavesa (diafragma) je zanemarjena. Ta predpostavka je na varni strani, saj tesnilna zavesa omejuje dotok vode v gradbeno jamo.
- Dotok vode iz zgornjega vodonosnika je popolnoma zatesnjen. Ta predpostavka drži, saj diafragma in brizgani beton omeujeta pretok vode.
- Vodonosnik ima prosto gladino talne vode.
- Znižanja podtalnice zaradi črpanja so majhna v primerjavi z začetno debelino vodonosnika. Ta pogoj je izpolnjen, saj je potrebno gladino znižati za največ 3 metre, vodonosnik pa je najmanj 40 m debel. Ta predpostavka je potrebna za uporabo Theisove časovno odvisne enačbe, ki velja za zaprti vodonosnik.

### 4.3 Določanje koeficienta prepustnosti

Koeficient prepustnosti sem določal na podlagi zrnastostnih krivulj in na podlagi črpalnih preizkusov. Uporabljeni metodi za analizo zrnastostnih krivulj sta metodi Hazena in USBR ter metoda Alyamani-ja in Sena. Črpalni preizkusi so bili narejeni na posameznih vrtinah in na testnem vodnjaku z opazovanjem okolišnih vrtin. Koeficient prepustnosti sem določil za tri področja prikazana na sliki 32. Nadaljnji račun je bil izveden na podlagi rezultatov dobljenih iz črpalnega preiskusa. Rezultati dobljeni iz zrnastostnih krivulj so namenjeni primerjavi z rezultati iz črpalnega preiskusa.

#### 4.3.1 Koeficient prepustnosti določen iz zrnastostnih krivulj

Podatke o zrnastostnih krivuljah sem imel v dveh vrtinah, T-4 in T-5. Čeprav vrtine T-5 ni na področju faze 1.1, sem uporabil zrnastostne krivulje obeh.

Pri metodi Hazena sem dobil za vrtino T-4 rezultate podane v preglednici 6, za vrtino T-5 pa rezultate v preglednici 7. Vidimo, da so rezultati precej nižji kot bi jih pričakovali za takšen tip zemljine. Neprimeren je predvsem koeficient enakomernosti, ki je veliko večji, kot pa je pri tej metodi dovoljeno.

**Preglednica 6: Koeficienti prepustnosti po metodi Hazena za vrtino T-4.**

	T-4		
$z$ [m]	17-18m	23-24m	26-27m
$D_{10}$ [mm]	0,011	0,018	0,004
$C_u$	776	551	1613
$k$ [m/s]	1,21E-06	3,24E-06	1,60E-07

**Preglednica 7: Koeficienti prepustnosti po metodi Hazena za vrtino T-5.**

	T-5		
$z$ [m]	18-19m	23-24m	27-28m
$D_{10}$ [mm]	0,022	0,03	0,006
$C_u$	560	376	885
$k$ [m/s]	4,84E-06	9,00E-06	3,60E-07

Metoda USBR da koeficiente prepustnosti, ki so večji kakor pri metodi Hazena. Koeficienti prepustnosti so podani v preglednicah 8 in 9. Metoda USBR da rezultate, ki bi jih bolj pričakovali za takšno zemljino, bolje se skladajo tudi z rezultati črpalnega preiskusa v poglavju 4.3.2.

**Preglednica 8: Koeficienti prepustnosti po metodi USBR za vrtino T-4.**

	T-4		
$z$ [m]	17-18m	23-24m	26-27m
$D_{20}$ [mm]	0,24	0,37	0,13
$k$ [m/s]	1,35E-04	3,66E-04	3,30E-05



**Preglednica 9: Koeficienti prepustnosti po metodi USBR za vrtino T-5.**

	T-5		
$z$ [m]	18-19m	23-24m	27-28m
$D_{20}$ [mm]	0,44	0,4	0,13
$k$ [m/s]	5,45E-04	4,38E-04	3,30E-05

Metoda Alyamanija & Sena da rezultate, ki so podani v preglednicah 10 in 11. Koeficienti prepustnosti so zelo podobni tistim dobljenim po metodi USBR.

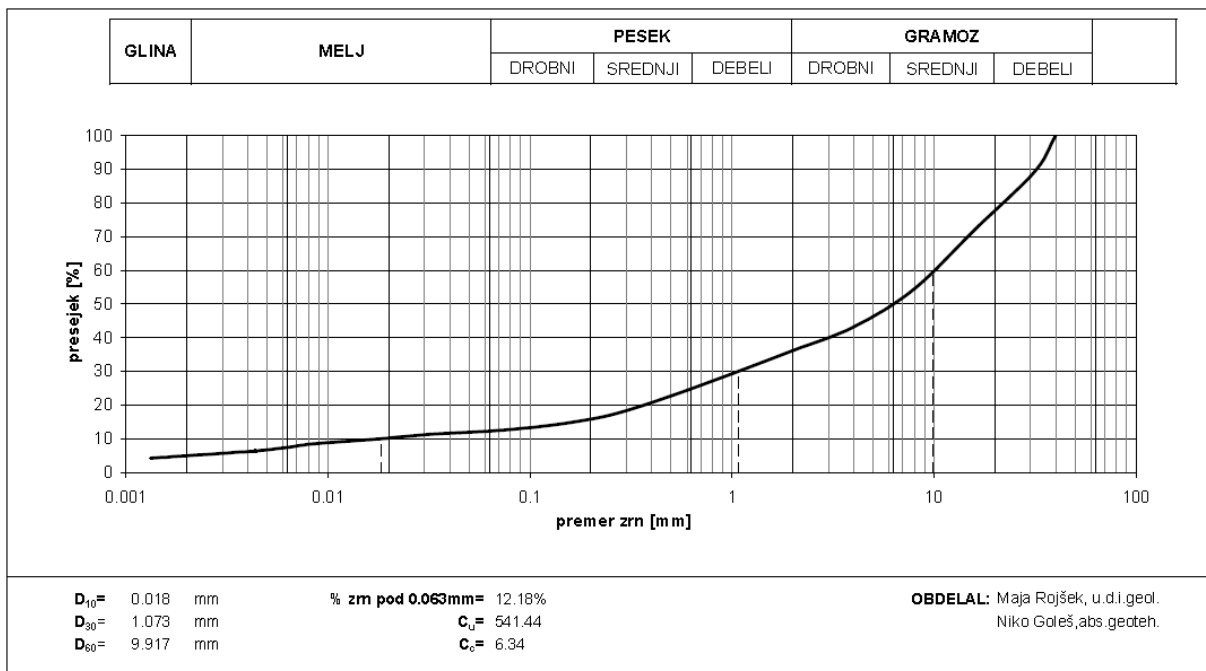
**Preglednica 10: Koeficienti prepustnosti po metodi Alyamani & Sen za vrtino T-4.**

	T-4		
$z$ [m]	17-18m	23-24m	26-27m
$D_{50}$ [mm]	5	6	4
$I_0$ [mm]	0,002	0,004	0,001
$k$ [m/s]	2,42E-04	3,55E-04	1,53E-04

**Preglednica 11: Koeficienti prepustnosti po metodi Alyamani & Sen za vrtino T-5.**

	T-5		
$z$ [m]	18-19m	23-24m	27-28m
$D_{50}$ [mm]	8	7	2,4
$I_0$ [mm]	0,007	0,007	0,0014
$k$ [m/s]	6,41E-04	4,94E-04	5,64E-05

Na sliki 36 je prikazana zrnavostna krivulja vrtine T-4 na globini 23-24 m. Sejalne analize so bile opravljene v podjetju IRGO.



Slika 36: Zrnavostna krivulja vrtine T-4 na globini 23-24m (IRGO, 2011).

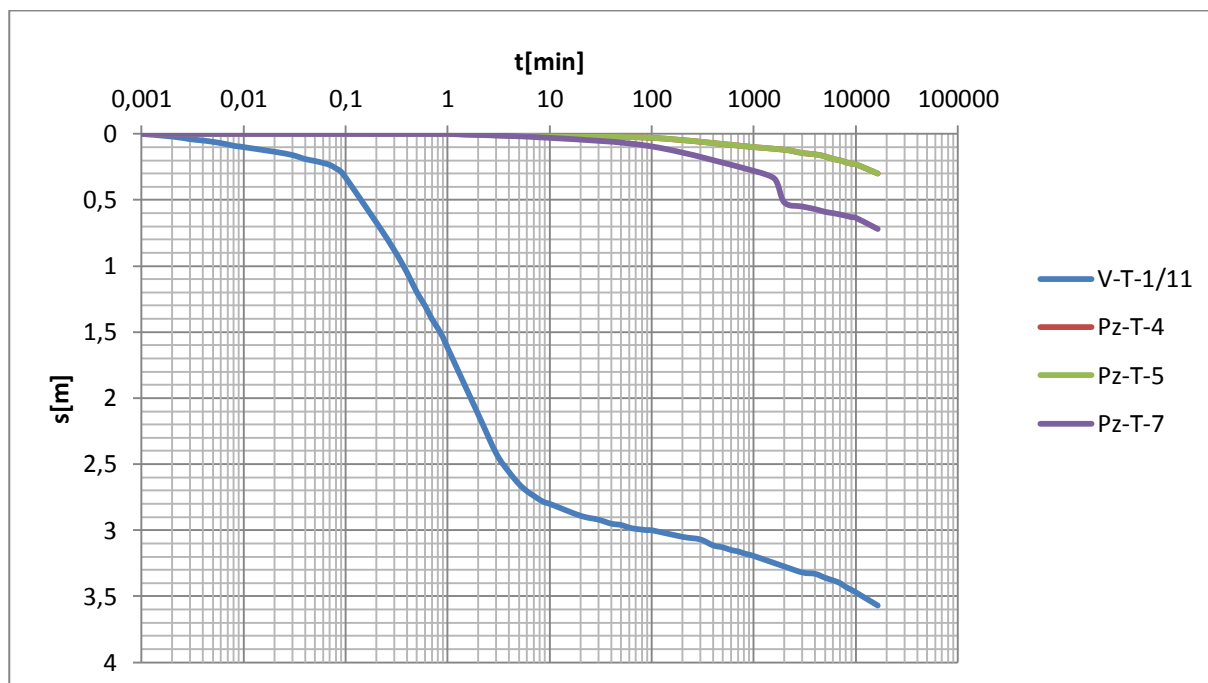
#### 4.3.2 Koeficient prepustnosti dobljen iz črpalnih preizkusov

Koeficiente prepustnosti sem določal najprej na posameznih vrtinah z Dupuitovo metodo (enačba (9)) za stacionarno stanje. Rezultati so prikazani v preglednici 12.  $l$  je omočena dolžina filterskega odseka v posamezni opazovalni vrtini. Koeficienti prepustnosti so velikostnega reda  $10^{-3}$  oz.  $10^{-4}$  m/s. Vplivni polmer je ocenjen v poglavju 4.5. V-T-1/11 je testni vodnjak in je prikazan na sliki 32.

**Preglednica 12: Koeficienti prepustnosti za posamezno vrtino po metodi Dupuita.**

Vrtina	$Q[m^3/s]$	$l[m]$	$R[m]$	$H[m]$	$r[m]$	$s[m]$	$b$	$k[m/s]$
Pz-T-4/11	0,0057	12	300	43,0	0,057	0,09	0,60	3,33E-03
Pz-T-5/11	0,0044	12	300	38,0	0,057	0,25	0,64	9,96E-04
Pz-T-7	0,0037	21	300	47,0	0,057	0,54	0,74	2,69E-04
V-T-1/11	0,0198	15	300	50	0,4	0,84	0,61	8,15E-04

Drug način črpalnega poskusa je, da črpamo iz vodnjaka in opazujemo znižanje v piezometrih. Uporabil sem račun z vodnjakom in enim piezometrom, saj so piezometri na približno enaki oddaljenosti od vodnjaka, dajo pa precej drugačna znižanja. Zato predvidevam, da rezultati z opazovanjem hkrati dveh piezometrov ne bi bili zanesljivi. Na sliki 37 je prikazan grafikon, ki prikazuje znižanja v piezometrih med črpanjem iz vodnjaka V-T-1/11. Črpanje ni doseglo stacionarnega stanja. Pri znižanjih na sliki 37 niso upoštevane izgube v vodnjaku. Efektivno znižanje v vodnjaku je podano v preglednicah 13 in 14 in je izračunano na podlagi step-testa za ta vodnjak. Vrednost sem privzel po IRGO (2011). Oblika krivulje znižanja za vodnjak V-T-1/11 po Powers et al. (2007) nakazuje na zakasnelo sproščanje vode iz uskladiščenja kar je tipično za odprte vodonosnike.



**Slika 37: Znižanja v piezometrih pri črpanju iz vodnjaka V-T-1/11 (IRGO, 2011)**

Preglednica 13 prikazuje rezultate po metodi Dupuita za stacionarno stanje s popravkom Forcheimerja za delno penetrirani vodnjak.

**Preglednica 13: Koeficienti prepustnosti po metodi Dupuita s popravkom Forcheimerja.**

Vrtina	$Q[m^3/s]$	$s[m]$	$h_l[m]$	$P[m]$	$b$	$k[m/s]$
Pz-T-4/11	0,0198	0,3	49,7	23,4	0,61	9,64E-04
Pz-T-5/11	0,0198	0,3	49,7	23,4	0,61	1,08E-03
Pz-T-7	0,0198	0,72	49,3	23,4	0,61	4,65E-03
V-T-1/11	0,0198	0,84	49,2	23,4	0,61	1,00E-03

Enačba Boreli-ja velja za stacionarno stanje in že upošteva korekcijo za delno penetrirani vodnjak. Koeficiente prepustnosti sem določil tako, kot je opisano v teoretičnem delu. Koeficienti prepustnosti so podani v preglednici 14. Metoda Borelija je primerna za račun vodnjakov, katerih dolžina filtrov presega 30% začetne zasičene debeline vodonosnika. V primeru vodnjaka V-T-1/11 je dolžina filtrov ravno na meji 30%. Vidimo, da ima rezultat za piezometer Pz-T-7 precej veliko vrednost. To je posledica majhnega prirastka gladine na razdalji 84 m. Na tej razdalji gladina naraste le za 12 cm.

**Preglednica 14: Koeficienti prepustnosti po enačbi Borelija.**

Vrtina	$Q[m^3/s]$	$U[m]$	$l[m]$	$s[m]$	$k[m/s]$
Pz-T-4/11	0,0198	26,6	22,56	0,3	2,55E-03
Pz-T-5/11	0,0198	26,6	22,56	0,3	2,84E-03
Pz-T-7	0,0198	26,6	22,56	0,72	1,23E-02
V-T-1/11	0,0198	26,6	22,56	0,84	2,09E-03

Koeficienti prepustnosti po Cooper-Jacobovi poenostavitvi Theisove enačbe so prikazani v preglednici 15. Koeficiente prepustnosti sem dobil tako, da sem numerično vstavljal različne vrednosti za  $k$  in izbral tistega, pri katerem so bila znižanja takšna, kot so jih izmerili. Metoda velja za nestacionarno stanje.

**Preglednica 15: Koeficienti prepustnosti dobljeni po metodi Cooperja in Jacoba s popravkom Butlerja.**

Vrtina	$Q[m^3/s]$	$C_{po}$	$t[s]$	$k[m/s]$
Pz-T-4/11	0,0198	0,96	984000	4,40E-04
Pz-T-5/11		1		2,40E-04
Pz-T-7		0,98		4,10E-04

Vidimo, da so koeficienti prepustnosti dobljeni s črpalnimi preiskusi velikostnega reda  $10^{-4}$  m/s,  $10^{-3}$  m/s in eden preizkus kaže na vrednost  $10^{-2}$  m/s. Kot prepustnosti za tri različna področja sem vzel vrednosti izračunane na treh piezometrih. Za prvo področje sem uporabil vrednosti iz piezometra Pz-T-7, za drugo področje Pz-T-5/11 in za tretje področje Pz-T-4/11. Uporabili sem hotel povprečni rezultat vseh štirih metod za črpalne preiskuse, vendar aritmetično povprečje ne da zadovoljivih rezultatov. Ker so koeficienti prepustnosti logaritmčne funkcije po enačbah (9), (11), (12) in (13), sem uporabil povprečje logaritmov. Povprečne vrednosti so prikazane v preglednici 16.

**Preglednica 16: Povprečni koeficienti prepustnosti, uporabljeno je logaritmčno povprečje.**

Vrtina	$k_1[m/s]$	$k_2[m/s]$	$k_3[m/s]$	$k_4[m/s]$	$k_{av}(\log)[m/s]$
Pz-T-4/11	3,33E-03	9,64E-04	4,40E-04	2,55E-03	1,38E-03
Pz-T-5/11	9,96E-04	1,08E-03	2,40E-04	2,84E-03	9,25E-04
Pz-T-7	2,69E-04	4,65E-03	4,10E-04	1,23E-02	1,59E-03
V-T-1/11	8,15E-04	1,00E-03	/	2,09E-03	1,20E-03

Na podlagi teh rezultatov sem si izbral koeficiente prepustnosti za tri področja. Za prvo področje sem izbral  $k_1=1,6 \cdot 10^{-3}$  m/s, za drugo področje  $k_2=9 \cdot 10^{-4}$  m/s in za tretje področje  $k_3=1,4 \cdot 10^{-3}$  m/s. Ker pa so pri izračunih vidna precejšnja odstopanja, sem za primerjavo uporabil še dvakrat večje vrednosti koeficientov prepustnosti. Vrednosti teh dveh variant so prikazane v preglednici 17. Prepustnost  $k$  so izračunane vrednosti koeficientov prepustnosti,  $2k$  pa dvojne vrednosti izračunanih prepustnosti.

**Preglednica 17: Koeficienti prepustnosti za različna področja.**

Področje	Prepustnost	
	$k$	$2k$
1	1,6E-04	3,2E-03
2	9E-04	1,8E-03
3	1,4E-03	2,8E-03

Ker v nadaljevanju naloge nastopa tudi količnik  $\frac{k_h}{k_v}$ , ki izraža razmerje med horizontalno in vertikalno prepustnostjo in ker sam te vrednosti nisem določal, sem povzel vrednost 10 iz hidrogeološkega poročila podjetja IRGO (IRGO, 2011). To razmerje se uporablja pri koeficientu  $C_{po}$  za račun vpliva delne penetracije in pri numeričnem modeliranju.

Koeficienti prepustnosti dobljeni iz zrnastih krivulj so glede na tiste iz črpalnega preizkusa veliko manjši. Metoda Hazena da še dosti manjše rezultate. Razlog za to bi lahko pripisali velikemu koeficientu enakomernosti. Iz zrnastih krivulj je bilo razvidno (slika 36), da je v zemljini prisotnih tudi veliko finih delcev. Premer zrn  $D_{10}$  je zato imel precej majhno vrednost in zato je metoda Hazena nakazovala na zemljino z majhno prepustnostjo. Metoda USBR pa temelji na premeru zrn  $D_{20}$ , ki so dosti večji in zato bolje predstavljajo takšen tip zemljine. Tudi metoda Alyamana in Sena do neke mere upošteva obliko zrnastne krivulje. Rezultati po tej metodi so dokaj podobni rezultatom po metodi USBR.

Pri analizi črpalnega preizkusa sem uporabil znižanje v piezometru in testnem vodnjaku. Pri tem pa je učinkovito znižanje v vodnjaku (določeno po step-testu) veliko manjše kot izmerjeno. Analiza pokaže, da že manjša sprememba učinkovitega znižanja v vodnjaku močno spremeni koeficiente prepustnosti. Tej negotovosti, o dejanskem znižanju gladine podtalne vode v vodnjaku, bi se lahko izognili z izgradnjo piezometra v bližini testnega vodnjaka. Piezometer bi lahko bil na primer 5 do 10 m oddaljen od vodnjaka. Določanje koeficienta prepustnosti bi tako lahko izvedli glede na rezultate dveh piezometrov in ne na podlagi enega piezometra in vodnjaka.

#### 4.4 Maksimalne črpalne količine

Maksimalne črpalne količine sem določil glede na maksimalno vstopno hitrost vode v vodnjak, ki znaša po Sackhardtu  $\sqrt{k}/15$ . Maksimalna črpalna sposobnost vodnjaka se izračuna po enačbi (30). Vidimo, da je maksimalni pretok odvisen od polmera in višine filtra in prepustnosti zemljine. Profil vodnjaka je prikazan na sliki 35.

Pri izračunu sem upošteval premer filtrov in filterskega granulata. Tako je premer znašal približno 800 mm. Izračuni za tri področja so prikazani v preglednici 18. Maksimalni pretoki za posamezni vodnjak so določeni tudi za dvojne vrednosti koeficientov prepustnosti (tabela 18).

**Preglednica 18: Maksimalne črpalne količine za tri različna področja.**

$Q_{max}[m^3/s]$	Prepustnost	
	Področje	$k$
1	0,054	0,076
2	0,040	0,057
3	0,050	0,071

Na podlagi maksimalnih črpalnih pretokov za posamezni vodnjak sem izračunal približno maksimalno črpalno količino za celoten sistem. To je maksimalna količina vode, ki jo celoten sistem vodnjakov lahko črpa. Rezultati so prikazani v preglednici 19. Pri tem pa ni bilo upoštevano dejansko znižanje vode v vodnjakih in posledično manjša omočena dolžina filtra.

**Preglednica 19: Skupne maksimalne črpalne količine.**

$Q_{max}[m^3/s]$	Prepustnost	
	$k$	$2k$
	0,57	0,81

#### 4.5 Vplivni polmer

Radij vpliva sem določil z enačbo Sichardta (39):

$$R_0 = 3000(H - h_w)\sqrt{k} \quad (39)$$

Iz enačbe lahko vidimo, da vplivni polmer linearno narašča z znižanjem gladine vode v oz. tik ob vodnjaku. Vplivni polmeri so podani v preglednici 20, za znižanje gladine vode v vodnjaku za 1 m.

