

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
ĢEOGRĀFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE
ĢEOLOĢIJAS NODAĻA
LIETIŠKĀS ĢEOLOĢIJAS KATEDRA

GRUNTSŪDENS PLŪSMAS MODELĒŠANA BALTEZERS UN
BALTEZERS II ŪDENSĢŪTŅU APKĀRTNĒ
MAĢISTRA DARBS

Autors: Alise Babre

Stud. apl. ab08478

Darba vadītājs: Dr. ģeol., doc., Aija Dēliņa

RĪGA 2010

ANOTĀCIJA

Maģistra darba pētījumā veikta hidroģeoloģiskā modeļa izveide Baltezers un Baltezers II ūdensgūtnu apkārtnē. Ūdensgūtnu teritorijā raksturīgi sarežģīti hidroģeoloģiskie apstākļi, kas saistīti ar pazemes ūdens iegūvi no Kwartāra ūdens kompleksa centralizētajai ūdens apgādei un gruntsūdens mākslīgo papildināšanu no virszemes ūdens objektiem. Pētījuma teritorija aptver 20 km² lielu platību, kurā iekļauta visa aktīvā ūdens apmaiņas zona. Hidroģeoloģiskā modeļa izveidei izmantota PAIC izstrādātā datorprogramma HiFiGeo v3.5.

Pētījuma rezultātā tika izveidots kalibrēts hidroģeoloģiskais modelis, kurš izmantots divu situāciju modelēšanai, pie mainīgiem ūdensgūtnu režīmiem. Balstoties uz modelētajiem rezultātiem ir veikti secinājumi par īpatnībām, kas saistītas ar gruntsūdens plūsmu modeļu izveidi.

Atslēgas vārdi: pazemes ūdens, hidroģeoloģiskā modelēšana, HiFiGeo, Baltezers, gruntsūdeņi, gruntsūdens plūsmas.

ANNOTATION

Hydrogeological model for surrounding area of Baltezers and Baltezers II well fields was carried out during the Master's paper study. Surrounding is estimated to have complex hydrogeological conditions, which is related to groundwater extraction from the Quaternary water complex for water supply and artificial recharge of groundwater from surface water bodies. The study covers area of 20 km² and it covers whole active water exchange zone. The hydrogeological model was developed using computer program HiFiGeo v3.5. created by PAIC.

The study resulted in a calibrated model, which was used for two situation modeling, at variable well field regimes. Resulting in conclusions of characteristics and approaches to unconfined groundwater flow modeling.

Keywords: groundwater, hydrogeological modeling, HifiGeo, Baltezers, unconfined groundwater, unconfined groundwater flows

SATURS

Darbā izmantotie apzīmējumi.....	6
IEVADS	7
1. MATERIĀLI UN METODEDES	9
1.1. Pētījumu teritorijas raksturojums.....	9
1.1.1. Teritorijas fiziogēogrāfiskais raksturojums	9
1.1.2. Teritorijas ģeoloģiskā un hidroģeoloģiskā uzbūve	11
1.1.2.1. Kvartāra nogulumu stratigrāfija.....	12
1.1.2.2. Pamatiežu stratigrāfija un litoloģiskais sastāvs	13
1.1.2.3. Teritorijas hidroģeoloģiskā uzbūve.....	14
1.1.4 Baltezera atradnes pazemes ūdens režīms un bilance.	16
1.1.4.1. Baltezera atradnes eksploatācijas vēsture un izmantošanas apjomi	16
1.1.4.2. Klimatiskais raksturojums un pazemes ūdens līmeņu gada svārstības.....	17
1.1.4.3. Gruntsūdens bilances galvenie elementi.....	19
1.2. Datu ievākšanas metodika	24
1.3. Modeļa sagatavošanas procedūra	25
1.3.1. Modelēšanas programmatūras un to papildiespēju izvēle	26
1.3.2. Konceptuālā modeļa sagatavošana un ģeoloģiskā nenoteiktība teritorijā	27
1.3.3. Modeļa struktūras izveide.....	28
1.3.4. Robežnosacījumu definēšana	31
1.3.5. Modeļa kalibrācija	34
2. DARBA TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS	37
2.1. Hidroģeoloģisko plūsmu aprēķinu pamatvienādojumi.....	37
2.2. Matemātiskie modeļi un simulācijas	38
2.3. Robežnosacījumu definēšana, matemātisko modeļu kalibrācija un verifikācija	40
2.4. Vizualizāciju iespējas un to nozīme ģeoloģiskajos datormodeļos.....	42
3. MODELĒŠANAS REZULTĀTI UN DISKUSIJA.....	44
3.1. Plūsmas modeļa iegūtie rezultāti	44
3.1.1. Stacionāra līmeņu sadalījuma modeļa iegūtie rezultāti	44
3.1.2. Situāciju modeļu iegūtie rezultāti	47
3.2. Modeļa jutīgās teritorijas un jutīgie ievades parametri	49
3.3. Modeļa rezultātu apspriešana	51
3.4. Modeļa tālākā attīstība un izmantošanas iespējas.....	54
SECINĀJUMI	57

Pateicības	58
Izmantotā literatūra.....	59
PIELIKUMI.....	63
1. pielikums. Griezuma līnija A-B.....	63
2. pielikums. Modeļa ģeoloģiskais griezum pa līniju A-B.....	63
3. pielikums. Baltijas ledus ezera nogulumu virsma modeļa laukumā, m.v.j.l.....	64
4. pielikums. Baltijas ledus ezera nogulumu biezums modeļa laukumā, m.	64
5. pielikums. Urbumi, kuros konstatēti māla starpslaņi Kvartāra ūdens horizontā.....	65
6. pielikums. Modeļa laukumā limnoglaciālo nogulumu biezums, m.....	65
7. pielikums. Modeļa laukumā glaciālo nogulumu ieguluma dziļums, m.v.j.l.	66
8. pielikums. Subkvartāra virsmas ieguluma dziļums modeļa laukumā, m.v.j.l.	66
9. pielikums. Ūdens padeve infiltrācijas baseinos, pa mēnešiem, m ³	67
10. pielikums. Eksploatācijas urbumu vidējie parametri.....	68
11. pielikums. Novērojumu urbumi modeļa laukumā, kuros veikti mērījumi 2008.gadā	69
12. pielikums. Maksimālās novērotās GŪL svārstības 2008. gadā.....	69
13. pielikums. Minimālās novērotās GŪL svārstības 2008. gadā.....	70
14.pielikums. Aprēķinātie gruntsūdeņu bilances lielumi 2008. gadam.....	70
15. pielikums. Modeļa režģim izveidotās virsmas, slāņi un slāņos imantotie materiāli.....	71
16. pielikums. Modeļa virsmas diskretizācija.....	72
17. pielikums. Aprēķinātie infiltrācijas apjomi infiltrācijas baseinos, pēc to apjomu kategorijām.....	73
18. pielikums. Modeļu aprēķinātie un novērotie vidējie GŪL monitoringa urbumos.....	74
19. pielikums. GŪL sadalījums situāciju modelim ar divkaršu ūdensgūtņu jaudas palielināšanos.....	75
20. pielikums. GŪL sadalījums situāciju modelim ar divkaršu ūdensgūtņu jaudas palielināšanos.....	75

Darbā izmantotie apzīmējumi

GMP – gruntsūdens mākslīgā papildināšana;

GŪL – gruntsūdens līmenis;

LVĢMC – Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs;

PAIC – Procesu Analīzes un Izpētes Centrs;

PUMa - ESF aktivitātes „Cilvēkresursu piesaiste zinātnei” projekts „Starpnozaru zinātnieku grupas modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem,” projekta nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060;

PŪL – Pjezometriskais ūdens līmenis;

RN – robežnosacījumi;

RŪ – Rīgas ūdens;

VĢD – Valsts Ģeoloģijas dienests.

IEVADS

Pazemes ūdeņi ir svarīgākais atjaunojamais dzeramā ūdens resurss. Tādēļ to apjomu un kvalitātes ilgtspējīgai apsaimniekošanai ir svarīgi apzināt pazemes ūdeņu apriti un atjaunošanās kārtību. Specializētas datorprogrammas jau vairākus gadu desmitus tiek izmantotas pazemes ūdens aprites modeļu izveidē. Skaitliskās modelēšanas metodes ir nozīmīgs rīks dažāda mēroga modeļu sagatavošanā. Ir dažādas modelēšanas pieejas, kas mainās no modeļa mēroga un dominējošajiem ģeoloģiskajiem un hidroloģiskajiem apstākļiem. Gruntsūdeņi ir bezspiediena pazemes ūdeņi, kam ir tieša saskarsme ar virszemes infiltrāciju un virszemes ūdens objektiem, tādēļ, salīdzinot ar spiedienūdeņu modelēšanu, gruntsūdens modelēšanā lielāka nozīme ir virszemes mainīgo vides un reljefa apstākļu precīzam atainojumam.

Latvijas teritorijā gruntsūdeņi, galvenokārt, atrodas kvartāra nogulumos un veido nozīmīgu kvartāra ūdens kompleksa daļu. Latvijas teritorijā kvartāra ūdens horizonts ir visplašāk izmantotais pazemes ūdens avots decentralizētajā ūdens apgādē. Vairākās pilsētās centralizētā ūdens apgāde tiek nodrošināta no kvartāra ūdens kompleksa, tajā skaitā, Rīga un Daugavpils (Gavena un Levina, 2000; Buzajevs, 2001). Rīgas rajons ir ļoti bagāts ar dzeramajiem gruntsūdens resursiem, kas lielākoties atrodas Baltezera – Remberģu – Zaķumuižas iecirknī (Levina u.c., 2000).

Pētījumu teritorija izvēlēta Baltezera pazemes ūdens atradnes apkārtnē, kas ir lielākā atradnes iecirkņa daļa. Pētījumu teritorijas izvēle tiek pamatota ar apjomīgajiem iepriekš veiktajiem hidroģeoloģiskajiem pētījumiem, kā arī apjomīgo gruntsūdens līmeņu novērojumu tīklu un tajos veikto novērojumu biežumu.

Pētījums veikts pazemes ūdeņu aktīvās ūdens apmaiņas zonas plūsmu modelēšanai. Pētījumā lielākais uzsvars likts uz kvartāra ūdens kompleksa plūsmu detalizētu atainošanu un tā bilances elementu noteikšanu.

Maģistra darba **mērķis** ir veikt hidroģeoloģisko apstākļu noteikšanu ūdensgūtņu Baltezers un Baltezers II teritorijā, galvenokārt, gruntsūdens plūsmas virzienus, barošanās un atslodzes apstākļus, izmantojot matemātiskās modelēšanas metodi.

Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi **uzdevumi**:

- izveidot hidroģeoloģisko struktūru jeb konceptuālo hidroģeoloģisko modeli no Zemes virsmas līdz vidusdevona Narvas horizontam;
- izveidot skaitlisko hidroģeoloģisko modeli ūdensgūtņu Baltezers un Baltezers II apkārtnē izmantojot 2008. gada apstākļus;
- veikt izveidotā skaitliskā modeļa kalibrāciju un noteikt nezināmos parametrus modeļa

kalibrācijas procesā;

- izveidot situāciju modeļus pie mainīgiem ūdens atsūkņēšanas apjomiem, kā arī pēc gruntsūdens mākslīgās papildināšanas pārtraukšanas;
- izstrādāt tālākās modeļa attīstības iespējas un pētījumu virzienu ieteikumus.