**Preglednica 20: Vplivni polmer pri znižanju gladine vode v vodnjaku za 1 m.**

$R_0[m]$	Prepustnost	
	Področje	$k$
1	120	170
2	90	127
3	112	159

Pri odvodnjavanju gradbene jame je pričakovati, da bodo znižanja v vodnjakih približno tri metra. Pri takem znižanju sem dobil za prvo varianto naslednje radije vpliva (preglednica 21).

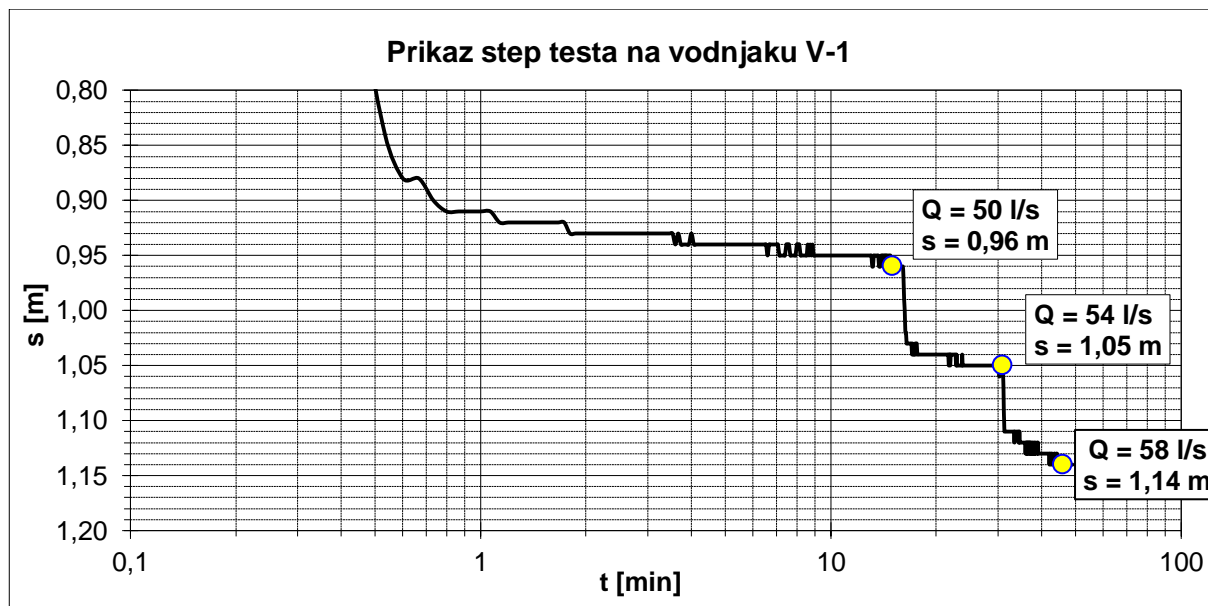
**Preglednica 21: Vplivni polmer pri znižanju gladine vode v vodnjaku za 3 m.**

$R_0[m]$	Prepustnost	
	Področje	$k$
1	360	509
2	270	382
3	337	476

V nalogi sem ponekod uporabil samo vrednost vplivnega polmera brez kakršnega koli dodatnega računanja. Ta vrednost znaša za povprečne vrednosti prepustnosti 300 m in je ocenjena kot povprečje vrednosti iz preglednice 21.

#### 4.6 Step test vodnjaka

Z analizo step testa lahko določimo učinkovitost delovanja vodnjaka. Step test je bil opravljen na testnem vodnjaku in na vodnjaku 1. Ker je testni vodnjak narejen drugače kot ostali vodnjaki, sem analiziral step test na vodnjaku 1 s pomočjo meritev, ki so jih opravili v podjetju IRGO (IRGO., 2011). Na spodnjem grafu je prikazna odvisnost znižanja gladine podzemne vode od časa. Znižanje gladine je v normalnem merilu, čas pa je v logaritmičnem merilu. Postopek je opisan v Kruseman in De Ridder (2000). Zniževanje v odvisnosti od časa je prikazano na sliki 38.



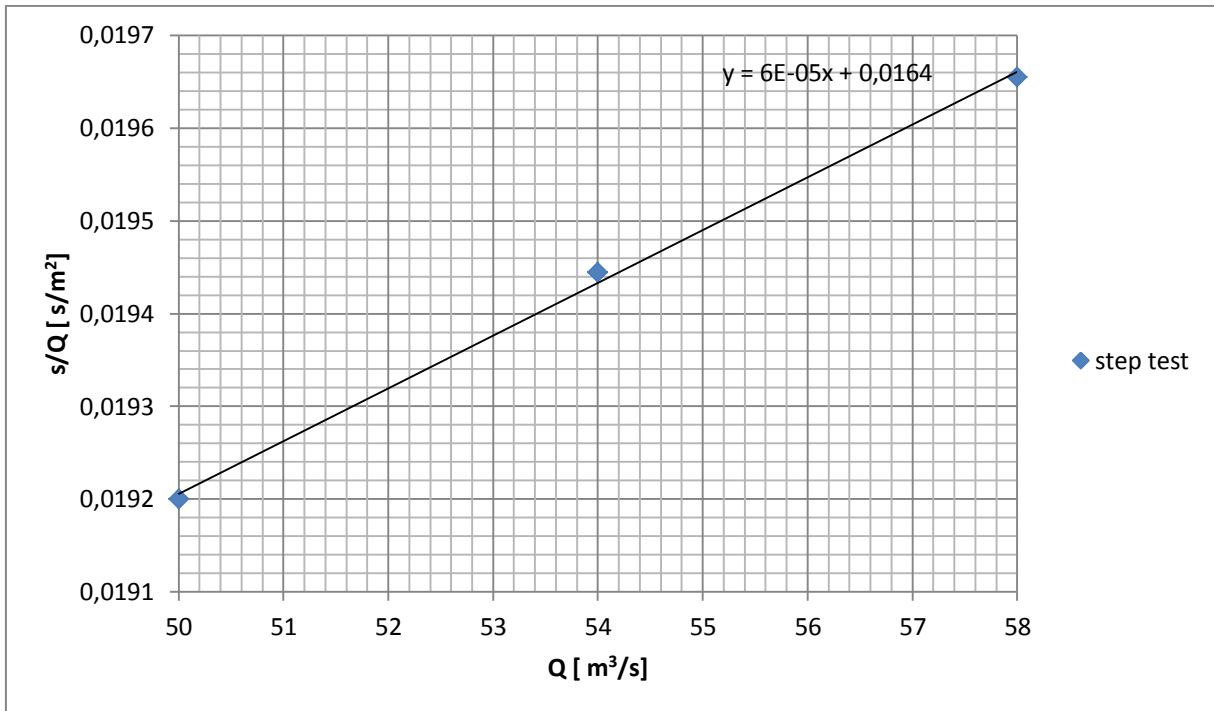
Slika 38: Grafikon znižanja talne vode v odvisnosti od časa (IRGO, 2011)

Na tem vodnjaku je bil narejen step test s tremi stopnjami črpalnih pretokov. Ker je za izračun potrebno izbrati časovni inkrement  $\Delta t$  od začetka vsake stopnje, sem izbral  $\Delta t = 15$  min. Opazovane točke so tako prikazane na sliki 38 in v preglednici 22.

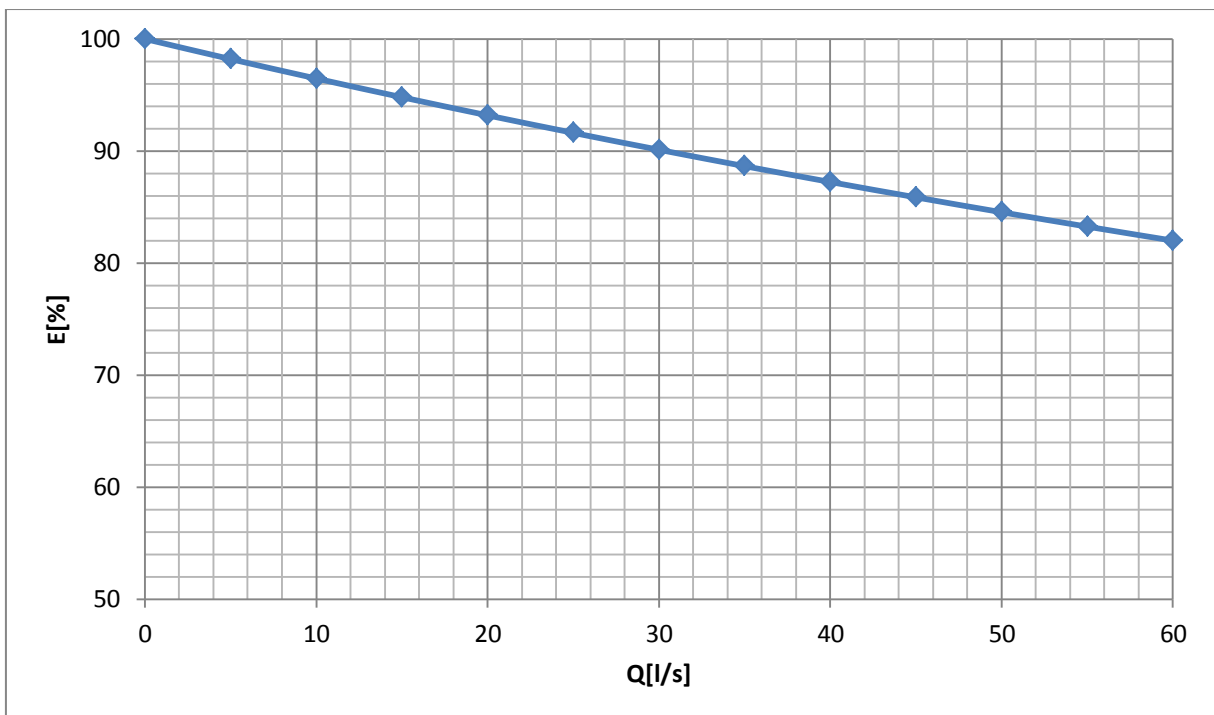
Preglednica 22: Prikaz podatkov uporabljenih za izračun.

Stopnja	Začetek stopnje [min]	$\Delta t$ [min]	$t$ (opazovano) [min]	$s$ [m]	$Q$ [l/s]
1	0	15	15	0,96	50
2	16,07	15	31	1,05	54
3	31	15	46	1,14	58

V preglednici so prikazani tudi črpalni pretoki pri vsaki stopnji. Za določitev koeficientov B in C, ki nastopajo v enačbi za učinkovitost vodnjaka (26), je narisana graf na sliki 39. Iz enačbe prikazane na grafu lahko določimo koeficienta B in C. B znaša  $0,0164 \frac{s}{m^2}$ , C pa  $6 \cdot 10^{-5} \frac{s^2}{m^5}$ . Učinkovitost vodnjaka v odvisnosti od črpalnega pretoka je prikazana na sliki 40.



Slika 39: Graf odvisnosti  $s/Q$  od pretoka  $Q$ .



Slika 40: Odvisnost učinkovitosti vodnjaka od pretoka.

Učinkovitost nam pove, kolikšni del znižanja vode v vodnjaku je dejansko prisoten v vodonosniku neposredno ob vodnjaku. Razlika je posledica izgub.

#### 4.7 Analitični račun znižanj gladine podtalnice

Račun znižanj sem izvajal z metodo superpozicije, po treh analitičnih metodah in z računalniškim programom. Metode so opisane v poglavju 2.4. Pri računu so uporabljene predpostavke iz poglavja

4.2. Znižanja sem preverjal v sedmih točkah, ki so prikazane na sliki 34. Pri računu sem imel dane razporeditev in dimenzije vodnjakov ter potrebna znižanja v točkah, izračunati sem moral pretoke v posameznih vodnjakih in nivo vode v vodnjakih. Analitični račun temelji na tem, da imajo vodnjaki na istem področju enake pretoke. Na področju 1 se nahajajo vodnjaki 1, 2 in 5, na področju 2, vodnjaki 3, 4, 6 in 7 in na področju 3 vodnjaki od 8 do 12.

Cilj odvodnjavanja gradbene jame je znižanje gladine podtalnice do te mere, da bo možno izvajanje gradbenih del. Potrebna znižanja v posameznih točkah so prikazana v preglednici 23. V drugem primeru so znižanja za 1 m večja. To stanje bi lahko nastopilo v nekem ekstremnem primeru, kjer bi potrebovali večja znižanja, ali ob močnih padavinah. Primer 2 je namenjen predvsem parametrični študiji. Od tu naprej primer 1 označuje potrebno znižanje za 1,5 (2) m, primer 2 pa potrebno znižanje za 2,5 (3) m.

**Preglednica 23: Potrebna znižanja za različna primera višine podtalnice.**

Točka	$s_{pot}[m]$	
	1. primer	2. primer
1	1,5	2,5
2	2	3
3	1,5	2,5
4	1,5	2,5
5	2	3
6	1,5	2,5
7	2	3

#### 4.7.1 Theisova metoda s popravkom za delno penetracijo

Metoda je opisana v poglavju 2.4.3, za popravek zaradi delne penetracije pa sem uporabil metodo Butlerja. Poleg ostalih predpostavk upoštevamo tudi to, da vodnjaki zanemarljivo vplivajo drug na drugega. Pri tem pa moramo potrebne pretoke povečati, tako da jih delimo s faktorjem  $J$ , ki znaša od 0,8 do 0,95. Računal sem tako, da so izračunana znižanja dosežena po 10 dneh.

Stopnja penetracije, ki je definirana v tabeli Butlerja (preglednica 1) znaša v mojem primeru 25% oziroma 22% (globina vodnjaka  $P = 10$  m, debelina vodonosnika  $H = 40$  m oz.  $H=45$  m). Ker v preglednici ni takih stopenj penetracij in ker se odsvetuje interpolacija izven meja tabele, sem računal za stopnjo penetracije 30 %. S tem pa napravljena napaka ne bo velika. Razmerje  $R_0/B$  sem ocenil na 5. Izraz  $r/P$  je za vsako točko in vodnjak drugačen, zato vrednosti  $C_{p0}$  ne bom podal. Vrednosti pa so izračunane in interpolirane.

V Cooper- Jacobovi poenostavitvi Theisove enačbe se nahaja koeficient uskladiščenja  $C_s$ . Pri računu sem uporabil povprečno vrednost koeficienta  $C_s$ , ki znaša za grobi gramoz 0,22. Primerjal pa sem tudi račun, v katerem sem upošteval minimalno vrednost, ki znaša 0,12. Vrednost sem izbral iz preglednice 24. Za vrednost koeficienta  $J$  sem izbral 0,9.



**Preglednica 24: Specifična izdatnost zemljin izražena v odstotkih (Powers et al., 2007).**

Specifična izdatnost $C_s$ [%] za različne zemljine			
Zemljina	Max	Min	Povprečno
Glina	5	0	2
Melj	19	3	8
Peščena glina	12	3	7
Fini pesek	28	10	21
Srednji pesek	32	15	26
Grobi pesek	35	20	27
Peščeni gramoz	35	20	25
Fini gramoz	35	21	25
Srednji gramoz	26	13	23
Grobi gramoz	26	12	22

Posebej sem obravnaval dva primera potrebnih znižanj. Rezultati so podani v obliki potrebnih črpalnih pretokov in znižanj v vodnjakih. Pri tem so potrebna znižanja v točkah dosežena. Rezultati za znižanje po prvem primeru in vrednost  $C_s = 0,22$  so podani v preglednici 25. Skupna količina črpanja je tako 299 l/s, povprečno znižanje v vodnjakih pa 2,41 m.

**Preglednica 25: Potrebni pretoki in znižanja v vodnjakih za 1. primer znižanj in prepustnosti k.**

Vodnjak	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_w$ [m]
1	0,031	2,28
2	0,031	2,47
3	0,018	2,25
4	0,018	2,35
5	0,031	2,92
6	0,018	2,55
7	0,018	2,36
8	0,027	2,51
9	0,027	2,38
10	0,027	2,44
11	0,027	2,14
12	0,027	2,24

Izvedel sem tudi račun za dvojne vrednosti prepustnosti in drug koeficient uskladiščenja. Vsi rezultati skupnih potrebnih količin črpanja in povprečnega znižanja v vodnjakih za prvi primer so podani v preglednici 26.

**Preglednica 26: Skupne potrebne črpalne količine in povprečna znižanja v vodnjakih za vse možnosti v prvem primeru znižanj.**

Prepustnost k		
$C_s$	$\Sigma Q [m^3/s]$	$s_{w,pov} [m]$
0,12	0,267	2,37
0,22	0,299	2,41
Prepustnost 2k		
$C_s$	$\Sigma Q [m^3/s]$	$s_{w,pov} [m]$
0,12	0,471	2,31
0,22	0,513	2,31

Večji koeficient uskladiščenja pomeni, da je potrebno črpati več vode, kar je logično, če upoštevamo pomen koeficienta. Večji koeficient prepustnosti je v tem primeru bolj neugoden. Vidimo, da so znižanja v vodnjakih pri večji prepustnosti manjša, kljub črpanju skoraj dvojne količine vode. To pomeni, da več vode doteka v vodnjak. Posledično lahko črpamo več vode, brez doseganja kritičnih gradientov.

Rezultati za drugi primer znižanj so podani v preglednici 27. V tej tabeli je prikazan račun za prepustnosti  $k$  in koeficient uskladiščenja 0,22. Potrebna znižanja se povečajo za meter. Skupna črpalna količina je 449 l/s, povprečno znižanje v vodnjakih je 3,61 m.

**Preglednica 27: Potrebni pretoki in znižanja v vodnjakih za 2. primer znižanj in prepustnosti  $k$  po Cooper-Jacobi.**

Vodnjak	$Q [m^3/s]$	$s_w [m]$
1	0,047	3,43
2	0,047	3,70
3	0,026	3,38
4	0,026	3,53
5	0,047	4,37
6	0,026	3,83
7	0,026	3,54
8	0,041	3,76
9	0,041	3,58
10	0,041	3,66
11	0,041	3,22
12	0,041	3,36

Izvedel sem tudi račun za dvojne vrednosti prepustnosti in drug koeficient uskladiščenja. Vsi rezultati skupnih potrebnih količin črpanja za drugi primer so podani v preglednici 28.

**Preglednica 28: Skupne potrebne črpalne količine za vse možnosti v drugem primeru.**

Prepustnost $k$		
$C_s$	$\Sigma Q [m^3/s]$	$s_{w,pov} [m]$
0,12	0,396	3,51
0,22	0,449	3,61
Prepustnost $2k$		
$C_s$	$\Sigma Q [m^3/s]$	$s_{w,pov} [m]$
0,12	0,706	3,47
0,22	0,781	3,51

Črpalne količine so precej večje kot pa v prvem primeru. To je seveda zaradi večjega znižanja podzemne vode. Tudi čas vpliva na črpalne količine. Največ vode moramo črpati na začetku, s časom pa se potrebne črpalne količine zmanjšajo. Iz preglednic tega sicer ni razvidno, vendar so koeficienti  $C_{p0}$  zelo blizu ena. To pomeni, da je vpliv delne penetracije skoraj zanemarljiv. Največji vpliv delne penetracije je ob vodnjaku samem. Vpliv se poveča z večjim razmerjem  $\frac{k_h}{k_v}$ . Z nižjo prepustnostjo v vertikalni smeri dobimo majhno izboljšanje pogojev in dosti manjše črpalne pretoke. Največji pa je vpliv koeficienta prepustnosti v horizontalni smeri, z manjšimi vrednostimi prepustnosti so manjše tudi potrebne črpalne količine.

V primeru izračuna pretokov po tej metodi brez upoštevanja delne penetriranosti, dobimo skoraj enake vrednosti. Odstopanja potrebnih pretokov so minimalna. Manjša razlika je vidna le v znižanjih vode v vodnjakih. To je posledica tega, da se vpliv delne penetriranosti po metodi Butlerja skoraj ne čuti na oddaljenostih, ki so na gradbišču Tobačne mesta. To je posledica tudi tega, da je vplivni polmer pri tej metodi vezan na čas in ne na znižanje v vodnjakih.

#### 4.7.2 Metoda Forcheimer-ja s popravkom za delno penetracijo

Ta metoda je iteracijske narave in velja za stacionarno stanje. Pri računu poznamo potrebna znižanja v točkah, ki jih preverjamo, višino vode v vodnjaku pa ocenimo. Višino vode v vodnjaku nato izračunamo in ko je približek dovolj dober, lahko z iteracijo nehamo. Pretok je računat z Dupuit-ovo enačbo za odprti vodonosnik, pomnoženo s faktorjem, ki upošteva delno penetriranost vodnjakov. Faktor sem določil po enačbi Forcheimerja (38). Pri računu je bilo ponovno potrebno zadostiti dvema primeroma znižanj. Znižanju gladine vode za 1,5 (2) m in 2,5 (3) m. Pri računu sem upošteval konstantno debelino vodonosnika 45 m. Vplivni polmer pa sem določil kot povprečje naravnih logaritmov vplivnih polmerov vseh vodnjakov. Ker sem izbral tri področja z različnimi koeficienti prepustnosti, je povprečni radij vpliva določen z enačbo 40.

$$\ln R_{av} = [3 \ln R_1 + 4 \ln R_2 + 5 \ln R_3]/12 \quad (40)$$

Potrebne črpalne količine v vodnjakih in znižanja za prvi primer in prepustnosti  $k$  so prikazane v preglednici 29. Skupno bi tako črpali 237 l/s, povprečno znižanje pa znaša 2,5 m. Pri prepustnostih  $2k$  prvega primera moramo skupno črpati 386 l/s, povprečno znižanje v vodnjakih pa je 2,3 m.