Baltezera pazemes ūdens atradnes hidroģeoloģiskā skaitliskā modeļa izveidošanai izmantota PAIC izstrādātā HiFiGeo 3.5 galīgo elementu filtrācijas modelēšanas datorprogramma (PAIC, 2002).

Maģistra darbā tika uzstādīti arī vairāki jautājumi, kurus modeļa izstrādes gaitā plānots noskaidrot:

- vai starp Gaujas un Kwartāra ūdens horizontu noteik pārtece;
- cik liela ir katra pazemes ūdens bilances elementa ietekme kopējā gruntsūdens bilancē.

Maģistra darbs izklāstīts 3 nodaļās un 11 apakšnodaļās. Maģistra darbs sastāv no 62 lapaspusēm. Tekstā ir ievietoti 20 attēli, 9 tabulas un 10 vienādojumi. Darbam pievienoti 20 pielikumi. Maģistra darba izstrādē izmantoti 25 publicētie avoti, 26 nepublicētie un 1 interneta resurss.

Maģistra darbs tiek izstrādāts ESF aktivitātes „Cilvēkresursu piesaiste zinātnei” projekta „Starpnozaru zinātnieku grupas modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem,” projekta nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060 ietvaros.

1. MATERIĀLI UN METODES

Šajā nodaļā izklāstīts materiāls par maģistra darbā pētījumu teritorijas fiziogeogrāfisko novietojumu, ģeoloģisko uzbūvi, dominējošiem hidroģeoloģiskajiem apstākļiem un teritorijas apsaimniekošanas apjomiem. Darba izstrādē nepieciešamā materiāla iegūšanas un apstrādes metodes apskatītas 1.2. nodaļā. Hidroģeoloģiskā datormodeļa izstrādes gaita secīgi aprakstīta 1.3. nodaļā.

1.1. Pētījumu teritorijas raksturojums

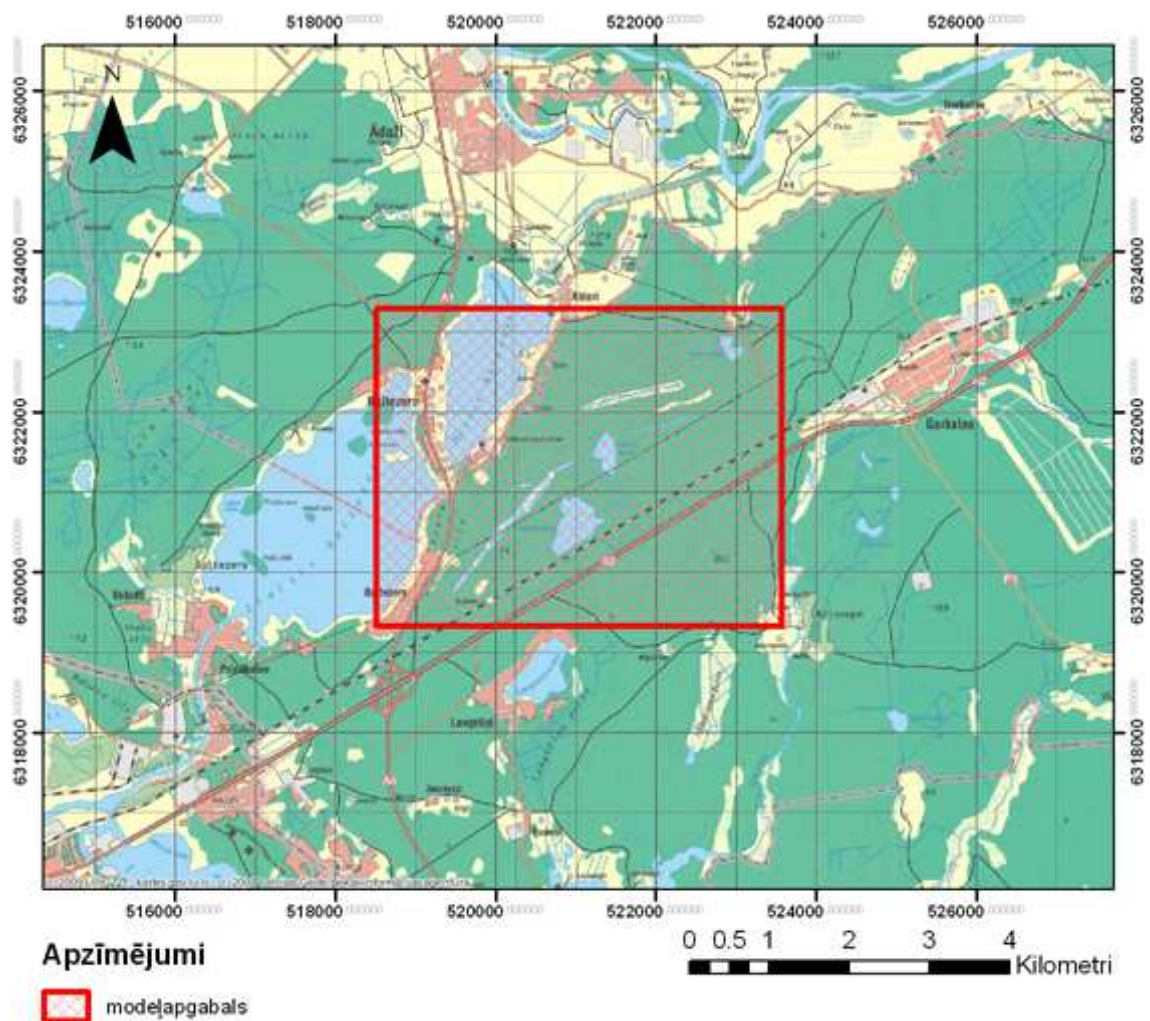
1.1.1. Teritorijas fiziogeogrāfiskais raksturojums

Baltezera apkārtnē pazemes ūdeņi centralizētajā ūdensapgādē tiek izmantoti jau kopš 1904. gada. Pašreiz Baltezera pazemes ūdens atradnē tiek izmantotas trīs ūdensgūtnes – Baltezers, Baltezers I un Baltezers II. Tā kā visas trīs ūdensgūtnes ir vienas pazemes ūdens atradnes „Baltezers” robežās, tad to ietekmes zonas pārklājas un plašāka mēroga pētījumos ūdensgūtnes tiek aplūkotas kopā (Buzajevs u.c., 2002a).