**Preglednica 29: Potrebne črpalne količine in znižanja v vodnjakih po metodi Forcheimerja za prvi primer znižanj in povprečne prepustnosti  $k$ .**

Vodnjak	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_w$ [m]
1	0,025	2,2
2	0,025	2,5
3	0,014	2,7
4	0,014	2,6
5	0,025	2,6
6	0,014	2,9
7	0,014	2,6
8	0,021	2,8
9	0,021	2,6
10	0,021	2,7
11	0,021	2,2
12	0,021	2,3

Potrebne črpalne količine in znižanja v vodnjakih za drugi primer in prepustnosti  $k$  so podane v preglednici 30. Skupna potrebna količina znaša 260 l/s, povprečno znižanje v vodnjakih pa je 3,8 m. Vidimo, da je znižanje v vodnjakih dosti večje kot v prvem primeru. Skupna potrebna črpalna količina za prepustnosti  $2k$  in drugi primer znaša 441 l/s, povprečno znižanje v vodnjakih pa 3,6 m.

**Preglednica 30: Potrebne črpalne količine in znižanja v vodnjakih po metodi Forcheimerja za drugi primer in prepustnosti  $k$ .**

Vodnjak	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_w$ [m]
1	0,027	3,3
2	0,027	3,7
3	0,015	3,9
4	0,015	3,8
5	0,027	3,9
6	0,015	4,2
7	0,015	3,8
8	0,024	4,0
9	0,024	3,8
10	0,024	3,9
11	0,024	3,3
12	0,024	3,5

Če bi računali potrebne pretoke brez upoštevanja vpliva delne penetracije, bi bili potrebni pretoki približno 2 krat večji. Za prvi primer in prepustnosti  $k$  moramo črpati kar 485 l/s, za drugi primer pri prepustnosti  $k$  pa 575 l/s.

#### 4.7.3 Metoda Borelija

Ta metoda je podobna kot prejšnja, le da namesto Dupuitove enačbe uporabimo Borelijevo v Forcheimerjevi enačbi. To pomeni, da tudi tu uporabimo seštevek znižanj zaradi vseh vodnjakov, le da upoštevamo še delno penetracijo po metodi Borelija (enačba 41).

$$Q = \pi k \frac{((H-U)^2 - l^2)}{\ln R - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln r} \left[ 1 + \left( 0,30 + \frac{10r_0}{H} \right) \sin 1,8 \left( 1 - \frac{H-U}{H} \right) \right] \quad (41)$$

Uporabljen  $R$  je določen po enačbi (40). Znižanja sem tudi tu preverjal v vseh sedmih točkah in v vseh vodnjakih.

Potrebni pretoki in znižanja v vodnjakih za prvi primer in prepustnosti  $k$  so podani v preglednici 31. Skupno bi tako morali črpati 185 l/s, povprečno znižanje v vodnjakih pa je 2,6 m. Za prepustnosti  $2k$  bi morali skupno črpati 298 l/s, povprečno znižanje v vodnjakih pa je 2,4 m.

**Preglednica 31: Potrebni črpalni pretoki in znižanja v vodnjakih pri metodi Borelija za prvi primer in prepustnosti  $k$ .**

Vodnjak	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_w$ [m]
1	0,019	2,2
2	0,019	2,6
3	0,011	2,7
4	0,011	2,6
5	0,019	2,7
6	0,011	2,9
7	0,011	2,6
8	0,017	2,8
9	0,017	2,6
10	0,017	2,7
11	0,017	2,2
12	0,017	2,3

Potrebne črpalne količine in znižanja v vodnjakih za drugi primer potrebnih znižanj in prepustnosti  $k$  so podani v preglednici 32. Skupno bi tako morali črpati 217 l/s, povprečno znižanje v vodnjakih pa je 3,9 m. Za drugi primer in prepustnosti  $2k$  moramo skupno črpati 364 l/s, povprečno znižanje v vodnjakih pa znaša 3,7 m.

**Preglednica 32: Potrebni črpalni pretoki in znižanja v vodnjakih po metodi Borelija za drugi primer in prepustnosti  $k$ .**

Vodnjak	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_w$ [m]
1	0,022	3,4
2	0,022	3,9
3	0,013	4,1
4	0,013	4,0
5	0,022	4,0
6	0,013	4,4
7	0,013	4,0
8	0,02	4,3
9	0,02	4,0
10	0,02	4,1
11	0,02	3,4
12	0,02	3,6

V primeru da je vodnjak polno penetriran, preide enačba Borelija v enačbo Dupuita. Če torej za to metodo računamo brez vpliva delne penetriranosti, dobimo enake rezultate kot za metodo Forcheimerja brez delne penetriranosti.

#### 4.7.4 Uporaba koeficientov prepustnosti dobljenih po posamezni metodi

Tri uporabljene računske metode dajo v prejšnjih podglavljih tri različne potrebne črpalne količine. Na prvi pogled bi rekli, da metoda Cooperja in Jacoba da največje rezultate, metodi Forcheimerja in Borelija pa dosti manjše količine. Vendar, če primerjamo rezultate v tabelah 13, 14 in 15, vidimo, da prav metoda Cooperja in Jacoba da najmanjše vrednosti koeficientov prepustnosti. Dobljene potrebne količine po tej metodi so večje le zaradi uporabe koeficientov prepustnosti, ki so dobljeni kot povprečje različnih metod. V nadaljevanju so podani rezultati v primeru, da za vsako metodo računamo samo s koeficienti prepustnosti dobljenimi samo po tisti metodi. Koeficienti prepustnosti so podani v preglednici 33. Dvojne vrednosti koeficientov prepustnosti so podane v preglednici 34.

**Preglednica 33: Koeficienti prepustnosti dobljeni po posamezni metodi.**

$k$ [m/s]	Metoda		
Področje	Coop.-Jac.	Forch.	Boreli
1	4,10E-04	4,65E-03	1,23E-02
2	2,40E-04	1,08E-03	2,84E-03
3	4,40E-04	9,64E-04	2,55E-03

**Preglednica 34: Dvojni koeficienti prepustnosti dobljeni po posamezni metodi.**

$2k$ [m/s]	Metoda		
Področje	Coop.-Jac.	Forch.	Boreli
1	8,20E-04	9,30E-03	2,46E-02
2	4,80E-04	2,16E-03	5,68E-03
3	8,80E-04	1,93E-03	5,10E-03

Pri računu po metodi Cooper-Jacob sem torej uporabil prepustnosti dobljene po tej isti metodi, za primerjavo pa še dvojne vrednosti teh prepustnosti. Pri računu sem ponovno upošteval dva primera znižanj. Prepustnost  $k$  in prepustnost  $2k$  pa označujejo prepustnosti dobljene po tisti metodi za katero sem računal oziroma dvojne vrednosti teh prepustnosti. Uporabljeni koeficient uskladičenja ima vrednost 0,22. Rezultati za oba primera znižanj in različne prepustnosti so podani v preglednici 35.

**Preglednica 35: Potrebne skupne črpalne količine po metodi Cooperja in Jacoba.**

Cooper-Jacob		
Prepustnost $k$		
Primer	$\Sigma Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_{w,pov}$ [m]
1	0,118	2,86
2	0,177	4,29
Prepustnost $2k$		
Primer	$\Sigma Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_{w,pov}$ [m]
1	0,203	2,68
2	0,304	4,01

Vidimo, da so pretoki dosti manjši, kot v primeru, ko sem uporabil povprečne vrednosti koeficientov prepustnosti v podpoglavju 4.7.1.

Rezultati za metodo Forcheimerja so podani v preglednici 36. Pri računu so bile uporabljene prepustnosti dobljene po Forcheimerju iz preglednic 33 in 34. Rezultati so dokaj podobni rezultatom iz podpoglavja 4.7.2.

**Preglednica 36: Potrebne skupne črpalne količine po metodi Forcheimerja.**

<b>Forcheimer</b>		
Prepustnost $k$		
Primer	$\Sigma Q[\text{m}^3/\text{s}]$	$s_{w,pov}[\text{m}]$
1	0,26	2,5
2	0,299	3,7
Prepustnost $2k$		
Primer	$\Sigma Q[\text{m}^3/\text{s}]$	$s_{w,pov}[\text{m}]$
1	0,437	2,3
2	0,51	3,5

Rezultati za metodo Borelija so podani v tabeli 37. Pri računu so bile uporabljene prepustnosti dobljene po Boreliju iz preglednic 33 in 34. Vidimo, da so prepustnosti po Boreliju večje kot prepustnosti po Forcheimerju in Cooper-Jacobu.

**Preglednica 37: Potrebne skupne črpalne količine po metodi Borelija.**

<b>Boreli</b>		
Prepustnost $k$		
Primer	$\Sigma Q[\text{m}^3/\text{s}]$	$s_{w,pov}[\text{m}]$
1	0,424	2,3
2	0,514	3,6
Prepustnost $2k$		
Primer	$\Sigma Q[\text{m}^3/\text{s}]$	$s_{w,pov}[\text{m}]$
1	0,722	2,3
2	0,898	3,4

Pretoki vodnjakov na istem področju so enaki. Razmerje pretokov na različnih področjih pa je enako razmerju prepustnosti zemljin na teh področjih.

#### 4.7.5 Povzetek rezultatov izračuna

V tem podpoglavju so podani vsi rezultati dobljeni z analitičnim izračunom. V preglednici 38 so podani rezultati iz podpoglavij od 4.7.1 do 4.7.3. To so rezultati, ki so dobljeni na podlagi povprečnega koeficienta prepustnosti. Pri metodi Cooperja in Jacoba so podani samo rezultati, ki upoštevajo koeficient uskladičenja  $C_s=0,22$ . Primer 1 in 2 ponovno označujeta znižanja za 1,5 (2) m oz. 2,5 (3) m.

**Preglednica 38: Skupne potrebne črpalne količine za posamezne metode ob upoštevanju povprečnih koeficientov prepustnosti.**

$\Sigma Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Prepustnost $k$		Prepustnost $2k$	
	Primer znižanj		Primer znižanj	
	1	2	1	2
Coop.-Jac.	0,299	0,449	0,513	0,781
Forcheimer	0,237	0,26	0,386	0,441
Boreli	0,185	0,217	0,298	0,364

V preglednici 39 pa so prikazni rezultati ob upoštevanju koeficientov prepustnosti dobljenih po posamezni metodi. Rezultati so prikazani za ob primera potrebnih znižanj.

**Preglednica 39: Skupne potrebne črpalne količine za posamezne metode ob upoštevanju koeficientov prepustnosti, ki pripadajo posamezni metodi.**

$\Sigma Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Prepustnost $k$		Prepustnost $2k$	
	Primer znižanj		Primer znižanj	
	1	2	1	2
Coop.-Jac.	0,118	0,177	0,203	0,304
Forcheimer	0,26	0,299	0,437	0,51
Boreli	0,424	0,514	0,722	0,898

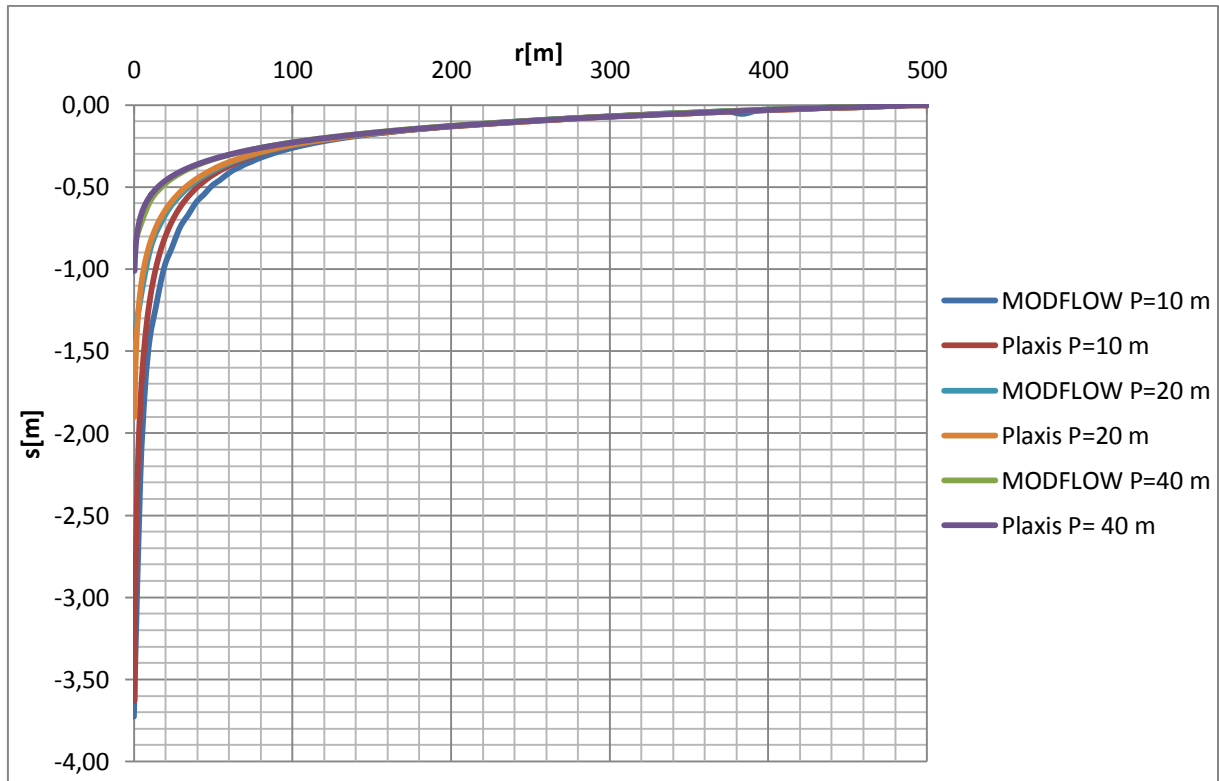
Če računamo z enakim vhodnim podatkom za prepustnost, da največje potrebne črpalne količine metoda Cooperja in Jacoba, sledi metoda Forcheimerja in na koncu metoda Borelija. Če podatek o prepustnosti dobimo iz črpalnega preizkusa in ga interpretiramo po enaki metodi, kot jo kasneje uporabimo za izračun potrebne količine črpanja, je zaporedje ravno obratno. Največjo potrebno črpalno količino dobimo pri metodi Borelija, sledi metoda Forcheimerja in na koncu metoda Cooperja in Jacoba. To je seveda posledica načina izbire koeficienta prepustnosti.

**4.8 Numerični izračun**

Numerični izračun sem izvedel v programu Processing MODFLOW. Za ta program sem se odločil, ker je za obravnavanje takšnega problema potrebno 3D okolje. MODFLOW je 3D program, ki računa na podlagi metode končnih diferenc. Program je bil razvit s strani USGS (United States Geological Survey) in je eden najbolj uporabljenih in testiranih programov za simuliranje podzemnega toka. MODFLOW in mnogi povezani programi so javno dostopni na strani [www.water.usgs.gov/software](http://www.water.usgs.gov/software) (Powers et al., 2007).

Da bi ocenil podobnost med rezultati Plaxisa in MODFLOW-a, sem nekatere rezultate iz 3. poglavja primerjal z rezultati iz programa MODFLOW. V obeh primerih so bili uporabljeni isti podatki. Primerjal sem znižanja v odvisnosti od polmera  $r$  za tri različne stopnje penetracije. Rezultati so prikazani na sliki 41. Razvidno je, da se znižanja pri globini vodnjaka 20 in 40 m ujema. Pri globini vodnjaka 10 m, pa pride do rahlega odstopanja. To odstopanje je maksimalno 20%. Do odstopanja med rezultati pride na razdalji od 20 do 100 m, drugje se rezultati ujema.





Slika 41: Primerjava znižanj pri uporabi različnih programov.

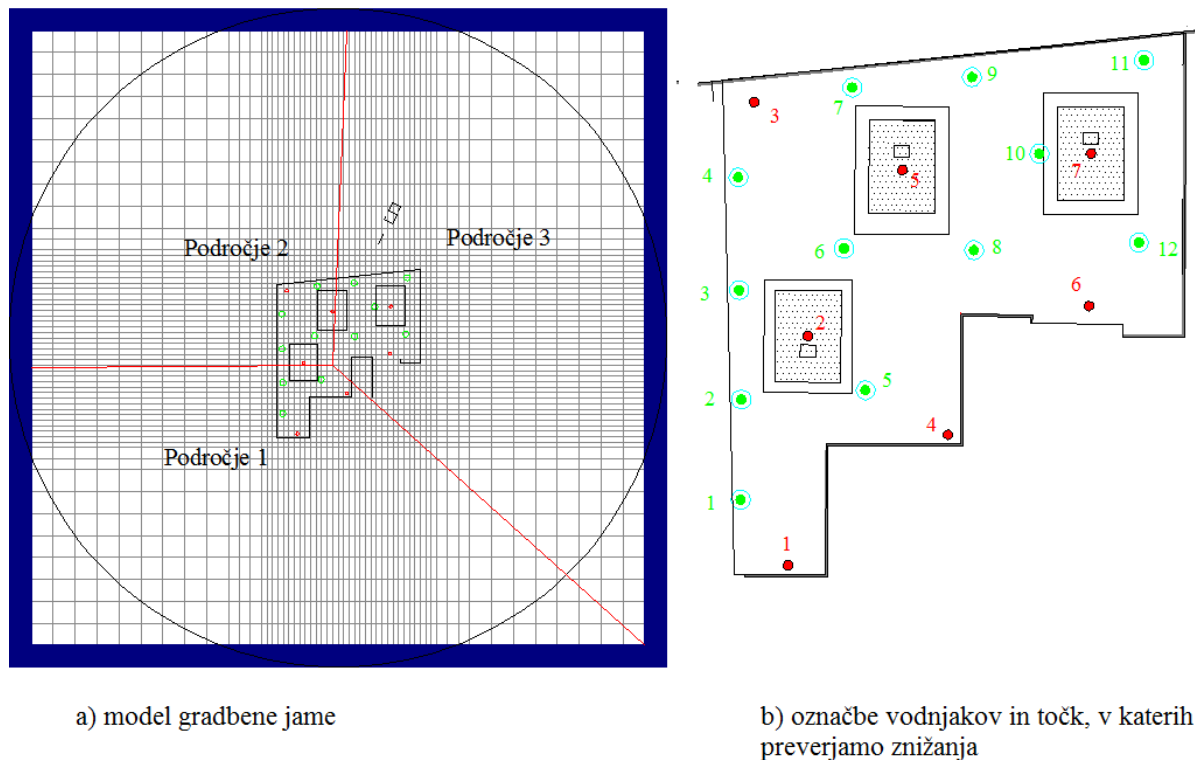
Računski model sem izdelal dvakrat. Prvič sem računal brez upoštevanja tesnilne zavese, drugič pa sem ta vpliv upošteval. Ostale parametre sem upošteval tako kot pri analitičnem računu. Dotoka iz zgornjega vodonosnika tudi tu nisem upošteval, ker je dotok vode večinoma zatesnjen. Rezultati so bili dobljeni v stacionarnem stanju.

#### 4.8.1 Računski model brez upoštevanja tesnilne zavese

Na sliki 42a je prikazan model gradbene jame. Zeleni krogi označujejo mesta kjer so vodnjaki, rdeči krogi pa mesta kjer je treba preveriti znižanja gladine. Rdeči pravokotniki so območja temeljev za stolpnice. Na zemljevidu je prikazan tudi sever, saj sem zaradi lažjega modeliranja jamo obrnil. Modro področje prikazuje rob vplivnega področja, kjer se gladina talne vode ne spreminja več. Včrtani krog predstavlja vplivno področje in ima polmer 300 m. Na sliki 42b so prikazane tudi označbe za vodnjake in točke v katerih preverjamo znižanja. Zeleni krogi so vodnjaki, rdeči krogi pa točke, v katerih preverjamo znižanja.

Področje, v katerem je prisoten tok vode, je določeno z velikostjo modela. Pri zasnovi konceptualnega modela moramo to področje raztegniti vertikalno in horizontalno do te mere, da lahko fizikalne karakteristike toka predstavimo z robnimi pogoji. Nato je potrebno predvideti vpliv teh robnih pogojev na gladino talne vode in tokove. Glede na to se moramo odločiti za najbolj primeren matematični opis teh robnih pogojev (Reilly T. E., 2001).

Sam sem področje modela zasnoval na velikosti vplivnega polmera določenega po enačbi Sichardta (14). Čeprav je vplivni polmer po tej enačbi odvisen tudi od znižanj, pa ta vpliv na pretoke zaradi logaritmičnega razmerja ni velik. Robni pogoji v mojem primeru so celice, kjer je gladina talne vode konstantna in dobavlja neomejeno količino vode v model.



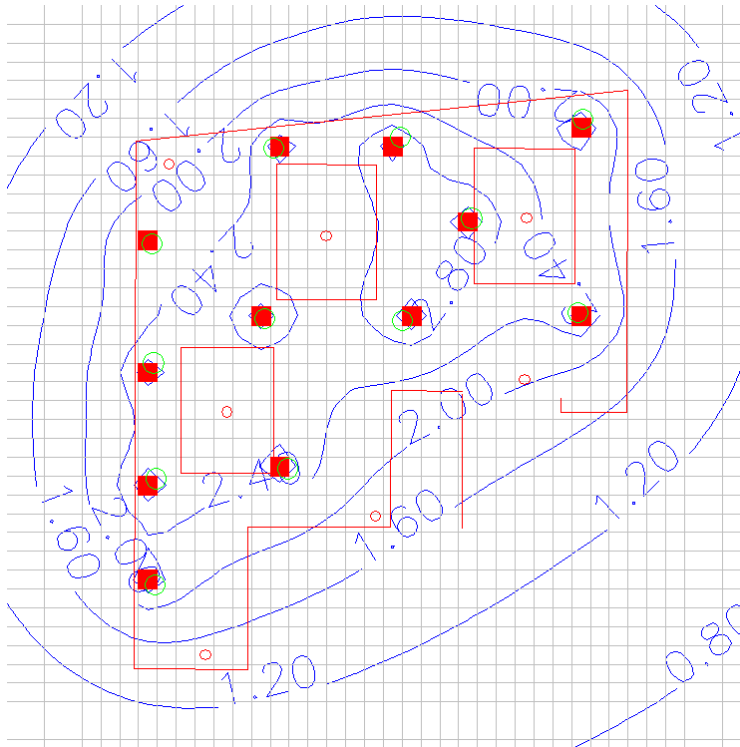
a) model gradbene jame

b) označbe vodnjakov in točk, v katerih preverjamo znižanja

**Slika 42: Model gradbene jame brez diafragme (a) in označbe vodnjakov (zelena barva) in točk (rdeča barva) (b).**

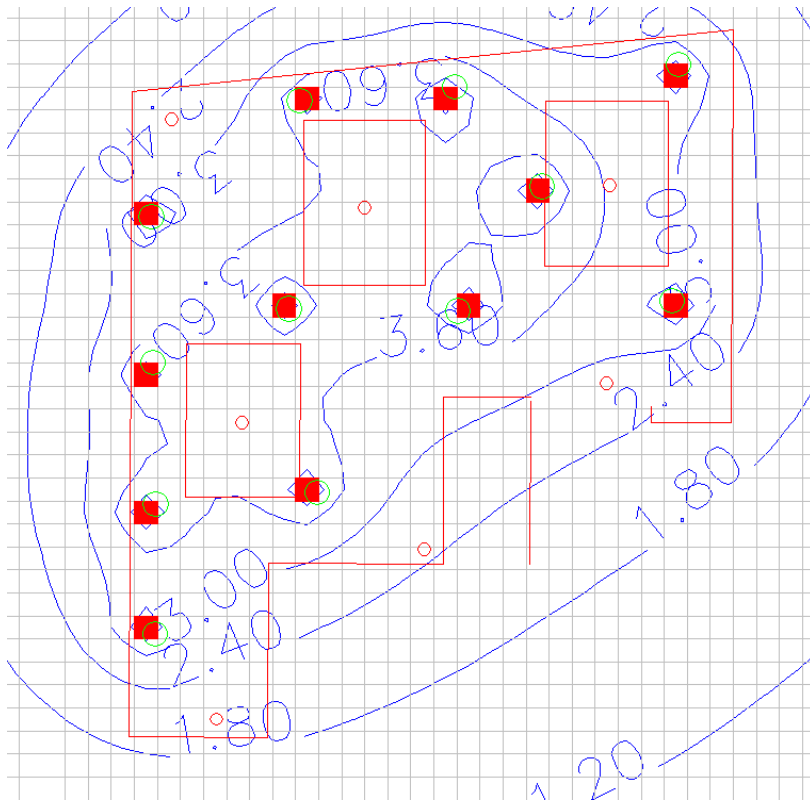
V numeričnem modelu sem najprej uporabil povprečne vrednosti koeficientov prepustnosti iz tabele 16. Na področju 1 je prepustnost  $1,6 \cdot 10^{-3}$  m/s, na področju 2 je prepustnost  $9,2 \cdot 10^{-4}$  m/s, na področju 3 pa  $1,4 \cdot 10^{-3}$  m/s. Prepustnost v vertikalni smeri znaša  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s. Z vstavljanjem različnih pretokov sem določil najmanjšo skupno potrebno količino črpanja, ki bo zadoščala za doseganje potrebnih znižanj. Vodnjaki na istih področjih črpajo iste količine vode. Razmerja pretokov vodnjakov na različnih področjih so enaka razmerjem prepustnosti teh področij.

Za doseg potrebnih znižanj prvega primera (1,5 oz. 2 m) v vseh točkah je potrebno črpati 260 l/s skupno iz vseh vodnjakov. Povprečno znižanje v vodnjakih je pri tem 3,3 m. Problem se pojavi predvsem v doseganju znižanj v točki 1. Znižanja v ostalih točkah bi lahko dosegli tudi z manjšimi pretoki. Plastnice znižanj so prikazane na sliki 43.



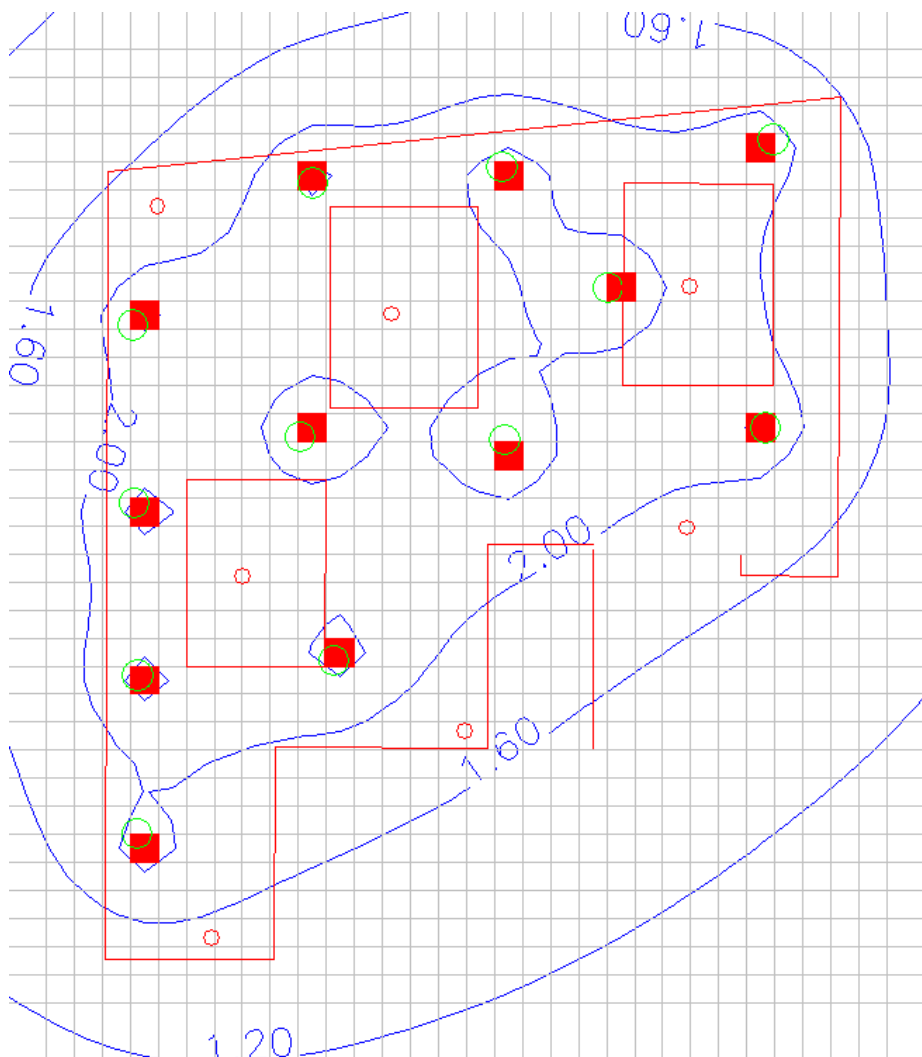
Slika 43: Znižanja v gradbeni jami pri črpanju 260 l/s in prepustnosti  $k$ .

S črpanjem 360 l/s dosežemo znižanja iz drugega primera (2,5 oz. 3 m) v vseh točkah, razen v prvi. Velika znižanja v vodnjakih (povprečno 4,92 m) nakazujejo na to, da bi bilo črpanje večjih količin nesmiselno in bi lahko privedlo do porušitve. Poleg tega so znižanja v središču jame veliko večja kot je potrebno. Plastnice znižanj so prikazane na sliki 44.



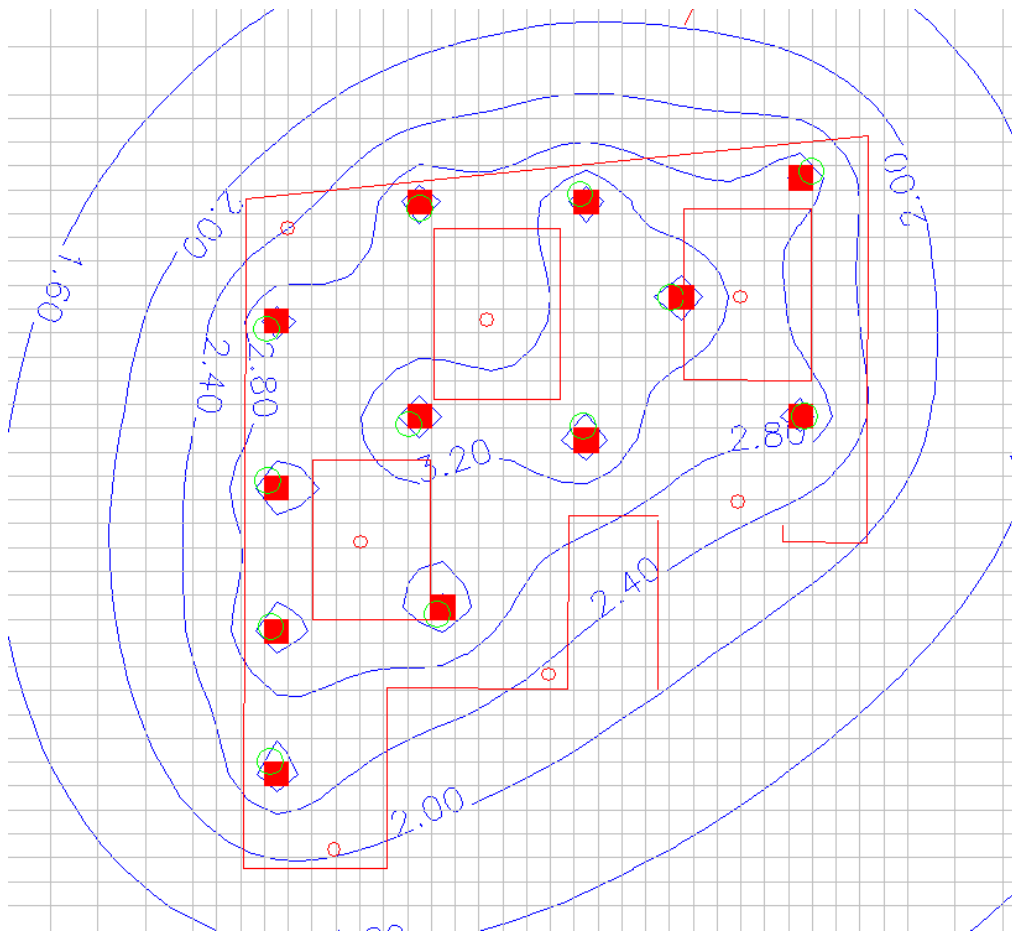
Slika 44: Znižanja gladine podtalne vode v primeru črpanja 360 l/s in prepustnosti  $k$ .

Račun sem ponovil za prepustnosti  $2k$ , to je za dvojne vrednosti koeficientov prepustnosti. Na področju 1 je prepustnost  $3,2 * 10^{-3}$  m/s, na področju 2 je prepustnost  $1,84 * 10^{-3}$  m/s, na področju 3 pa  $2,8 * 10^{-3}$  m/s. Prepustnost v vertikalni smeri znaša  $2 * 10^{-4}$  m/s. Zaradi dvakrat večje prepustnosti sem povečal tudi vplivni polmer področja, kar sledi iz Sichartdove enačbe (14). Za zniževanje gladine vode za 1,5 oz. 2 m (1. primer) je potrebno skupno črpati 370 l/s. Povprečno znižanje v vodnjakih znaša 2,72 m. Znižanja so prikazana na sliki 45.



Slika 45: Znižanja v gradbeni jami za prepustnosti  $2k$  in črpanje 370 l/s.

Za zadostitev znižanj po drugem primeru (2,5 oz. 3 m) in za prepustnosti  $2k$  je potrebno črpati 500 l/s. Pri tem ponovno ni zadoščeno znižanju v prvi točki. Da bi dosegli znižanje tudi tam, bi morali črpalne količine še povečevati. Povprečno znižanje v vodnjakih pri črpanju 500 l/s znaša 3,82 m. Plastnice znižanj so prikazane na sliki 46.



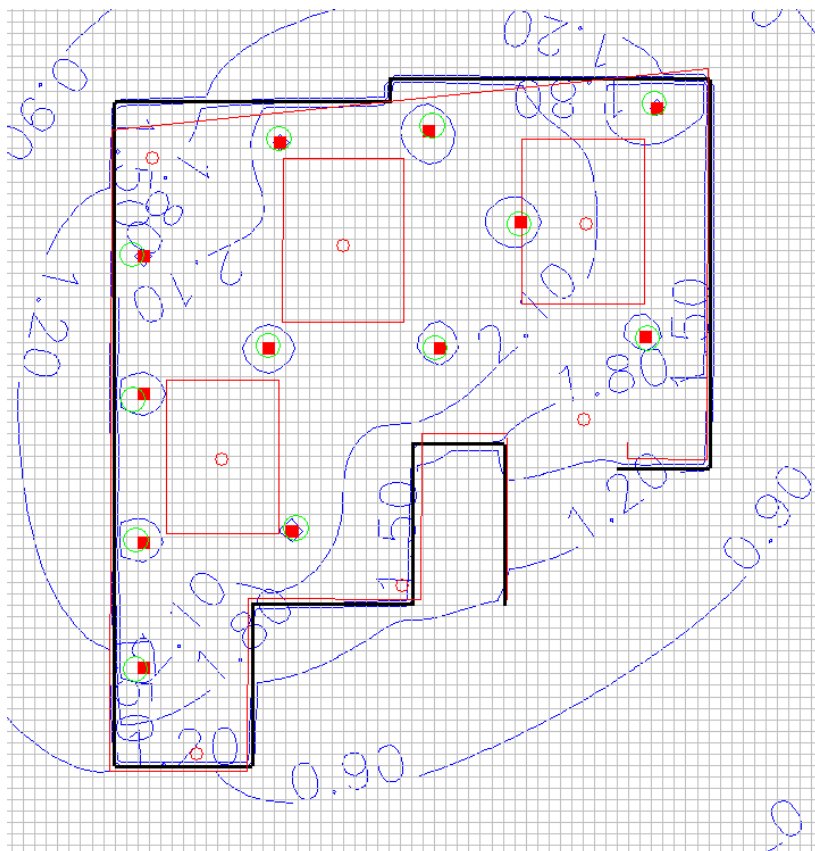
**Slika 46: Znižanje gladine podtalne vode ob črpanju 500 l/s pri dvojnih koeficientih prepustnosti.**

#### 4.8.2 Računski model z upoštevanjem tesnilne zaves

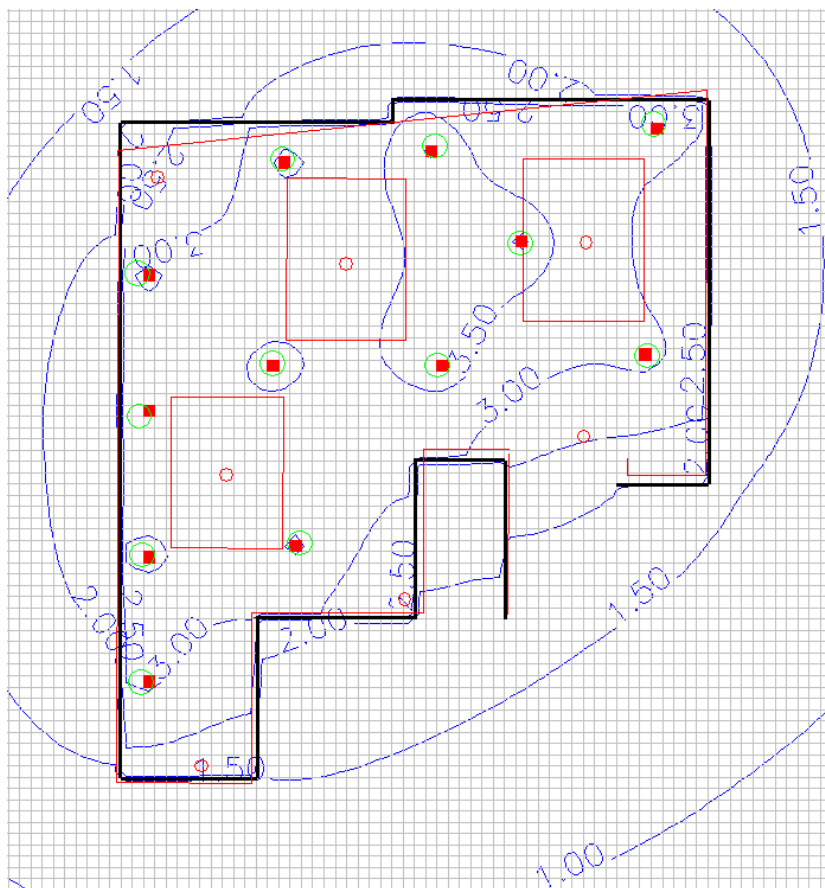
Program sem uporabil tudi za oceno vpliva tesnilne zaves. Tesnilna zavesa je narejena do kote 278 m.n.v. oziroma 279 m.n.v. in debela 60 cm, za njeno prepustnost sem vzel vrednost  $10^{-8}$  m/s. V programu sem zaradi lažjega modeliranja uporabil enakomerno tesnilno zaveso, ki sega do kote 278 m.n.v. Storjena napaka ni velika. Tesnilna zavesa je izvedena v obliki diafragme oziroma jet grouting kolov (sliki 29 in 30). Tesnilno zaveso sem upošteval povsod, le v južnem delu prereza 2-2 ne (slika 30). Tesnilne zaves tam nisem upošteval, ker tudi dotok iz zgornjega vodonosnika ni zatesnjen.

Ponovno sem računal potrebne pretoke glede na potrebna znižanja. Prepustnost  $k$  in  $2k$  ponovno označujeta povprečne prepustnosti iz preglednice 16 in njihove dvojne vrednosti. Najprej sem uporabil koeficiente prepustnosti zemljine  $k$  in določil, da je za 1. primer znižanj (1,5 oz. 2 m) potrebno črpati 200 l/s. Pri tem je povprečno znižanje v vodnjakih 2,67 m. Znižanja so prikazana na sliki 47. Na sliki lahko vidimo, da je razporeditev znižanj bolj enakomerna kot v primeru, da tesnilne zaves ne upoštevamo.

Za zadostitev znižanj 2. primera (2,5 oz. 3 m) pri prepustnostih  $k$  je potrebno črpati 320 l/s. Pri tem so potrebna znižanja v vseh točkah dosežena, povprečno znižanje v vodnjakih pa je 4,0 m. Znižanja v gradbeni jami so prikazana na sliki 48. Tudi tu je razporeditev znižanj bolj enakomerna kot v primeru, da tesnilne zaves ne upoštevamo.

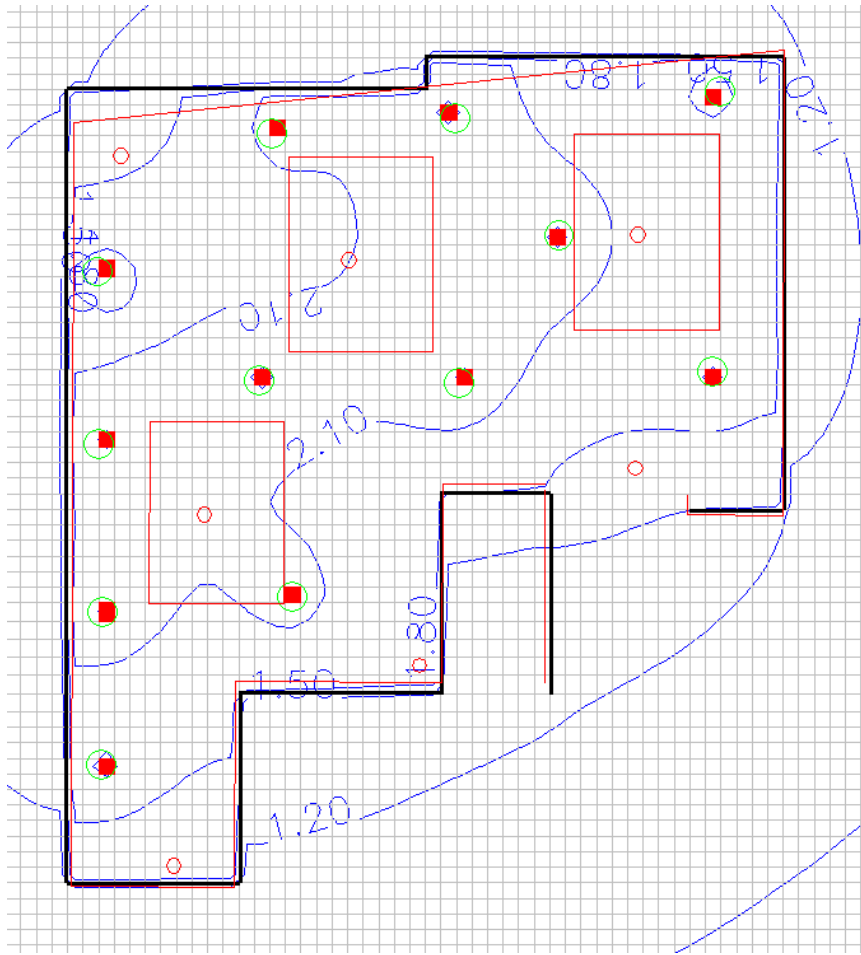


Slika 47: Znižanja ob upoštevanju tesnilne zavese in črpanju 200 l/s ter pri prepustnostih  $k$ .