Pazemes ūdens atradne "Baltezers" atrodas Piejūras zemienes dabas rajonā, Vidzemes piekrastes apvidus zonā. Administratīvi teritorija pieder Rīgas rajonā esošajam Garkalnes novadam, kur ziemeļu daļā tas robežojas ar Ādažu pagasta teritoriju. Atradnes teritoriju rietumos norobežo Rīgas – Tallinas lielceļš, dienvidos Rīgas – Valkas dzelzceļš, bet ziemeļos – Gaujas upe (1.1. attēls).

Reljefs visā ūdensgūtnes teritorijā ir relatīvi līdzens, reljefa absolūtās atzīmes svārstās no 5 līdz 15 m v.j.l., kur vietām to saposmo zemas kāpu grēdas ar plašām, dažviet pārpurvotam ieplakām (Buzajevs u.c., 2002a).

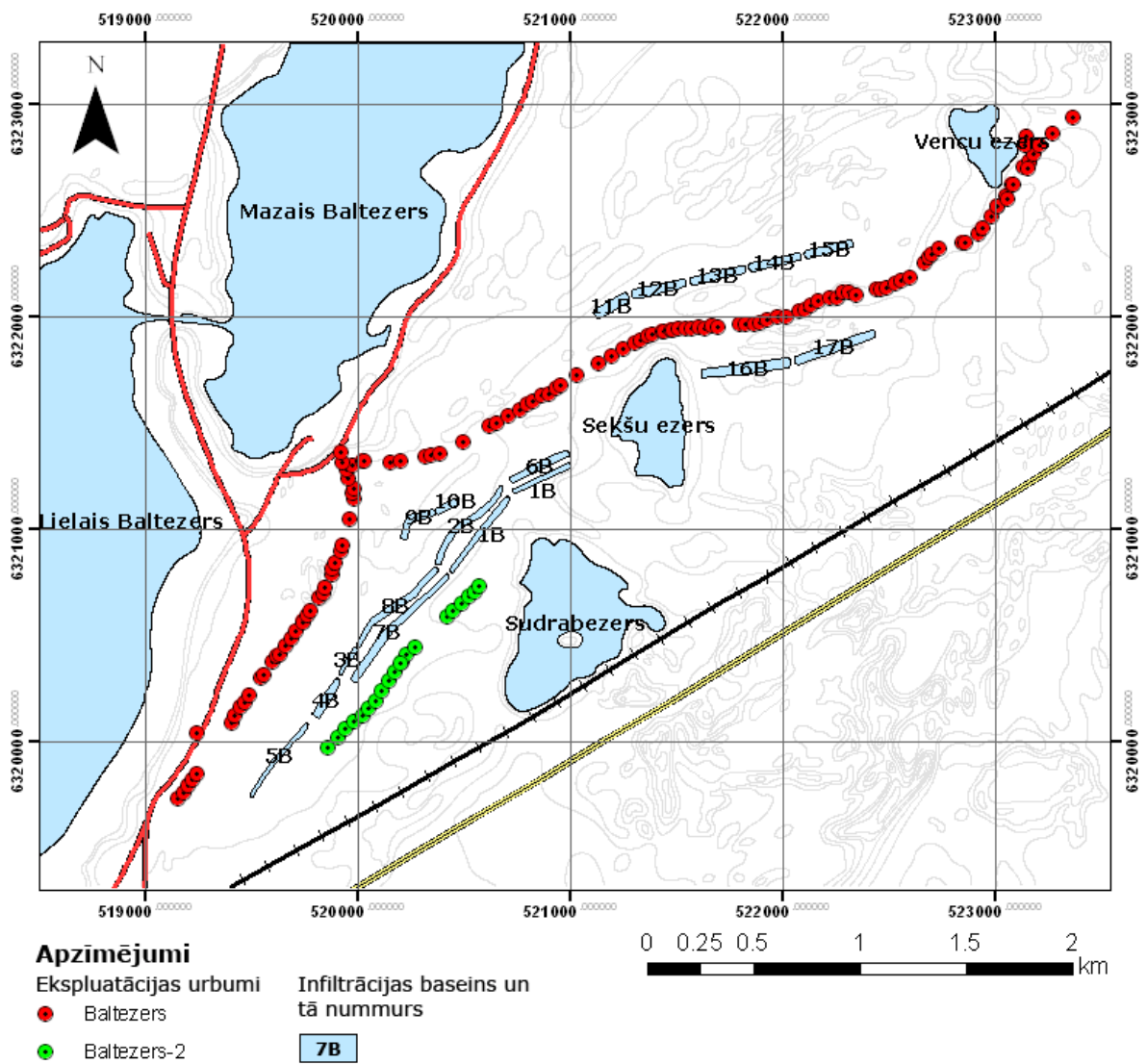
Maģistra darbā izstrādātais hidroģeoloģiskais skaitliskais modelis neaptver visu Baltezers atradnes teritoriju austrumu daļā, bet dienvidu daļā atrodas ārpus atradnes robežām. Modeļa laukumā ietilpst ūdensgūtnes Baltezers un Baltezers II. Modeļa laukums veido regulāru taisnstūri. Pa horizontālo asi modeļa laukuma garums ir 5 km, bet pa vertikālo asi laukuma platums sastāda 4 km. Modelī ietvertā teritorija sastāda 20 km² laukumu. Pētījumu teritorijas laukuma stūru koordinātes LK-S92 sistēmā atrodas: X minimālais: 518505; Y minimālais: 6319325; X maksimālais: 523571; Y maksimālais 6323290 (1.1. attēls).