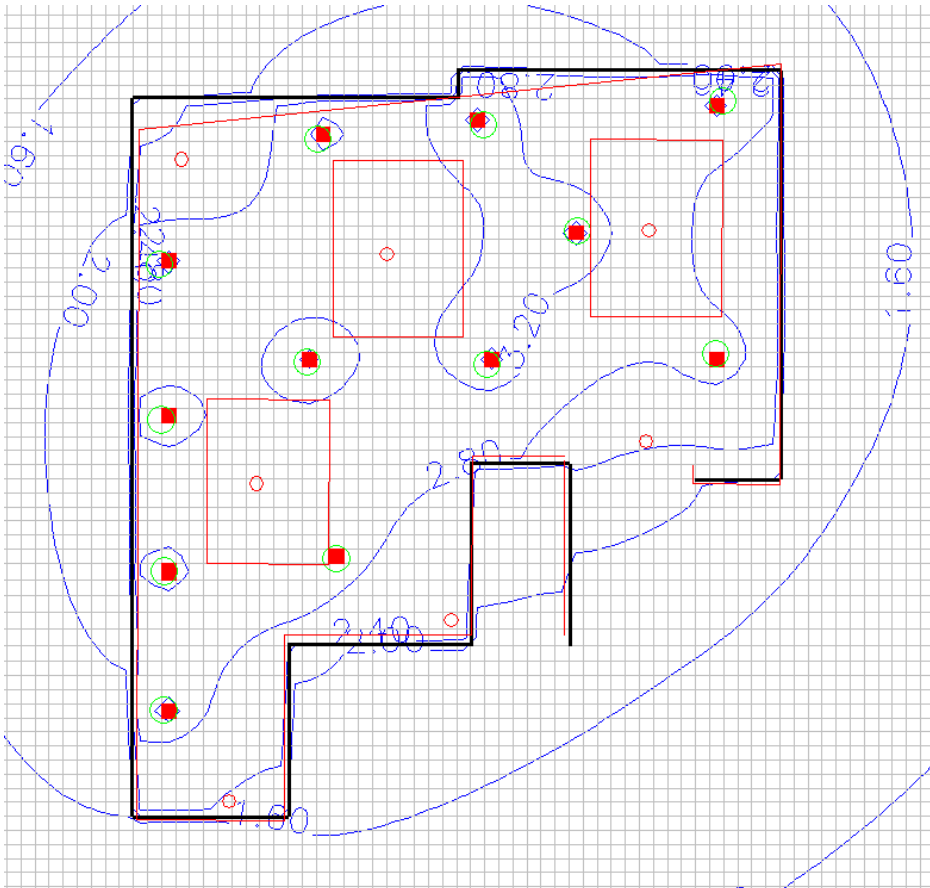
Slika 48: Znižanja ob upoštevanju tesnilne zavese in črpanju 320 l/s ter pri prepustnostih  $k$ .

Vpliv tesnilne zavese sem ocenil tudi v primeru dvakrat večjih prepustnosti. To so dvojne vrednosti povprečnih vrednosti prepustnosti iz tabele 16. Vertikalna prepustnost pa znaša 0,0002 m/s. Za ta primer sem naredil nov model, z večjim vplivnim področjem ( $R=600$  m). Da dosežemo potrebna znižanja za primer 1 (1,5 oz. 2 m), moramo skupno črpati 320 l/s. Povprečno znižanje v vodnjakih je pri tem 2,43 m. Znižanja so prikazana na sliki 49.



**Slika 49: Znižanja ob upoštevanju tesnilne zavese in črpanju 320 l/s ter pri prepustnostih 2k.**

Da bi pri dvojnih vrednostih koeficientov prepustnosti zagotovili znižanja, ki so potrebna v primeru 2 (2,5 oz. 3 m), je potrebno črpati 480 l/s. Pri tem so povprečna znižanja v vodnjakih 3,79 m. Znižanja so prikazana na sliki 50.



Slika 50: Znižanja ob upoštevanju tesnilne zavese in črpanju 480 l/s ter pri prepustnostih  $2k$ .

#### 4.8.3 Povzetek rezultatov numeričnega izračuna

Narejena sta bila dva koncepta, v enem je bil upoštevan vpliv tesnilne zavese, v drugem pa ne. Izračuni so bili narejeni za dva primera potrebnih znižanj. V prvem primeru je bilo potrebno znižati gladino vode v točkah za 1,5 oz. 2 m, v drugem primeru pa za 2,5 oz. 3 m. Za koeficiente prepustnosti sem upošteval povprečne prepustnosti iz preglednice 16 (prepustnost  $k$ ) in njihove dvojne vrednosti (prepustnost  $2k$ ). Rezultati so bili podani v obliki skupnih potrebnih pretokov in povprečnih znižanj v vodnjakih. Rezultati za računske modele, ki ne upoštevajo vpliva tesnilne zavese, so prikazani v preglednici 40.

**Preglednica 40: Potrebne črpalne količine in povprečno znižanje v vodnjakih v primeru, da ne upoštevamo vpliva tesnilne zavese.**

Brez tesnilne zavese		
Prepustnost $k$		
Primer	$\Sigma Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_w$ [m]
1	0,26	3,3
2	0,36	4,9
Prepustnost $2k$		
Primer	$\Sigma Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_w$ [m]
1	0,37	2,72
2	0,5	3,82



Rezultati za računске modele, ki upoštevajo vpliv tesnilne zavesе, so prikazani v preglednici 41. Vidimo, da so pretoki v primeru tesnilne zavesе manjši. Poleg tega so manjša tudi povprečna znižanja gladin podtalne vode v vodnjakih. Tudi razporeditev znižanj je bolj enakomerna, če je prisotna tesnilna zavesa.

**Preglednica 41: Potrebne črpalne količine in povprečno znižanje v vodnjakih v primeru, da upoštevamo vpliv tesnilne zavesе.**

S tesnilno zaveso		
Prepustnost $k$		
Primer	$\Sigma Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_w$ [m]
1	0,2	2,67
2	0,32	4
Prepustnost $2k$		
Primer	$\Sigma Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$s_w$ [m]
1	0,32	2,43
2	0,48	3,79

Iz rezultatov je razvidno, da ima tesnilna zavesa ugoden učinek na odvodnjavanje gradbene jame. To se pozna predvsem v manjših črpalnih količinah, ki so potrebne za doseganje zelenih znižanj. Za doseg primerljivih znižanj moramo v primeru, da ni tesnilne zavesе, črpati od 5 do 30 % večjo količino vode. Poleg tega so znižanja v gradbeni jami bolj enakomerna, kakor če tesnilne zavesе ne bi bilo. Nevarnost pa se lahko pojavi zaradi hidravličnega loma. To je posledica različnih višin gladin podtalne vode na obeh straneh diafragme.

#### 4.9 Primerjava z meritvami

Ker so vodnjaki v dejanskem projektu delovali po fazah in ne vsi naenkrat, lahko samo predvidimo, kako bi deloval sistem, če bi bili vklopljeni vsi vodnjaki. Merjena so bila znižanja gladine vode v vodnjakih. Glede na ta podatek lahko predpostavimo, kolikšna so znižanja v točkah med vodnjaki. Ta znižanja so nekoliko manjša od tistih v vodnjaku. Meritve so opravljali v podjetju IRGO. Vsi vodnjaki so vzdrževali nivo podtalnice pod koto 281,2 m.n.v., v tistih vodnjakih iz katerih so črpali, pa je bila podtalnica znižana pod 280,22 m.n.v. V primeru, da bi delovali vsi vodnjaki naenkrat, bi tako kota podzemne vode v vseh vodnjakih zagotovo bila pod 280,22 m.n.v. Če bi bili vklopljeni vsi vodnjaki naenkrat, bi bilo znižanje verjetno še večje. V preglednici 42 so prikazana znižanja v vodnjaku v času njihovega delovanja. To so največja znižanja v vodnjakih v celotnem časovnem obdobju delovanja sistema odvodnjavanja, ki so bila konstanta vsaj nekaj dni. Rezultati v preglednici 42 časovno ne sovpadajo med seboj. Povprečno znižanje  $s$  je približno 3,7 m.

**Preglednica 42: Največja izmerjena znižanja v vodnjakih.**

Vodnjak	KPV[m.n.v]	KPV*[m.n.v]	s[m]
1	282,57	279,6	2,97
2	282,54	278,8	3,74
3	283	279,2	3,8
4	283	279,6	3,4
5	282,53	279,2	3,33
6	283	278,4	4,6
7	283	278,6	4,4
8	283	279,8	3,2
9	283	278,8	4,2
10	283	279	4
11	283	279,4	3,6
12	283	279,4	3,6

KPV pomeni koto podzemne vode, KPV\* pa koto podzemne vode med črpanjem iz vodnjakov. V preglednici 43 so podane črpalne količine za vsak posamezni vodnjak. Največjo izdatnost sta imela vodnjaka 1 in 11. Skupno bi tako črpali 305 l/s vode. Takšna primerjava pa ni ravno upravičena, saj z vklapljanjem vsakega novega vodnjaka prejšnji postanejo manj učinkoviti.

**Preglednica 43: Črpalne količine za vodnjake v dejanskem stanju.**

Vodnjak	Q[l/s]
1	60
2	22,5
3	17,5
4	27,5
5	7,5
6	12,5
7	17,5
8	15
9	12,5
10	40
11	60
12	12,5
$\Sigma Q$ [l/s]	305

#### 4.9.1 Primerjava z analitičnimi metodami

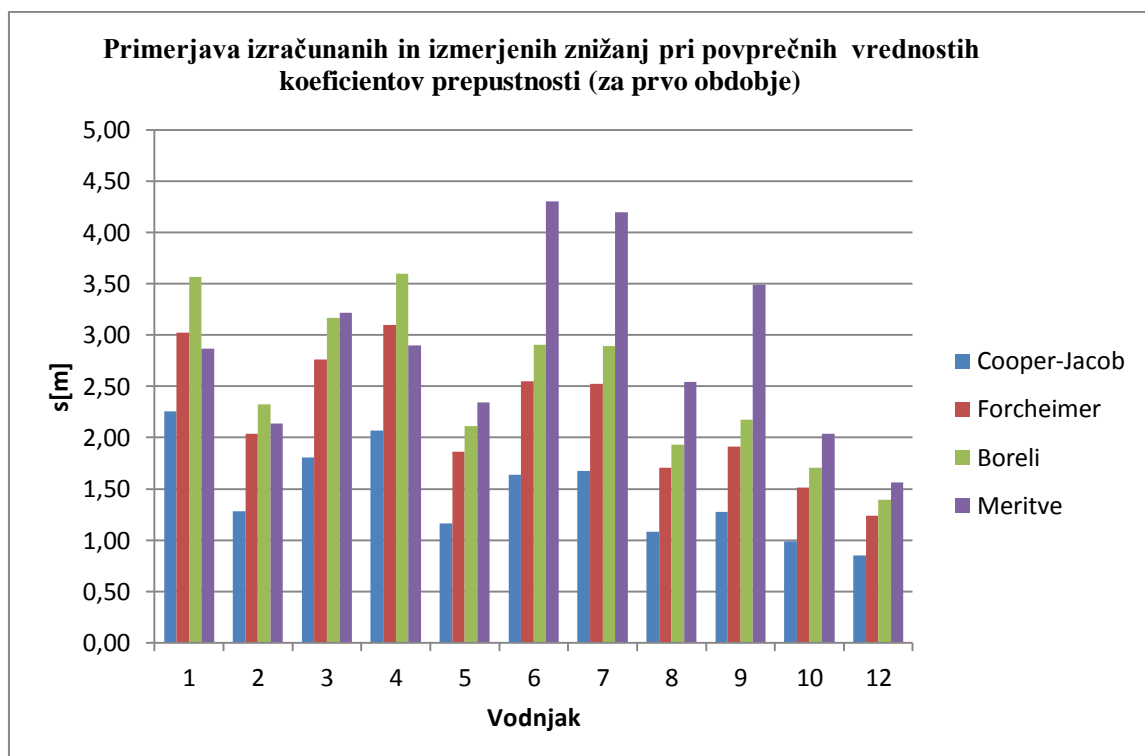
Ker nimam podatkov o delovanju celotne skupine vodnjakov, sem z računskimi metodami računal za tiste vodnjake, ki so delali. Opazoval sem dve stanji. V 1. opazovanem obdobju, 8. aprila 2012, so delovali vodnjaki 1, 3, 4, 6, 7, 9, znižanja pa so bila merjena še v vodnjakih 2, 5, 8, 10, 12. Pretoke lahko povzamemo po preglednici 43, skupno bi tako črpali 147,5 l/s. Izmerjena znižanja v vodnjakih so podana v preglednici 45, zraven pa so še znižanja izračunana po analitičnih metodah. Sivo obarvani okvirji označujejo vodnjake v katerih se črpa. Pri izračunu sem najprej uporabil povprečne koeficiente prepustnosti dobljene iz črpalnega preiskusa (preglednica 44) za vse računske metode. Rezultati iz preglednice 45 so prikazani tudi na sliki 51.

**Preglednica 44: Uporabljeni povprečni koeficienti prepustnosti**

	$k$ [m/s]	Povpr. $k$
Področje	1	1,6E-03
	2	9,2E-04
	3	1,4E-03

**Preglednica 45: Znižanja v vodnjakih v prvem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi povprečnih koeficientov prepustnosti (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa).**

Vodnjak	$s$ [m] (povprečni koeficienti prepustnosti)			
	Izmerjena	Coop.-Jac.	Forch.	Boreli
1	2,87	2,26	3,02	4,56
2	2,14	1,28	2,04	3,28
3	3,22	1,80	2,76	4,13
4	2,9	2,07	3,10	4,57
5	2,34	1,16	1,86	3,06
6	4,3	1,64	2,55	3,86
7	4,2	1,68	2,52	3,85
8	2,54	1,08	1,71	2,88
9	3,49	1,28	1,91	3,11
10	2,04	0,99	1,51	2,65
12	1,56	0,85	1,24	2,33



**Slika 51: Znižanja v vodnjakih v prvem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi povprečnih koeficientov prepustnosti.**

Vidimo, da v tem primeru najbolj odstopa metoda Cooper-Jacoba, ostali dve metodi pa se precej dobro ujemata z meritvami. Poleg tega moramo upoštevati, da pri analitičnem računu ne upoštevamo vpliva tesnilne zavese. Izmerjena znižanja najbolj odstopajo v vodnjakih 6, 7, 8 in 9. To bi lahko nakazovalo na manjšo prepustnost v okolici teh vodnjakov ali pa slabo izdelavo vodnjaka (majhna učinkovitost).

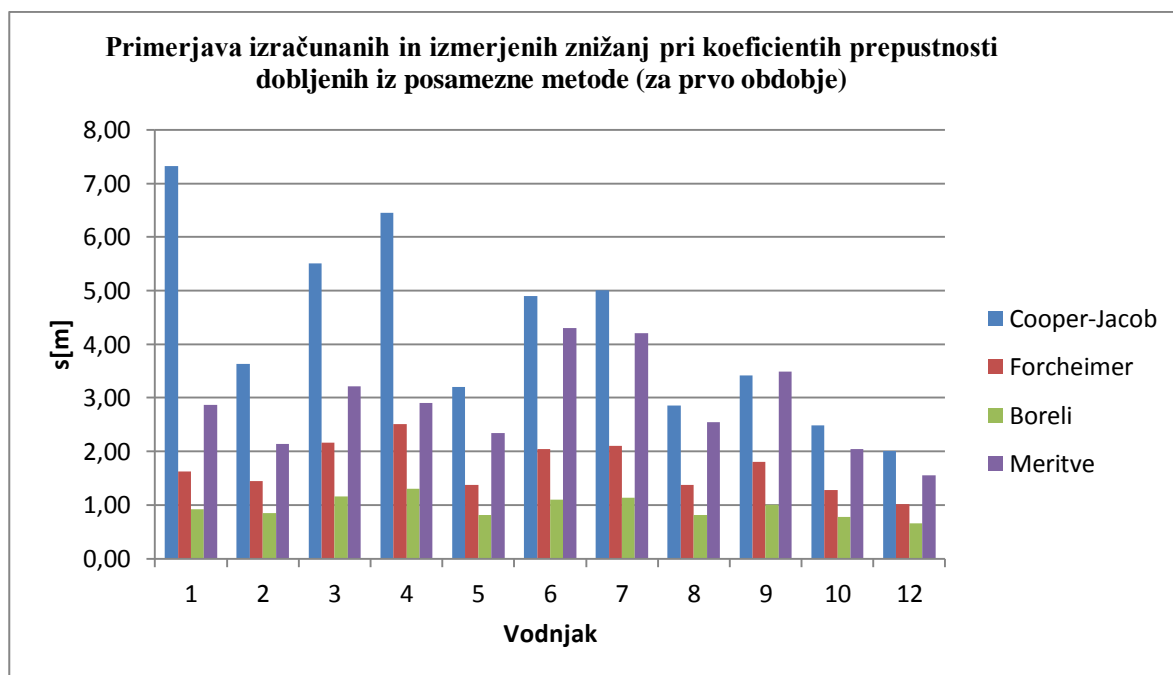
Izračun sem ponovil za 1. opazovano obdobje, le da sem tokrat pri vsaki metodi uporabil koeficiente prepustnosti dobljene po posamezni metodi (preglednica 46). Izračunana in izmerjena znižanja so prikazana v preglednici 47. Rezultati so predstavljeni tudi z grafom na sliki 52.

**Preglednica 46: Uporabljeni koeficienti prepustnosti so dobljeni po posamezni metodi.**

	$k$ [m/s]	Coop.-Jacob	Forch.	Boreli
Področje	1	4,10E-04	4,65E-03	1,23E-02
	2	2,40E-04	1,08E-03	2,84E-03
	3	4,40E-04	9,64E-04	2,55E-03

**Preglednica 47: Znižanja v vodnjakih v prvem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi koeficientov prepustnosti dobljenih iz posameznih metod (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa).**

Vodnjak	$s$ [m] ( $k$ dobljen po posamezni metodi)			
	Izmerjena	Coop.-Jac.	Forch.	Boreli
1	2,87	7,32	1,63	0,92
2	2,14	3,63	1,45	0,85
3	3,22	5,51	2,16	1,16
4	2,9	6,45	2,51	1,31
5	2,34	3,20	1,38	0,82
6	4,3	4,90	2,04	1,10
7	4,2	5,00	2,11	1,13
8	2,54	2,86	1,38	0,82
9	3,49	3,41	1,81	1,00
10	2,04	2,49	1,28	0,78
12	1,56	2,01	1,02	0,66



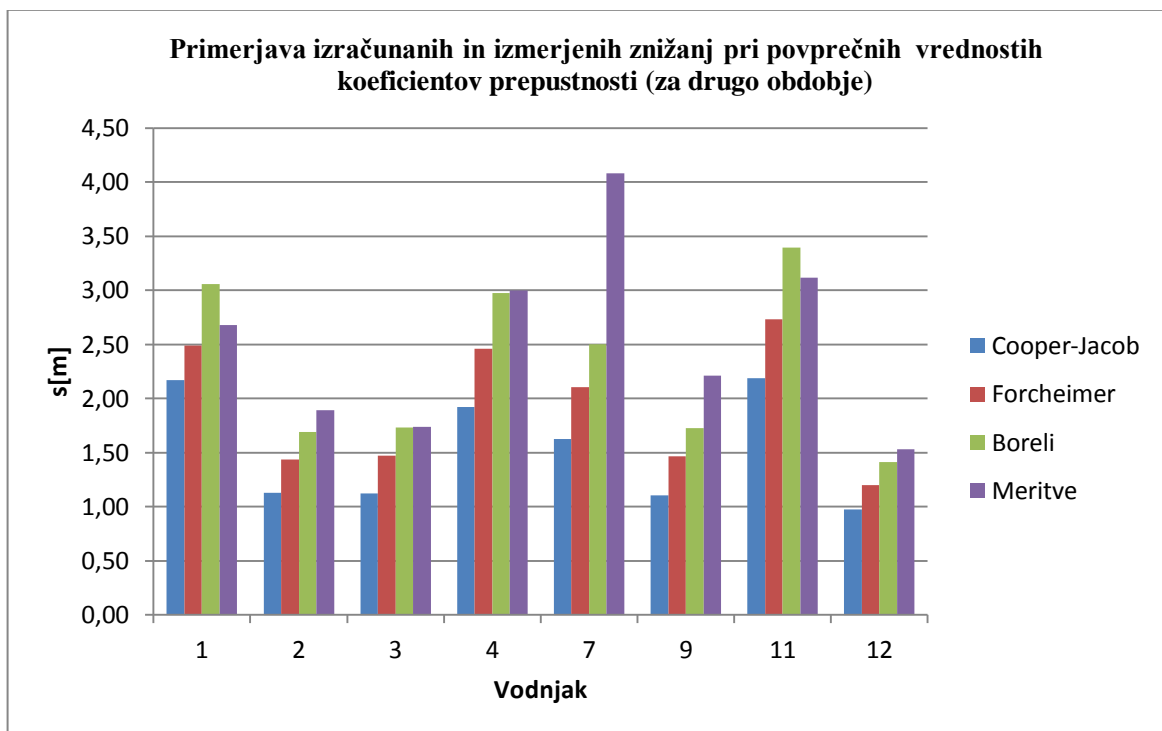
**Slika 52: Znižanja v vodnjakih v prvem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi koeficientov prepustnosti dobljenih po posamezni metodi.**

Na sliki 52 vidimo, da metodi Forcheimerja in Borelija odstopata navzdol, metoda Cooperja in Jacoba pa navzgor. Pri analiziranju slik 51 in 52 moramo vzeti v obzir še znižanje zaradi izgub v vodnjakih in pa ugoden vpliv tesnilne zavese, ki v analitičnih metodah ni upoštevan.

Za drugo opazovalno obdobje sem izbral 14. junij. V tem obdobju se delovali vodnjaki 1, 4, 7 in 11, meritve pa so, poleg v teh, opravljene še v vodnjakih 2, 3, 9 in 12. Skupno bi se tako črpalo 165 l/s. Ponovno sem za izračun najprej uporabil povprečne prepustnosti iz preglednice 44 za vse metode. Rezultati so prikazani v preglednici 48. Isti rezultati so prikazani tudi na sliki 53.

**Preglednica 48: Znižanja v vodnjakih v drugem opazovanem obdobju pri povprečnih koeficientih prepustnosti (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa).**

Vodnjak	s[m] (povprečni koeficienti prepustnosti)			
	Izmerjena	Coop.-Jac.	Forch.	Boreli
1	2,68	2,17	2,49	3,06
2	1,89	1,13	1,43	1,69
3	1,74	1,13	1,47	1,74
4	3	1,92	2,46	2,97
7	4,08	1,63	2,11	2,50
9	2,21	1,10	1,47	1,73
11	3,12	2,19	2,73	3,40
12	1,53	0,97	1,20	1,42



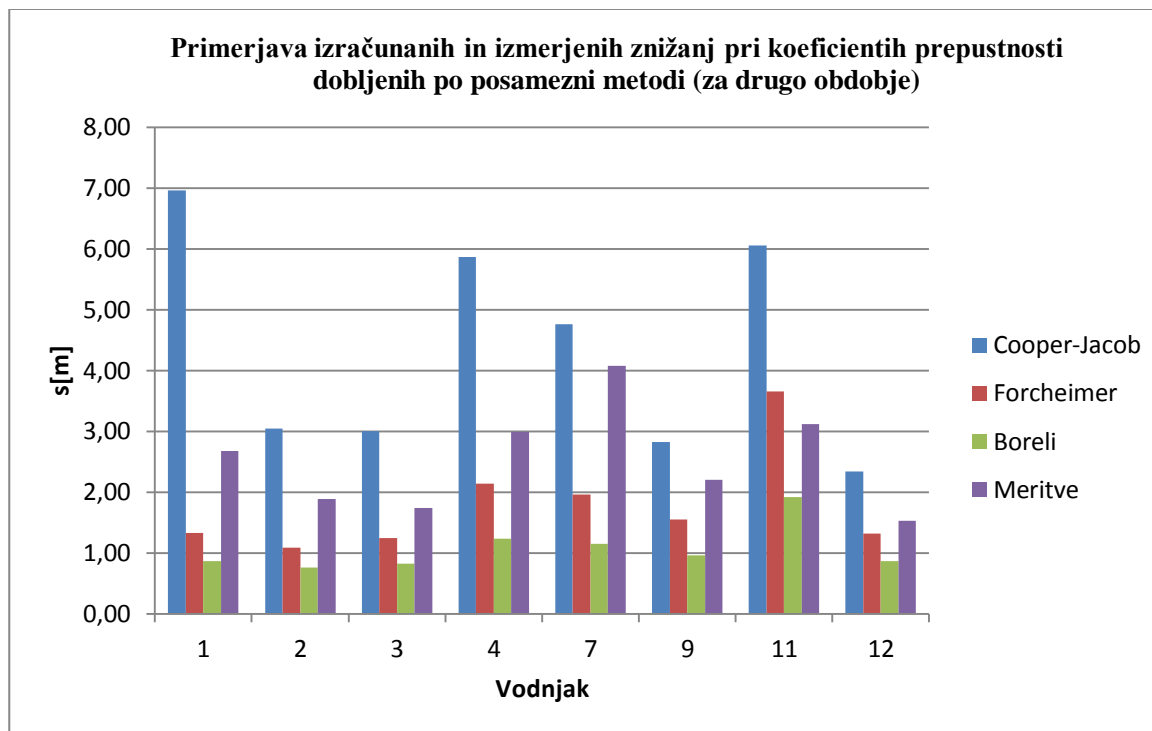
**Slika 53: Znižanja v vodnjakih v drugem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi povprečnih koeficientov prepustnosti.**

Rezultati meritev se precej dobro ujemajo z vsemi metodami. Od meritev najbolj odstopa metoda Cooperja in Jacoba.

Račun za drugo obdobje sem ponovil, le da sem tokrat pri vsaki metodi upošteval prepustnost dobljeno po tisti posamezni metodi. Uporabljene prepustnosti so prikazane v preglednici 46. Rezultati so prikazani v preglednici 49 in na sliki 54.

**Preglednica 49: Znižanja v vodnjakih v drugem opazovanem obdobju pri koeficientih prepustnosti dobljenih po posamezni metodi (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa).**

Vodnjak	s[m] (k dobljen po posamezni metodi)			
	Izmerjena	Coop.-Jac.	Forch.	Boreli
1	2,68	6,96	1,34	0,87
2	1,89	3,05	1,09	0,76
3	1,74	3,00	1,25	0,83
4	3	5,87	2,15	1,24
7	4,08	4,77	1,96	1,15
9	2,21	2,82	1,55	0,97
11	3,12	6,05	3,66	1,93
12	1,53	2,34	1,32	0,87



**Slika 54: Znižanja v vodnjakih v drugem opazovanem obdobju, izračunana na podlagi koeficientov prepustnosti dobljenih po posamezni metodi.**

Ponovno lahko vidimo, da metodi Borelija in Forcheimerja odstopata od meritev navzdol, metoda Cooperja in Jacoba pa odstopa navzgor.

Pri primerjavi rezultatov moramo upoštevati, da analitične metode ne upoštevajo vpliva tesnilne zavese. Poleg tega tu še ni upoštevana učinkovitost vodnjakov (samo v vodnjakih iz katerih se črpa). Če najprej primerjamo rezultate za prvo časovno obdobje in račun, ki je temeljil na povprečnih koeficientih prepustnosti, lahko ocenimo, da se metodi Borelija in Forcheimerja precej dobro ujemata z rezultati meritev. Večja odstopanja so le v vodnjakih 6, 7 in 9. Če vzamemo v obzir še dodatno hipotetično znižanje zaradi tesnilne zavese, lahko rečemo, da je najbolj natančna metoda Forcheimerja. Takoj za njo je malo slabše rezultate dala metoda Borelija. Metoda Cooperja in Jacoba

da v tem primeru premajhne rezultate. Če pa račun temeljimo na koeficientih prepustnosti dobljenih iz posamezne metode, pride do večjega odstopanja med izračunanimi in izmerjenimi znižanji. Metoda Cooperja in Jacoba da prevelike rezultate, metoda Borelija pa premajhne rezultate. Rezultati metode Forcheimerja se najboljše ujema z meritvami. Če bi upoštevali še vpliv tesnilne zavese (povečanje znižanj za določen odstotek), bi z metodo Forcheimerja dobili dokaj razumno oceno dejanskega stanja na terenu. Metoda Cooperja in Jacoba da v nekaterih vodnjakih veliko prevelike rezultate, ponekod pa se precej dobro ujema z rezultati meritev. Iz rezultatov lahko ocenimo, da so koeficienti prepustnosti po metodi Borelija preveliki, koeficienti po metodi Cooperja in Jacoba pa premajhni. Rezultati nakazujejo tudi na to, da so področja z enako prepustnostjo drugače razporejena, kakor pa je bilo predpostavljeno v zasnovi. Pri analizi črpalnega preizkusa po metodi Cooperja in Jacoba pa tudi ni bilo mogoče zaznati področij večjih prepustnosti okoli vodnjakov 1 in 2. Ta pojav sta zaznali metodi Borelija in Forcheimerja.

Pri primerjanju rezultatov za drugo časovno obdobje, pridemo do podobnih ugotovite. Pri uporabi povprečnih koeficientov prepustnosti da metoda Forcheimerja najboljše rezultate, takoj za njo je metoda Borelija. Pri uporabi koeficientov prepustnosti, izračunanih na podlagi posamezne metode, so rezultati po metodi Cooperja in Jacoba preveliki, rezultati po metodi Borelija premajhni, rezultati po metodi Forcheimerja pa dokaj razumni.

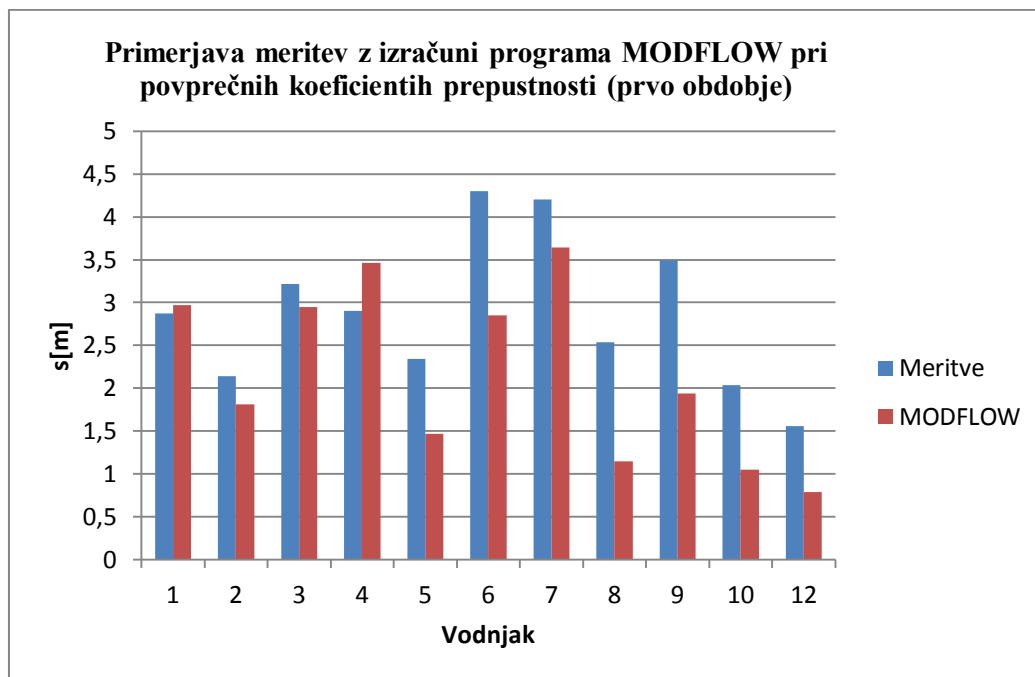
Pri primerjavi analitičnih metod z meritvami lahko opazimo, da so rezultati dobljeni na podlagi povprečnih koeficientov prepustnosti boljši od tistih, ki so dobljeni na podlagi posamezne metode. Vendar moramo vzeti v obzir, da lastnosti tal niso homogene in da je računski model poenostavljena oblika dejanskega stanja na terenu. Upoštevati moramo tudi možnost napake pri analizi črpalnega preizkusa.

#### 4.9.2 Primerjava z numeričnimi metodami

Podobno kot pri primerjavi z analitičnimi metodami, sem primerjal znižanja izmerjena v dveh obdobjih z rezultati dobljenimi iz programa MODFLOW. Najprej sem uporabil povprečne koeficiente prepustnosti dobljene iz preglednice 44 in pretoke iz preglednice 43. Uporabil sem numerični model, ki upošteva vpliv tesnilne zavese. Rezultati za prvo obdobje (8. april 2012) so prikazani v preglednici 50 in na sliki 55. Ponovno so odstopanja v vodnjakih 6 in 9 velika, enako kot pri analitičnih metodah. Odstopanje v vodnjaku 7 je manjše. To bi lahko nakazovalo na velike izgube v teh vodnjakih. Odstopanje v vodnjakih 5, 8, 10 in 12 pa je verjetno posledica napačno izbrane prepustnosti na teh področjih. Program v teh vodnjakih prikaže manjša znižanja kot so izmerjena. Prav vodnjaki, iz katerih se ne črpa, so najbolj merodajni za oceno numeričnega modela.

**Preglednica 50: Izmerjena in izračunana znižanja v prvem opazovalnem obdobju za povprečne koeficiente prepustnosti (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa).**

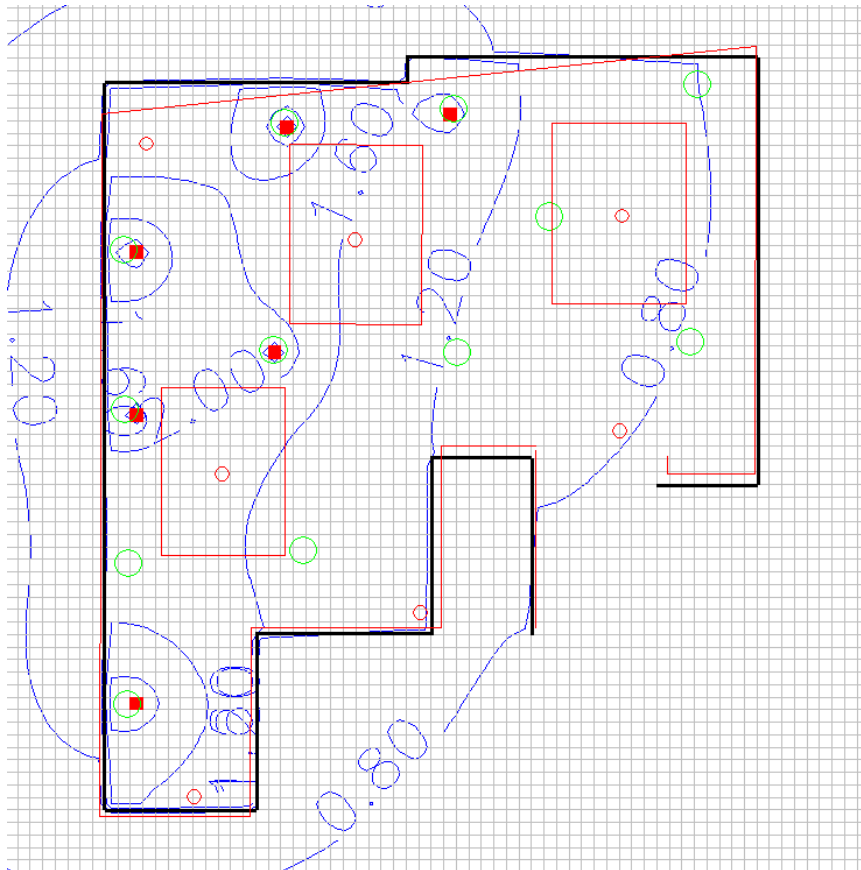
Vodnjak	s[m] (Povprečni koef. prep.)	
	Izmerjeno	MODFLOW
1	2,87	2,97
2	2,14	1,81
3	3,22	2,95
4	2,9	3,46
5	2,34	1,47
6	4,3	2,85
7	4,2	3,64
8	2,54	1,15
9	3,49	1,94
10	2,04	1,05
12	1,56	0,79



**Slika 55: Izmerjena in izračunana znižanja v prvem opazovalnem obdobju za povprečne koeficiente prepustnosti.**

Znižanja po gradbeni jamo so prikazana na sliki 56.





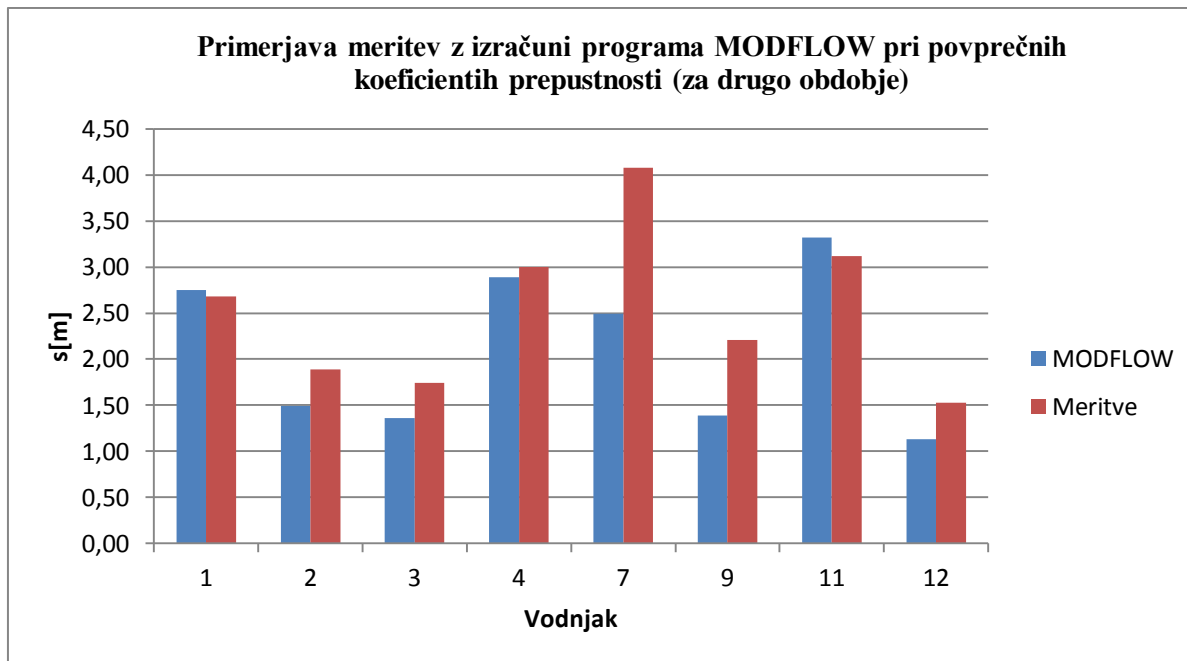
Slika 56: Znižanja v gradbeni jami ob črpanju istih količin kot v 1. opazovanem obdobju.

Račun sem ponovil tako, da so delovali vodnjaki iz drugega obdobja. Koeficienti prepustnosti so enaki kot v preglednici 44. Rezultati so prikazani v preglednici 51 in na sliki 57. Plastnice so prikazane na sliki 58.

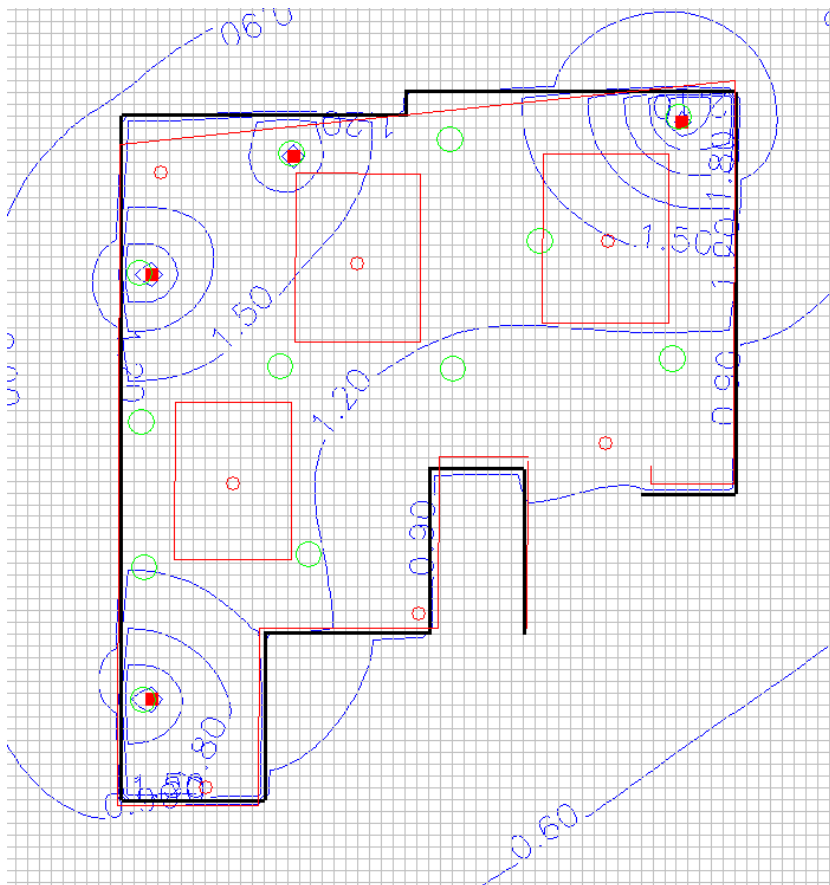
**Preglednica 51: Izmerjena in izračunana znižanja v drugem opazovalnem obdobju (povprečni  $k$ ) (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa).**

Vodnjak	s[m] (povprečni $k$ )	
	Izmerjena	MODFLOW
1	2,68	2,75
2	1,89	1,49
3	1,74	1,36
4	3	2,89
7	4,08	2,49
9	2,21	1,39
11	3,12	3,32
12	1,53	1,13

Znižanja se povečini ujemajo. Odstopanja so v vodnjakih 7 , 9 in 12.



Slika 57: Izmerjena in izračunana znižanja v drugem opazovalnem obdobju (povprečni  $k$ ).

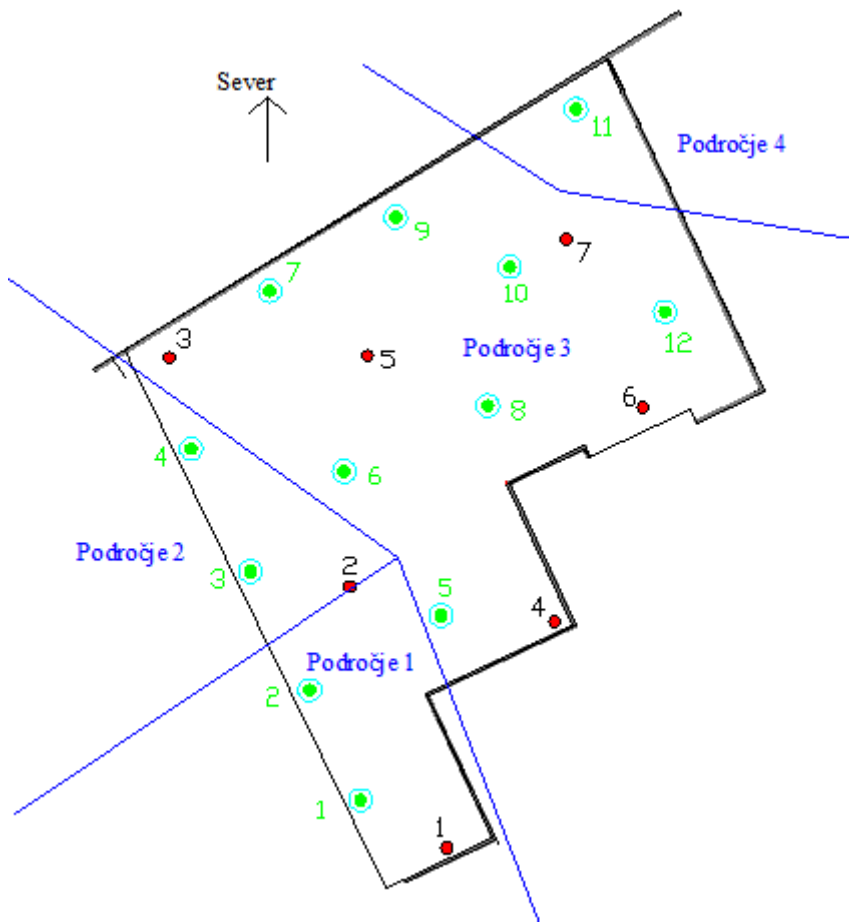


Slika 58: Znižanja v gradbeni jami ob črpanju istih količin kot v 2. opazovanem obdobju (povprečni  $k$ ).