1.1. attēls. **Pētījumu teritorijas novietojums** (sagatavojsi autore, par pamatni izmantojot TOPO 50K satelītkarte)

Pētījumu teritorijā reljefa augstuma atzīmes svārstās no 9 m z.j.l. līdz 30 m v.j.l. Zemākais teritorijas reljefa punkts atrodas Mazā Baltezera gultnē, bet reljefa pacēlums atrodas teritorijas dienvidu daļā, kur modeļa teritorijā atrodas augstākās kāpu grēdas.

Pētījumu teritorijā ir vairākas lielas ūdenstilpnes - Lielais un Mazais Baltezers, Sudrabezers (Sidrabezers), Venču un Sekšu ezers (Seķītis), kā arī 17 mākslīgi veidotie infiltrācijas baseini (1.2. attēls). Visu teritoriju aizņem meži, galvenokārt, priežu ar dažādu krūmāju pamežu (Buzajevs u.c., 2002b). Ņemot vērā ūdens atradnes izmantošanu centralizētajai ūdens apgādei, ūdensgūtņu teritorijā saimnieciskā darbība nenotiek.



1.2. attēls. Hidroģeoloģiskā modeļa laukums ar ezeru, infiltrācijas baseinu un ekspluatācijas urbumu rindām (sagatavojusi autore, izmantojot TOPO 10K PSRS)

1.1.2. Teritorijas ģeoloģiskā un hidroģeoloģiskā uzbūve

Baltezera pazemes ūdens atradnes teritorijas griezuma augšējo daļu veido dažāda biezuma un ģenēzes augšpleistocēna un holocēna nogulumu. Subkvartāra virsu veido augšdevona augšgaujas D_{3gj2} apakšpasvītas terīgēnie ieži. Zem augšgaujas D_{3gj2} apakšsvītas tiek izdalīta augšdevona D_{3gj1} apakšgaujas apakšsvīta un vidusdevona Burtnieku D_{2br} , Arukilas D_{2ar} un Narvas D_{2nr} svītas. Zemāk iegulošie nogulumu nav apskatīti, jo dziļāk iegulošie Vidusdevona Pērnavas svītas D_{2pr} nogulumu satur mineralizētos pazemes ūdeņus un nav iekļauti aktīvās ūdens apmaiņas zonā.

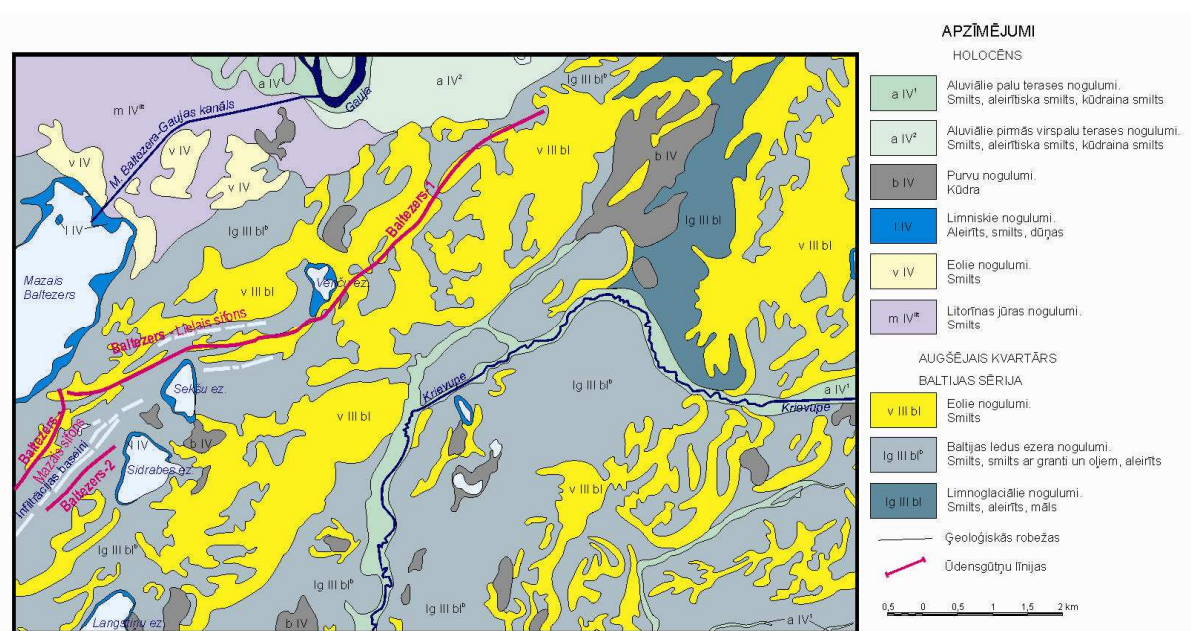
1.1.2.1. Kvartāra nogulumu stratigrāfija

Kvartāra nogulumu biezums Baltezers pazemes ūdens atradnes teritorijā svārstās no 20 līdz 50 m (Buzajevs u.c., 2002b). Modeļa laukumā pamatiežu nogulumu ieguluma augstākais punkts atrodas laukuma dienvidu daļā un atrodas 42 m z.j.l., bet dziļākais punkts 69 m z.j.l. atrodas laukuma rietumu daļā zem Lielā Baltezers. Attiecīgi, pamatiežu virsas ieguluma dziļums pieaug ziemeļrietumu virzienā (1 un 2. pielikums).

Lielāko kvartāra nogulumu griezuma daļu veido augšpleistocēna Latvijas svītas nogulumi. Griezuma augšdaļā vietām izplatīti arī Holocēna eolie, marīnie un purvu nogulumi.

Kvartāra griezumā plaši izplatīti nogulumi, kas veido pārtrauktus slāņus pa visu pētījumu teritoriju (1.3. attēls), tie ir eolie vQ_4 ; limniskie lQ_4 ; purvu bQ_4 , glaciofluviālie starpmorēnu nogulumi lg, fQ_2+Q_3 ; marīno, limnisko un Latvijas leduslaikmeta beigu posma Baltijas ledus ezera apvienotie nogulumi $mQ_4+lQ_4+lgQ_3ltvb$. Kvartāra segā ir izsekojamas trīs stratigrāfiskās vienības, kas veido vienlaidus slāņus pa pētāmo teritoriju:

- Baltijas ledus ezera glaciolimniskie nogulumi lgQ_3ltvb ;
- Latvijas leduslaikmeta glaciolimniskie nogulumi lgQ_3ltv
- Latvijas apledošanas glaciālie nogulumi gQ_3ltv .



1.3. attēls. Kvartāra nogulumu karte Baltezers pazemes ūdens atradnes teritorijā (Prols u.c., 1998)

Marīno, limnisko un Latvijas leduslaikmeta beigu posma Baltijas ledus ezera apvienoto nogulumu slānis $mQ_4+lQ_4+lgQ_3ltvb$ izplatīts visā teritorijā, taču, faktiski, atbilst Baltijas ledus ezera glaciolimnisko nogulumu lgQ_3ltvb slānim, jo šāda stratigrāfiskā vienība sastopama tikai noteiktā periodā ierīkoto urbumu interpretācijā.

Baltijas ledus ezera glaciolimniskie nogulumi lgQ_3ltvb veido pirmo droši izsekojamo nogulumu slāni visā modeļa laukumā un izplatīti arī plašākā teritorijā ārpus modeļa laukuma. Šie nogulumi izplatīti no Zemes virsas līdz apmēram 12 m z.j.l. (3. pielikums) Vidējais slāņa biezums ir 25 m, maksimālais līdz pat 42 m (4. pielikums). Šos nogulumus veido sīkgraudaina līdz rupjgraudaina smilts, grants un oļi, dominē smalka un vidējgraudaina smilts. Grants nogulumi fiksēti tikai trīs urbumos, kas izvietoti pie Venču ezera (1.2. attēls) (LVĢMC DB „Urbumi”, Bez dat.). Zem smilts nogulumiem lielā teritorijas daļā izplatīti dažāda biezuma mālainie nogulumi, t.i., mālaina smilts, mālsmilts, smilšmāls un māls. Māls konstatēts vairākos urbumos visā Baltezers ekspluatācijas urbumu rindas garumā, visbiežāk konstatēts starp 5. infiltrācijas baseinu un Lielo Baltezeru (LVĢMC DB „Urbumi”, Bez dat.) (5. pielikums).

Latvijas leduslaikmeta glaciolimniskie lgQ_3ltv nogulumi konstatēti visā modeļa teritorijā un ieguļ no apmēram 12 – 30 m. z.j.l. un veido 8 – 30 m biezu slāni (LVĢMC DB „Urbumi”, Bez dat.). Mazākais slāņa biezums novērojams modeļa laukuma dienvidaustrumu daļā, bet maksimālais biezums atrodas modeļa laukuma centrālajā daļā (6. pielikums). Latvijas leduslaikmeta glaciolimniskos nogulumus veido smalka līdz vidēji graudaina smilts. Latvijas leduslaikmeta glaciolimniskajos nogulumos, plašāk kā augstāk esošajā Baltijas ledus ezera nogulumu slānī, izplatīti mālainie nogulumi, t.i., mālaina smilts, mālsmilts, smilšmāls un māls, galvenokārt, māls, kas konstatēts, visos Baltezers II ekspluatācijas urbumu rindas urbumos, kā arī Baltezersa ūdensgūtnes ekspluatācijas urbumu rindas rietumu pusē (5. pielikums).

Latvijas apledošanas glaciālie nogulumi gQ_3ltv konstatēti 33 urbumos modeļa teritorijā (LVĢMC DB „Urbumi”, Bez dat.). Slānis iztrūkst tikai teritorijas centrālajā un austrumu daļā, kur zem glaciolimniskajiem nogulumiem atrodas augšdevona augšgaujas apakšsvītas mālainie nogulumi. Šie nogulumi ieguļ, apmēram, 29 - 47 m. z.j.l. (7. pielikums), to vidējais biezums ziemeļrietumu virzienā pieaug līdz 25 m. Nogulumus veido morēnas smilšmāls, bet atsevišķos urbumos konstatēts arī māls, mālsmilts un vidējgraudaina smilts (LVĢMC DB „Urbumi”, Bez dat.).

1.1.2.2. Pamatiežu stratigrāfija un litoloģiskais sastāvs

Amatas svītas nogulumi pētījuma teritorijā ir erodēti, tādēļ zem Kvartāra nogulumiem ieguļ D_3gj svītas nogulumi. Gaujas svītas nogulumus veido 14,4 – 94 m biezs slānis, kas pilnā griezumā izsekojams teritorijas dienvidu daļā vietām sasniedzot 94 m. Ziemeļu daļā dažādi erodētas pakāpes slānis ir 14,4 – 78 m biezs. Gaujas svītu veido gaiši brūni līdz gaiši pelēki, sīki un sīki vai vidēji graudaini smilšakmeņi. Gaujas svītā tiek izdalītas divas apakšsvītas -

Augšgaujas un Apakšgaujas, ko atdala 6 – 18 m biezs mālains aleirolītisks nogulumu slānis, kurš veido Gaujas svītas apakšpasvītas virsmu (Buzajevs u.c., 2002a).