Zaradi neujemanja numeričnih rezultatov z meritvami, predvsem v 1. opazovanem obdobju (vodnjaki 5, 8, 10 in 12), sem poskušal računalniški model umeriti. S preizkušanjem sem ugotovil, da lahko znižanja v teh vodnjakih izboljšam (glede na meritve) s spreminjanjem prepustnosti posameznih delov

gradbene jame. Na slikah 55 in 57 je razvidno, da je potrebno izboljšati predvsem rezultate v vodnjakih 5, 6, 7, 8, 10 in 12.

Izkaže se, da ima v procesu umerjanja modela, veliko vlogo vertikalna prepustnost zemljine. Rezultati modela se bolje ujemajo z meritvami, če namesto razmerja  $\frac{k_v}{k_h} = \frac{1}{10}$  vzamemo razmerje približno  $\frac{k_v}{k_h} = \frac{1}{100}$ . Rezultati se glede na meritve izboljšajo tudi, če spremenimo lego področij z enako prepustnostjo. Področje v sredini gradbene jame, ki vsebuje vodnjake 5, 6, 7, 8, 9, 10 in 12, ima tako nekaj manjšo prepustnosti kot področja, ki vsebujejo vodnjake 1, 2, 3, in 4 oziroma vodnjak 11. Nova razporeditev področij z enako prepustnostjo je prikazana na sliki 59. Uporabljeni koeficienti prepustnosti za umerjen model so prikazani v preglednici 52.



Slika 59: Razporeditev področij z enakimi prepustnostmi po umerjanju modela.

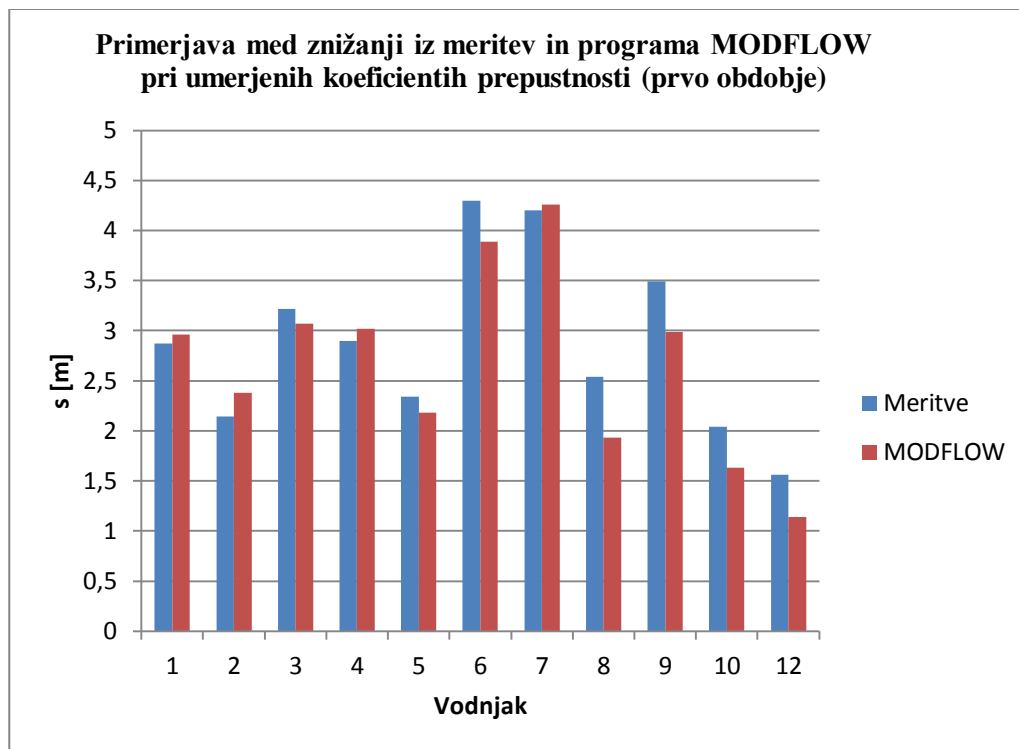
Preglednica 52: Koeficienti prepustnosti za umerjen model.

Področje	1	2	3	4
$k$ [m/s]	2,70E-03	2,10E-03	7,00E-04	3,00E-03

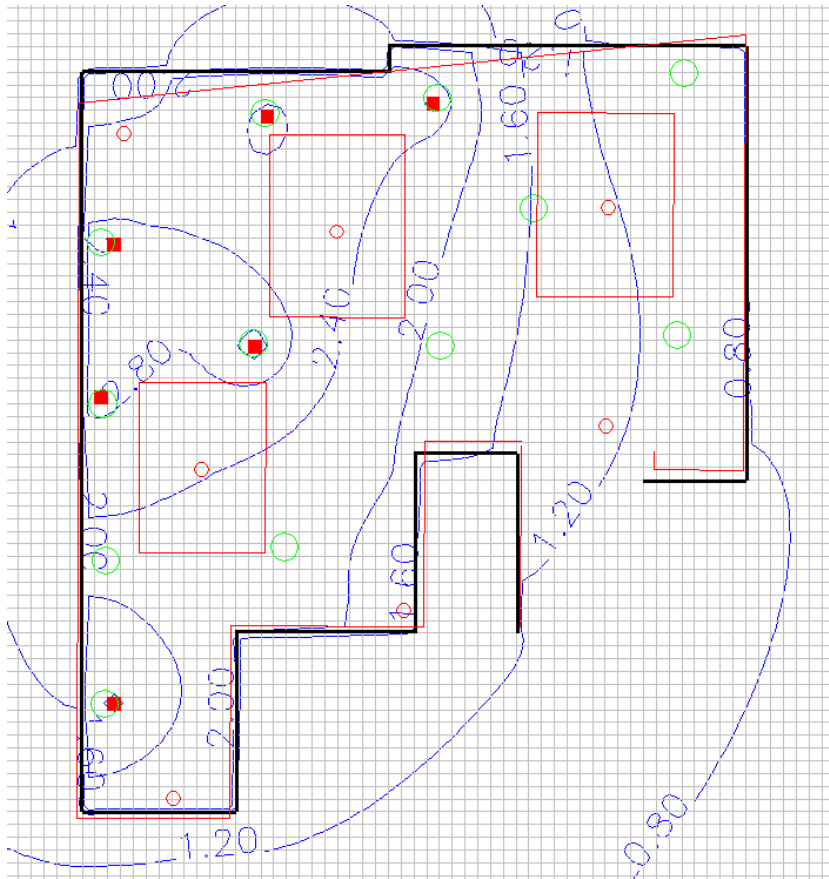
Na podlagi koeficientov prepustnosti iz preglednice 52 sem izračunal znižanja v gradbeni jami za dve opazovani obdobji. V prvem obdobju se skupno črpa 147,5 l/s, v drugem pa 165 l/s. Rezultati za prvo obdobje so prikazani v preglednici 53. Sivo obarvani rezultati v tabeli so prisotni pri vodnjakih, iz katerih se črpa. Rezultati iz prvega opazovanega obdobja so prikazani tudi na slikah 60 in 61.

**Preglednica 53: Rezultati na umerjenem računskem modelu v primerjavi z meritvami za prvo obdobje (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa).**

Vodnjak	s[m] (umerjeni koef. prep.)	
	Meritve	MODFLOW
1	2,87	2,96
2	2,14	2,38
3	3,22	3,07
4	2,9	3,02
5	2,34	2,18
6	4,3	3,89
7	4,2	4,26
8	2,54	1,93
9	3,49	2,99
10	2,04	1,63
12	1,56	1,14

**Slika 60: Rezultati na umerjenem računskem modelu v primerjavi z meritvami za prvo obdobje.**

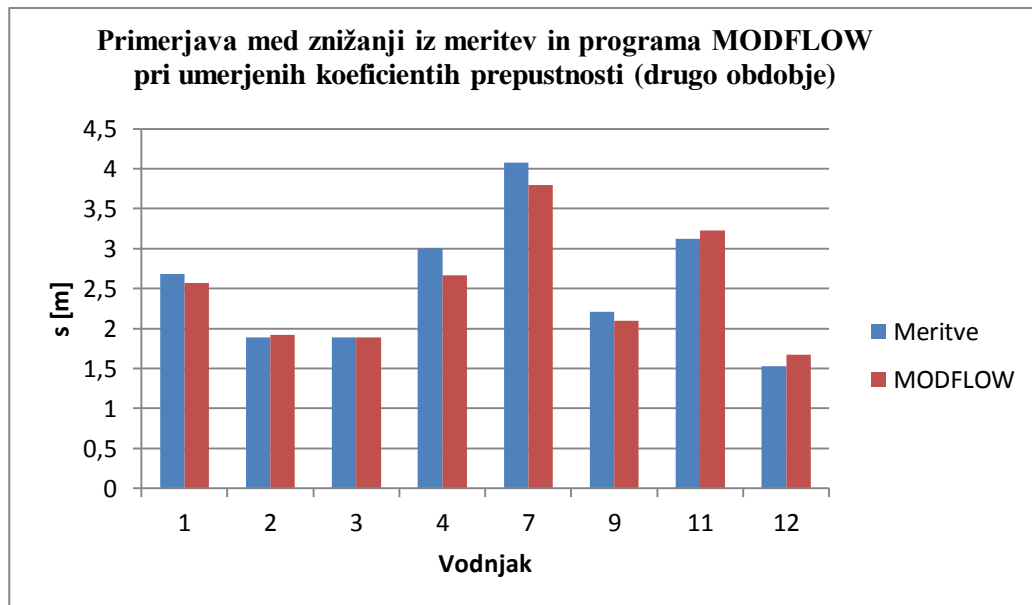
V preglednici 54 pa so prikazani rezultati računalniškega modela in meritve za drugo opazovano obdobje. Rezultati iz preglednice 54 so grafično prikazani na sliki 62. Plastnice znižanj iz programa MODFLOW so prikazane na sliki 63.



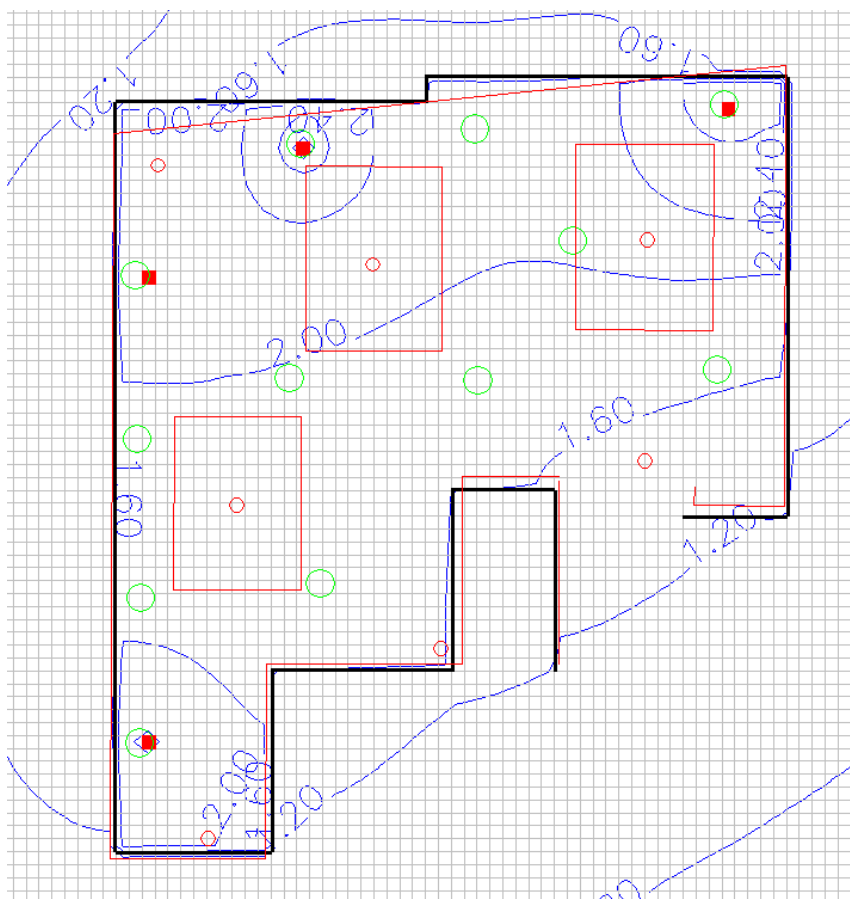
Slika 61: Plastnice znižanj na umerjenem računskem modelu za prvo opazovano obdobje.

Preglednica 54: Rezultati na umerjenem računskem modelu v primerjavi z meritvami za drugo obdobje (sivo obarvana polja v preglednici označujejo vodnjake iz katerih se črpa).

Vodnjak	s[m] (umerjeni k)	
	Meritve	MODFLOW
1	2,68	2,57
2	1,89	1,92
3	1,89	1,89
4	3	2,67
7	4,08	3,80
9	2,21	2,10
11	3,12	3,23
12	1,53	1,67



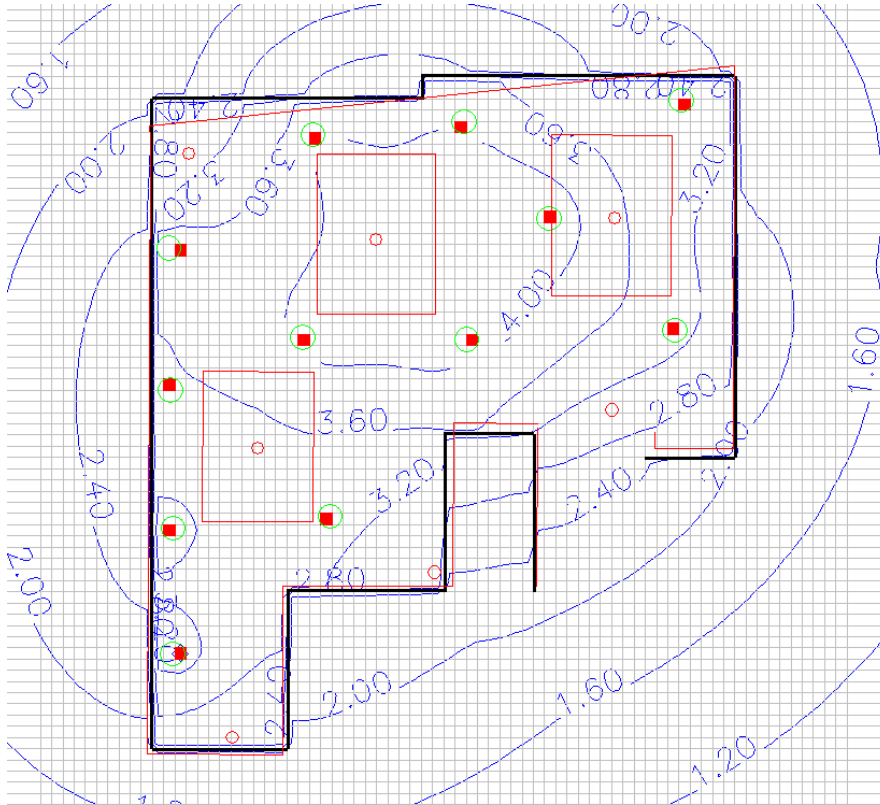
Slika 62: Rezultati na umerjenem računskem modelu v primerjavi z meritvami za drugo obdobje.



Slika 63: Plastnice znižanj na umerjenem računskem modelu za drugo opazovano obdobje.

Na slikah 60 in 62 vidimo, da se znižanja ne ujemajo popolnoma. Vendar sem ocenil, da je takšno odstopanje sprejemljivo. Poleg tega so se vodnjaki vklapljali in izklapljali, tako da popolnoma točnih rezultatov ne moremo dobiti. Koeficienti prepustnosti, dobljeni na podlagi črpalnega preizkusa se od umerjenih razlikujejo predvsem po razporeditvi po gradbeni jami, vendar pa, v celoti gledano, napaka ni velika. To dokazuje tudi dobro ujemanje rezultatov analitičnih metod z meritvami.

V programu sem modeliral tudi situacijo, ko črpamo vodo iz vseh vodnjakov. Skupno to znaša 305 l/s. Izračun sem naredil na umerjenemu modelu. V tem primeru me je zanimala predvsem razlika znižanj na obeh straneh diafragme. To razliko sem v nadaljevanju uporabil za preverjanje hidravličnega loma. Znižanja so prikazana na sliki 64. Izkaže se, da tolikšne količine vode sploh ne moremo črpati, saj se nekateri vodnjaki izsušijo. Stanje na sliki 64 je pravzaprav nastalo ob črpanju 260 l/s. Največja razlika znižanj na obeh straneh diafragme je ob železnici na severni strani in znaša približno 1,2 m.



Slika 64: Znižanja ob črpanju 260 l/s.

#### 4.10 Preverjanje hidravličnih porušitev

Nevarnost vzgona sem preverjal na kvadratni meter. To pa zato, ker nimam podrobnih podatkov o stavbi. Objekti so temeljeni na 282 oz 281,5 m.n.v., gladina podtalne vode pa je 283 m.n.v. To pomeni, da je potopljen objekt 1 oz 1,5 m pod vodo.

Zadostiti je potrebno neneačbo (34).

$$p_{dst,k} = 1,5 \text{ m} * 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 15 \text{ kN/m}^2$$

$$R_k = 0$$

$$p_{dst,k} * 1,5 \leq p_{stb,k} * 0,9$$

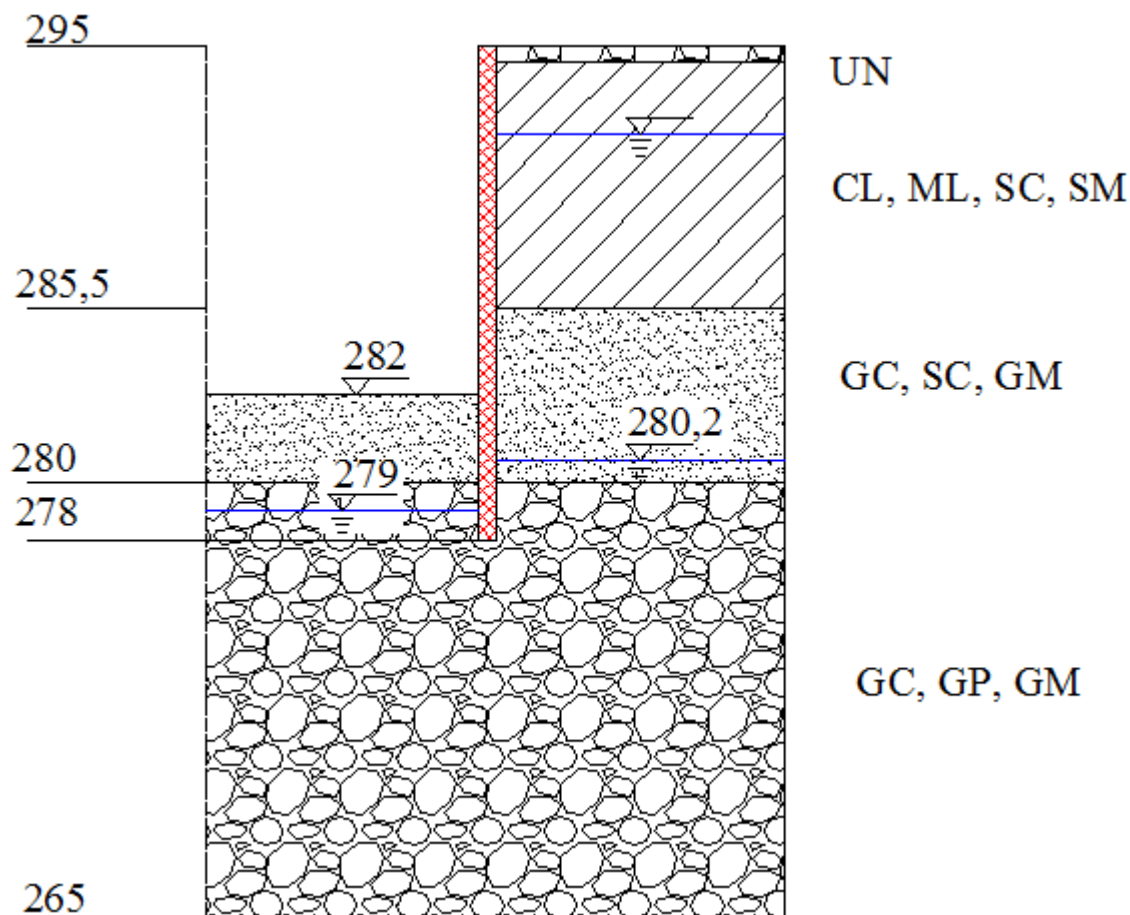
$$p_{stb,k} \geq 25 \text{ kN/m}^2$$

Karakteristična lastna teža objekta mora biti vsaj 25 kN na kvadratni meter temelja preden lahko izklopimo sistem vodnjakov. Delni varnostni faktorji za vplive pri preverjanju vzgona so prikazani v preglednici 55.