Vidusdevona Burtnieku svītu veido 54,0 – 63,8 m biezs nogulumu slānis. Apakšējā daļa sastāv, galvenokārt, no smilšakmeņiem, bet augšējo kārtu veido mālains aleirolītiski smilšakmeņi. Smilšakmeņu sastāda apmēram 13 – 75% no svītas biezuma, bet atsevišķo slānīšu biezums ir 5 – 8 m, vietām 10 – 15 m (Buzajevs u.c., 2002a). Svītas augšējā daļa sastāv no mālains aleirolītiskiem iežiem ar smalka un sīkgraudaina smilšakmens starpkārtām. Šī slāņa biezums svārstās no 23,0 līdz 35,2 m. Tajā esošo smilšakmens slāņu biezums svārstās no 2,0 – 11,4 m (Buzajevs u.c., 2002a).

Vidusdevona Arukilas svītas D_{2ar} nogulumu slāņu biezums vidēji ir 50 – 60 m. Šo nogulumu minimālais biezums modeļa laukumā ir 44,5, bet maksimālais 69 m. Svītas nogulumus griezuma augšējā un vidējā daļā veido smilšakmeņi, un virs griezuma smilšainās daļas izsekojami mālains aleirolītiski ieži. Smilšakmeņi sastāda 40 – 50 % no slāņa biezuma, galvenokārt, tie ir smalki un sīkgraudaini, nereti arī mālains (Buzajevs u.c., 2002a).

Vidusdevona Narvas svītas D_{2nr} nogulumi iegūļ horizontāli aptuveni 220 m dziļumā. Tos veido galvenokārt, merģelis (LVĢMC DB „Urbumi”, Bez dat.).

1.1.2.3. Teritorijas hidroģeoloģiskā uzbūve

Kvartāra ūdens horizonti pētāmajā apkārtņē pārsvarā ir bezspiediena ūdens horizonti, t.i., tie nav pārsegti ar mazcaurlaidīgu iežu slāni. Baltezera apkārtņē gruntsūdeņi ir izplatīti Baltijas ledus ezera vidēji graudainās smiltīs un zemāk iegulošajās smalkgraudainajās limnoglaciālajās smiltīs. Kopējais smilšu slāņa biezums mainās no 45 līdz 60 m (Buzajevs u.c., 1997; LVĢMC DB „Urbumi”, Bez dat.). Gruntsūdens līmenis iegūļ vienu līdz trīs metrus no zemes virsas. Vidējais ūdeni saturošā slāņa biezums mainās no 41 līdz 48 m (Aņikejeva u.c., 1997). Baltijas ledus ezera smilts un smilts – grants nogulumiem piemīt labākā ūdens caurlaidība. Baltijas ledus ezera smiltis ir labi šķirotas, tādēļ to filtrācijas koeficients sasniedz 20 – 50 m/dnn un vidējā efektīvā porainība (n) raksturota kā 0,39 (Buzajevs u.c., 1997; Krutofala un Levins, 2006); smalkas līdz vidējas smilts filtrācijas koeficients (k) ir, apmēram, 45 m/dnn; rupjai un grantainai smiltij tas ir vairāk par 50 m/dnn (Aņikejeva, 1997).

Palielinoties labajām filtrācijas īpašībām un nogulumu biezumam, palielinās arī kvarāra ūdens kompleksa caurplūdes koeficients, kas ūdensgūtņu apkārtņē novērtēts kā 400 – 1700 m²/dnn, maksimālais caurplūdes koeficients raksturīgs ūdensgūtnes Baltezers II teritorijā, attiecīgi caurplūdes koeficients (km) tur sasniedz 1000 – 1700 m²/dnn, attiecīgi pieaug arī urbumu īpatnējais debīts, t.i., līdz 20 l/s (Aņikejeva u.c., 1997; Buzajevs u.c., 2002b; Buzajevs u.c., 1997; Gavēna un Levina, 2000; Krutofala un Levins, 2006).

Ūdens horizonta biezums ir mainīgs Baltezera un Baltezers II ūdensgūtnēm (1.1. tabula).

1.1. tabula

Baltezers un Baltezers II ūdensgūtnu raksturojums (Gavena un Levina, 2000)

Ūdensgūtnes nosaukums	Statiskais līmenis no zemes virsmas	Ūdens horizonta biezums
Baltezers Q	0.0 – 11.0	37.5 - 48.6
Baltezers II Q	2.7 – 6.2	28
Baltezers D3gj	6.3 – 8.5	75

Zem smilšainajiem nogulumiem atrodas ūdens mazcaurlaidīgais Baltijas morēnas smilšmāla un mālsmilts slānis, kā arī augšdevona Gaujas svītas māli un aleirolīti. Minētie nogulumi veido vienotu, vidēji 10 m biezu, vietām 2,4 līdz 31,6 m biezu sprosslāni, kas atdala Kvartāra un pirmskvartāra ūdens kompleksus. Atsevišķos, lokālos iecirkņos šā sprosslāņa nav, tādēļ minēto ūdens kompleksu ūdeņi ir hidrauliski saistīti (Buzajevs u.c., 2002a). Nosacīti var pieņemt, ka pārklājošo ūdens vāji caurlaidīgo nogulumu vertikālās filtrācijas koeficients ir 0,003 (Krutofala un Levins, 2007). Šis lielums precīzi nav zināms. Pēc literatūras datiem smilšmālu vertikālās filtrācijas koeficienta lielums svārstās ļoti plašā diapazonā – no 0,000001 m/dnn matricas plūsmas gadījumā līdz 1 m/dnn apsteidzošas plūsmas apstākļos pa plaisām un lokālām paaugstinātas caurlaidības zonām (Krutofala un Levins, 2007).