**Preglednica 55: Delni varnostni faktorji pri preverjanju vzgona (EC 7, dodatek A.4)**

Vplivi	Oznaka	Vrednost
Stalni		
Neugodni	$\gamma_{G,dst}$	1
Ugodni	$\gamma_{G,stb}$	0,9
Začasni		
Neugodni	$\gamma_{Q,dst}$	1,5

Hidravlični lom sem preverjal ob diafragmi. Na sliki 51 je vidno, da je največja razlika gladine spodnjega vodonosnika na obeh straneh diafragme 1,2 m. Na sliki 53 je prikazan profil ob železnici. Znižanja so določena na podlagi umerjenega računalniškega modela. Predpostavi se, da je dotok iz zgornjega vodonosnika močno omejen zaradi nepropustnosti glinene plasti. Varnostni faktorji so prikazani v preglednici 56.

**Slika 65: Profil ob železnici.****Preglednica 56: Delni varnostni faktorji pri preverjanju hidravličnega loma (EC 7, dodatek A.5)**

Vplivi	Oznaka	Vrednost
Stalni		
Neugodni	$\gamma_{G,dst}$	1,35
Ugodni	$\gamma_{G,stb}$	0,9
Začasni		
Neugodni	$\gamma_{Q,dst}$	1,5



Za zagotovitev varnosti proti hidravličnemu lomu sem uporabljal neenačbo (35).

$$\begin{aligned}\gamma_{zem} &= 21 \frac{kN}{m^2} \\ u_{dst,k} &= 1,2 * 10 \frac{kN}{m^2} = 12 \frac{kN}{m^2} \\ \sigma_{stb,k} &= 3 * 21 \frac{kN}{m^2} \\ u_{dst,d} &= 12 \frac{kN}{m^2} * 1,5 = 18 \frac{kN}{m^2} \\ \sigma_{stb,d} &= \left(3 * 21 \frac{kN}{m^2}\right) * 0,9 = 63 \frac{kN}{m^2} \\ \sigma_{stb,d} &\geq u_{dst,d}\end{aligned}$$

Varnost proti hidravličnemu lomu je tako dokazana za obravnavano območje. Predvideva se, da so druga območja bolj varna, obravnavan je najbolj kritični primer.

Notranjo erozijo sem preverjal z izračunom potrebne dolžine filtrov, glede na kritično vstopno hitrost ob robu filtra. Potrebno dolžino filtra sem določal na podlagi enačbe (41) kot je predstavljena v Avakumović D. (1991). 1,2 je varnostni faktor. Preveril sem dva primera črpalnih količin, izračunana v poglavju 4.8.2. V prvem primeru se črpa 200 l/s, povprečna znižanja v vodnjaku so 2,67 m, v drugem primeru pa se črpa 320 l/s, povprečna znižanja v vodnjaku pa so 4,0 m.

$$l \geq \frac{1,2 Q_{max}}{2 \pi r_0 v_{krit}} \quad (41)$$

Računske hidravlične gradiente na vstopu v vodnjak lahko izračunamo iz enačbe (42) ob upoštevanju enačbe (3). Kritični hidravlični gradient pa po Sichardt tu znaša  $\frac{1}{15\sqrt{k}}$ . Porušitev bo preprečena, če bo izraz (42) manjši od kritičnega hidravličnega gradienta.

$$i_d = \frac{1,2 Q}{\pi r_0 l k} \quad (42)$$

Pri računu z omočeno dolžino  $l$  moramo upoštevati še izgube v vodnjaku. Znižanja se tako povečajo glede na učinkovitost vodnjaka v skladu z grafom na sliki 40. Rezultati za prvi primer, ko črpamo 200 l/s, so prikazani v preglednici 57. Vidimo, da je varnosti zadoščeno, saj računski gradienti  $1,2i$  ne presegajo kritičnih hidravličnih gradientov  $i_{krit}$ .

**Preglednica 57: Preverjanje porušitve zaradi erozije za primer črpanja 200 l/s.**

Področje	$Q[m^3/s]$	$k [m/s]$	$s_w[m]$	$l[m]$	$1,2 i$	$i_{krit}$
1	0,021	1,60E-03	2,87	7,13	0,88	1,67
2	0,012	9,20E-04	2,78	7,22	0,86	2,20
3	0,018	1,40E-03	2,87	7,13	0,86	1,78

Pri črpanju 320 l/s iz gradbene jame dobimo rezultate podane v preglednici 58. Pri znižanju v vodnjaku so tudi tu upoštevane izgube zaradi nepopolnosti vodnjaka. Vidimo, da so gradienti na meji sprejemljivega, eden pa ne zadošča varnosti. To pomeni, da črpanja več vode kot 320 l/s sistem vodnjakov ne bi prenesel.

**Preglednica 58: Preverjanje porušitve zaradi erozije za primer črpanja 320 l/s.**

Področje	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$k$ [m/s]	$s_w$ [m]	$l$ [m]	$1,2 i$	$i_{krit}$
1	0,033	1,60E-03	4,49	5,51	1,79	1,67
2	0,019	9,20E-04	4,3	5,7	1,73	2,20
3	0,029	1,40E-03	4,44	5,56	1,78	1,78

Ker pa je umerjeni numerični model pokazal drugačno razporeditev koeficientov prepustnosti, sem preveril še rezultate dobljene iz MODFLOW-a. Preveril sem možnost erozije ob črpanju 200 l/s in 260 l/s. Kot je prikazano v prejšnjem poglavju, več kot 260 l/s sistem ne more črpati. Za znižanja sem vzel največje vrednosti na področjih z enako prepustnostjo. V preglednici 59 so prikazani rezultati pri črpanju 200 l/s. Vidimo, da nevarnosti zaradi erozije ni.

**Preglednica 59: Preverjanje porušitve zaradi erozije za primer črpanja 200 l/s (MODFLOW).**

Področje	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$k$ [m/s]	$s_w$ [m]	$l$ [m]	$1,2 i$	$i_{krit}$
1	0,031	2,70E-03	3,45	6,55	0,84	1,28
2	0,024	2,10E-03	3,67	6,33	0,86	1,45
3	0,008	7,00E-04	3,91	6,09	0,90	2,52
4	0,034	3,00E-03	2,88	7,12	0,76	1,22

V preglednici 60 so prikazani rezultati pri črpanju 260 l/s. Tudi tu varnost ni prekoračena. Kljub temu so kritični gradienti skoraj prekoračeni. Večje količine od 260 l/s ne smemo črpati.

**Preglednica 60: Preverjanje porušitve zaradi erozije za primer črpanja 260 l/s (MODFLOW).**

Področje	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$k$ [m/s]	$s_w$ [m]	$l$ [m]	$1,2 i$	$i_{krit}$
1	0,04	2,70E-03	4,1	5,9	1,20	1,28
2	0,031	2,10E-03	4,3	5,7	1,24	1,45
3	0,01	7,00E-04	4,66	5,34	1,28	2,52
4	0,045	3,00E-03	3	7	1,02	1,22

Če povzamemo rezultate izračuna, lahko črpamo 200 l/s v celotni gradbeni jami in dosežemo znižanja v točkah 1,5 oz 2 m, pri tem pa ne tvegmo porušitve zaradi erozije. Lahko črpamo tudi 260 l/s in dosežemo znižanja 2,5 oz 3 m. Večje količine vode pa ne smemo črpati.

## 5 ZAKLJUČEK

Cilj te diplomske naloge je bila določitev potrebnih črpalnih količin za uspešno odvodnjavanje gradbene jame Tobačne mesta. Obravnaval sem sistem vodnjakov, ki je že zasnovan in izveden ter je že bil v funkciji. V ta namen so bili najprej določeni koeficienti prepustnosti. Za izračun znižanj gladine podtalne vode so bile uporabljene tri analitične metode. Njihovo točnost sem ocenjeval na podlagi meritev, ki so bile opravljene v podjetju IRGO. Uporabljen je bil tudi numerični model v programu Processing MODFLOW, na podlagi katerega sem analiziral znižanja po celotni gradbeni jami. Program je bil uporabljen tudi za primerjavo z analitičnimi metodami. Po analizi je bil računalniški model umerjen tako, da so rezultati programa in meritev čim bolj sovpadali. Rezultati izračunov so bili uporabljeni pri preverjanju možnosti porušitev zaradi hidravličnih vplivov po standardu EC 7.

Najprej je bilo treba urediti in pregledati geomehanske in hidrogeološke preiskave in iz njih izluščiti potrebne lastnosti in sestavo zemljin. Najpomembnejša lastnost zemljine pri odvodnjavanju je koeficient prepustnosti. Določanju le tega je zato bilo posvečeno precej dela. Uporabljeni so bili izračuni na podlagi zrnastostne krivulje in na podlagi črpalnih preizkusov. Rezultati, dobljeni na podlagi zrnastostnih krivulj, so bili namenjeni primerjanju s tistim, dobljenim iz črpalnega preiskusa. Za analizo na podlagi zrnastostnih krivulj so bile uporabljene metode Hazena, USBR in Alyamaniya in Sena. Po primerjavi teh metod z rezultati iz črpalnega preiskusa se izkaže, da sta najboljši metodi za tak tip zemljine USBR in Alyamaniya in Sena. Metoda Hazena da v tem primeru premajhne rezultate. Koeficienti prepustnosti so bili iz črpalnega preiskusa dobljeni z analizo črpanja v posameznih vrtnah in z opazovanjem znižanja v piezometrih med črpanjem iz testnega vodnjaka. Pri določanju koeficienta prepustnosti na podlagi znižanja v vodnjaku in enem piezometru, je bilo potrebno določiti efektivno znižanje gladine talne vode v vodnjaku zaradi izgub pri črpanju. V ta namen je bil izveden step-test na vodnjaku. Zaradi nezanesljivosti step-testa bi lahko prišlo do napačne interpretacije rezultatov črpalnega preiskusa. Kljub temu pa so rezultati boljši, kakor če step-testa ne uporabimo. Tej nezanesljivosti bi se lahko izognili z izgradnjo še enega piezometra v neposredni bližini testnega vodnjaka. Piezometer bi lahko bil na razdalji od 5 do 10 m od vodnjaka. Koeficiente prepustnosti bi tako lahko določali na podlagi rezultatov iz dveh piezometrov in s tem bi izločili napako zaradi izgub v vodnjaku.

Zaradi globine vodonosnika, gradnja polno penetriranih vodnjakov ni bila smotrna. Da bi lažje ocenil vpliv delne penetracije, je bilo analizi posameznega delno penetriranega vodnjaka posvečeno poglavje 3. Delna penetriranost je bila predstavljena z analitičnimi metodami in z računalniškim modeliranjem. Računalniško modeliran vpliv delne penetracije je bil analiziran v programu Plaxis 2D. Uporabljeni so bili tudi trije analitični popravki, ki upoštevajo vpliv delne penetracije. Uporabljeni so bili popravki Butlerja, Forcheimerja in Borelija. Analiza je bila opravljena s spreminjanjem stopnje penetracije. Vpliv delne penetracije je bil analiziran v dveh primerih. V prvem primeru so bili absolutni črpalni pretoki pri vseh stopnjah penetracije enaki, v drugem primeru pa se je črpalni pretok spreminjal. V drugem primeru se je pretok spreminjal tako, da je razmerje med dejanskim pretokom in največjim možnim pretokom ostalo enako pri vseh stopnjah penetracije. Največji možni pretok je bil vezan na globino vodnjaka, saj so drugi parametri ostali nespremenjeni. Izkaže se, da so znižanja pri črpanju absolutno enakih količin vode, večja pri bolj plitvih vodnjakih. Ta učinek pa je najbolj viden v neposredni bližini vodnjaka. Rezultati numeričnega modeliranja in metode Butlerja nakazujejo na to, da se ta učinek z večanjem razdalje od vodnjaka manjša. Kot konzervativno oceno razdalje, na kateri se učinek delne penetracije izniči, bi lahko vzeli 1,5 kratnik debeline vodonosnika. Znižanje zaradi delne penetracije po metodah Forcheimerja in Borelija pa se z razdaljo od vodnjaka skoraj nič ne

zmanjšuje. Z delno penetriranimi vodnjaki torej dobimo večja znižanja glede na polno penetrirani vodnjak, ki črpa enako količino vode. Vendar pa lahko pri delno penetriranem vodnjaku črpamo manjšo količino vode kot pri polno penetriranem vodnjaku. To privede do tega, da lahko s polno penetriranimi vodnjaki dosežemo večja znižanja podzemne vode. Izvedba delno penetriranih vodnjakov pa je boljša tam, kjer moramo črpati manj vode, da dosežemo isti rezultat. To je lahko v primeru, ko je vodo potrebno očistiti ali ko vode nimamo kam odvajati. Črpanje manjše količine vode je boljše tudi zaradi možnosti posedanja zemljine v okolici sistema odvodnjavanja.

Račun potrebnih pretokov za sistem vodnjakov je bil izveden s tremi različnimi analitičnimi metodami in numerično modeliran v programu MODFLOW. Račun je bil izveden na podlagi povprečnih koeficientov prepustnosti. Povprečne vrednosti so bile dobljene na podlagi črpalnih preizkusov po treh analitičnih metodah. Pri povprečnih koeficientih prepustnosti da največje potrebne pretoke metoda Cooperja in Jacoba, sledi metoda Forcheimerja, najmanjše pretoke pa da metoda Borelija. Ker pa so te tri metode dale tudi različne koeficiente prepustnosti, sem za primerjavo pri modeliranju uporabil samo koeficiente prepustnosti dobljene po posamezni metodi. Pri takšni analizi so bili rezultati ravno obratni. Največje potrebne pretoke je dala metoda Borelija, sledila je metoda Forcheimerja, najmanjše pretoke pa je dala metoda Cooperja in Jacoba. Takšni rezultati nakazujejo, da je "pravilni" koeficient prepustnosti za te tri metode različen. Analizo v programu MODFLOW sem naredil na podlagi povprečnih koeficientov prepustnosti. Rezultati so najbolj podobni rezultatom po metodi Forcheimerja. Numerični model je bil narejen za primer upoštevanja tesnilne zavese in primer brez upoštevanja tesnilne zavese. V primeru, da tesnilne zavese ne upoštevamo, moramo črpati od 5 do 30 % več vode, kakor če tesnilno zaveso upoštevamo.

Ker je bil sistem vodnjakov že izgrajen in v funkciji, so bile na voljo meritve, s pomočjo katerih sem lahko primerjal rezultate izračunov z dejanskim stanjem. Zaradi dejstva, da skupina vodnjakov ni nikoli delovala v celoti ampak so črpale posamezne skupine vodnjakov, znižanj pri delovanju celotne skupine vodnjakov nisem mogel primerjati. Zato sem si izbral dve opazovani obdobji, v katerih so delovali samo nekateri vodnjaki. Najprej sem meritve primerjal z rezultati analitičnih metod. Ponovno sem v računskih modelih uporabil povprečne koeficiente prepustnosti. Če vzamemo v obzir, da analitični modeli niso upoštevali vpliva tesnilne zavese in izgub v vodnjaku, lahko razberemo, da so najboljši rezultati dobljeni po metodi Forcheimerja. Drugo najboljše ujemanje je dala metoda Borelija, najslabše rezultate pa je dala metoda Cooperja in Jacoba. To velja za obe opazovani obdobji. Tudi pri uporabi koeficientov prepustnosti, dobljenih po posamezni metodi, da najboljše rezultate metoda Forcheimerja. Metoda Borelija da v tem primeru premajhna znižanja, metoda Cooperja in Jacoba pa prevelika znižanja. Pri primerjavi rezultatov numeričnega modela z meritvami se izkaže, da se rezultati v nekaterih točkah ujemajo, v drugih pa so kar precejšnja odstopanja. V ta namen sem numerični model umeril tako, da sem s preizkušanjem spreminjal koeficiente prepustnosti. To sem izvajal, dokler se rezultati programa niso zadovoljivo ujemali z rezultati meritev. Izkaže se, da razporeditev področij z enako prepustnostjo, kot je predstavljena v zasnovi, ni popolnoma upravičena. Faktor, ki je imel pri umerjanju veliko vlogo, je bila vertikalna prepustnost zemljine. Bolje je, če za razmerje  $\frac{k_v}{k_h}$  vzamemo vrednost 1/100 namesto 1/10. Novo razporeditev koeficientov prepustnosti pa bi težko primerjali s tisto, ki sem jo predpostavil na začetku izračuna. Če bi naredili oceno prepustnosti kot povprečne vrednosti za celotno gradbeno jamo, da najboljšo oceno prepustnosti metoda Forcheimerja. Metoda Cooperja in Jacoba da premajhne prepustnosti, metoda Borelija pa prevelike. Izkaže se, da imata zahodna in severovzhodna stran gradbene jame večjo prepustnost kot središnji del jame.

Po izračunu potrebnih črpalnih količin in znižanj je potrebno preveriti sistem odvodnjavanja glede možnosti porušitev. Pri preverjanju hidravličnih porušitev sem se oslanjal na predpise v EC 7. Preverjal sem možnost porušitve zaradi vzgona, hidravličnega loma tal in zaradi erozije. Pri preverjanju porušitve zaradi vzgona sem rezultat podal v potrebni karakteristični teži objekta na kvadratni meter temelja. To sem storil zato, ker nisem imel podatkov o objektu. Pri preverjanju nevarnosti zaradi hidravličnega loma tal se izkaže, da ni nevarnosti. Pri preverjanju porušitve zaradi erozije se izkaže, da ne smemo črpati več kot 260 l/s za celotno gradbeno jamo. Dosežemo lahko znižanja 1,5 oz 2 m in 2,5 oz 3m, brez da bi tvegali porušitev zaradi erozije. Vodnjaki morajo biti izvedeni tako, da ne povzročajo porušitev tal in prevelikih pomikov. V ta namen je treba upoštevati vsa možna mejna stanja porušitev in mejna stanja uporabnosti, ki jih določa Evrokod. Napačno izveden sistem odvodnjavanja lahko povzroči lokalne ali globalne posledice, ki lahko povzročijo veliko škodo.

V nalogi je bil predstavljen izračun znižanj gladine podtalne vode pri črpanju iz skupine črpalnih vodnjakov. V modelu so bili uporabljeni koeficienti prepustnosti dobljeni na podlagi črpalnih preizkusov. Rezultati so bili dobljeni na podlagi analitičnih in numeričnih metod. Obe metodi izračuna sta dali zadovoljive rezultate. Pri analitičnih izračunih je najboljše ujemanje z meritvami izkazala metoda Forcheimerja. Dobre rezultate analitičnih metod lahko pripišemo relativno enostavni sestavi zemljine opazovanega področja. Umerjeni numerični model pa nam lahko precej jasno prikaže, kakšni tokovi podzemne vode so prisotni v tleh. Na podlagi izvedenega črpalnega preizkusa in analize le tega je mogoče na tem področju zasnovati primerne sisteme odvodnjavanja.

**VIRI**

- Avakumović, D. 1991. Hidrotehničke melioracije. Odvodnjavanje. Beograd, Građevinska knjiga: 309 str.
- Cashman, P. M., Preene, M. 2001. Groundwater lowering in construction: a practical guide. London, Spon Press: 476 str.
- Dragomir, L. (ur.). 1966. Tehničar: građevinski priručnik 3. 4. izd. Beograd, Građevinska knjiga: 1456 str.
- Filipović, B. 1980. Metodika hidrogeoloških istraživanja I. Beograd, Naučna knjiga: 439 str.
- INI d.o.o. 2007. Geotehnično poročilo. IMOS-G, nepremičnine in inženiring, d.o.o.: 13 str.
- IRGO. 2011. Končno poročilo o izvedbi hidrogeoloških preiskav z namenom določitve hidrogeoloških pogojev gradnje gradbene jame na območju Tobačne tovarne v Ljubljani. IMOS-G, nepremičnine in inženiring, d.o.o.: 79 str.
- Kruseman, G. P., Ridder, N. A. de, Verweij, J.M. 1994. Analysis and evaluation of pumping test data. 2nd edition. Wagenigen, ILRI: 377 str.
- Logar, J., Majes, B. 2010. Vzdrževanje nivoja talne vode pod dnom gradbene jame. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 17 str.  
[http://ucilnica1011.fgg.uni-lj.si/file.php/27/talna\\_voda.pdf](http://ucilnica1011.fgg.uni-lj.si/file.php/27/talna_voda.pdf) (Pridobljeno 20. 4. 2013.)
- Odong, J. 2007. Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. Journal of American Science vol. 3, 3: 54-60.
- Petrović, S. V. 1956. Snabdevanje naselja vodom. Beograd, Udruženje studenata građevinske tehnike Beograd: 375 str.
- Powers, J. P., Corwin, B. A., Schmall, P. C., Kaeck, W. E. 2007. Construction dewatering and groundwater control: new methods and applications. 3rd ed. Hoboken (New Jersey), John Wiley & Sons: 638 str.
- Reilly, T. E. System and boundary conceptualization in ground-water flow simulation. V: U.S. Geological Survey. Techniques of Water-Resources Investigations. Book 3. Applications of Hydraulics. USGS: 30 str.  
[http://pubs.usgs.gov/twri/twri-3\\_B8/pdf/twri\\_3b8.pdf](http://pubs.usgs.gov/twri/twri-3_B8/pdf/twri_3b8.pdf) (Pridobljeno 29. 5. 2013.)
- SIST EN 1997-1: 2005. Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1.del: Splošna pravila.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G. 1996. Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. New York idr., John Wiley & Sons: 549 str.