Pētījumu teritorijā zem kvartāra ūdens kompleksa atrodas Arukilas – Amatas D_2+D_3ar-am artēzisko ūdeņu kompleks. Pirmo spiedienūdeņu horizontu kompleksā veido Gaujas – Amatas D_3gj+am ūdens horizonts, tā līmenis Baltezera apkārtnē 1996. gadā bija aptuveni 5 m v.j.l. Plūsmas virziens, līdz ar to arī līmeņa kritumus, ir vērsts Rīgas virzienā. (Levina, 1999). Baltezera – Zaķumuižas teritorija ir Arukilas – Amatas ūdens kompleksa lokāls barošanās apgabals, sakarā ar ūdens kompleksa atrašanos tieši zem Kvartāra ūdens kompleksa. Tādēļ šeit novērojami salīdzinoši nelieli līmeņu pazeminājumi attiecībā pret citām Rīgas reģiona teritorijām. Pazeminājums Arukilas – Amatas kompleksā ir no 1 līdz 2 metriem, salīdzinoši citos Rīgas depresijas piltuves rajonos pazeminājums sastāda 5 līdz 7 metrus (Buzajevs u.c., 2002b).

Rīgas rajonā centralizētajā un decentralizētajā ūdensapgādē no artēziskajiem horizontiem pārsvarā tiek izmantoti Gaujas ūdens apakšhorizonta ūdeņi, kas iegūļ samērā nelielā dziļumā un ko raksturo lielāks ūdens nesējslāņa biezums, kā arī iegūstamais ūdens daudzums (Gavena un Levina, 2000). Lielāko horizonta daļu veido ūdeņi labi caurlaidīgie smilšakmeņi ar augstu caurplūdes koeficientu 400 – 600 m²/dnn. Augšgaujas D_3gj2 smilšakmeņu filtrācijas koeficients sastāda 13 m/dnn, bet apakšgaujas D_3gj1 smilšakmeņiem

15m/dnn (Buzajevs u.c., 2002a). Efektīvā porainība Gaujas svītas smilšakmeņiem tiek novērtēta kā 0,2 (Krutofala un Levins, 2007).

Burtnieku un Arukilas ūdens apakšhorizontu no Apakšgaujas atdala Burtnieku svītas augšdaļu veidojošais vāji caurlaidīgo mālaino iežu slānis, kuru biezums vietām mainās 3 – 35 m. Burtnieku un Arukilas ūdens apakšhorizontu filtrācijas koeficienti ir ievērojami mazāki kā Gaujas svītai, t.i., vidēji 1,2 m/dnn (Buzajevs u.c., 2002a).

Zem Arukilas svītas aptuveni 220 m dziļumā iegul ūdeni praktiski necaurlaidīgie Narvas svītas D_{2nr} nogulumi, kuri izolē Arukilas – Amatas ūdens kompleksu no Pērnavas ūdens horizonta D_{2pr} , kas jau satur mineralizētos pazemes ūdeņus (Buzajevs u.c., 2002a).

1.1.4 Baltezera atradnes pazemes ūdens režīms un bilance.

1.1.4.1. Baltezera atradnes ekspluatācijas vēsture un izmantošanas apjomi

Baltezera pazemes ūdens atradnes izmantošanas apjomi ievērojami mainījušies laika gaitā. Baltezera ūdensgūtnes pirmais sifonvads, kas nodrošināja 18 tūkst. m³/dnn dzeramā ūdens, tika izveidots 1904. gadā. Ūdensgūtne „Baltezers” pastāvīgi paplašinājās un ūdens ieguve pakāpeniski pieauga līdz 44 tūkst. m³/dnn 1935. gadā. Gruntsūdeņu dabiskie ekspluatācijas krājumi, izmantojot ūdens ieguvei urbumu rindu metodi, vairs nebija iespējami.

Lai palielinātu ūdens ieguvi, posmā no 1953. gada līdz 1965. gadam tika izveidota gruntsūdeņu krājumu mākslīgās papildināšanas sistēma (GMP), pievadot ūdeni no Mazā Baltezera. Paralēli tam, 1958. gadā tika ierīkota ūdensgūtne Baltezers I. Vēlāk, 1975. g. ierīkota ūdensgūtne Baltezers II. Kopējā ūdensgūtņu jauda 1950. gados palielinājās līdz 70 tūkst. m³/dnn, 1960. gados līdz 100 tūkst. m³/dnn. 1980. gados atsūknētā ūdens daudzums sasniedza 130 tūkst. m³/dnn, kad fiksēts maksimālais ūdens ieguves apjoms. Kopš 1990. gadiem kopējais pazemes ūdeņu patēriņš Rīgā ir pastāvīgi samazinājies (Krutofala un Levins, 2006), līdz ar to patreizējā gruntsūdeņu ieguve 2008. gadā Baltezera ūdensgūtnēs bija tikai ap 35 tūkst. m³/dnn (RŪ, 2009). 2006. gadā Baltezerā tika iegūti ap 45 tūkst. m³/dnn, kas nozīmē, ka šobrīd ļoti liela daļa no kopējiem gruntsūdeņu krājumiem netiek izmantota (Krutofala un Levins, 2006).

Centralizētajā ūdensapgādē Baltezera ūdensgūtnēs tiek iegūti kvartāra ūdens kompleksa gruntsūdeņi. Ievērojamais kvartāra nogulumu biezums un salīdzinoši viendabīgais sastāvs ir tie faktori, kas nosaka liela apjoma gruntsūdens krājumu veidošanos Baltezera apkārtnē. Saskaņā ar VGD veiktajiem pētījumiem kopējie akceptētie pazemes ūdeņu krājumi pazemes ūdens atradnei „Baltezers” ir 113 m³/dnn, ar nosacījumu, ka infiltrācijas baseinos tiek pievadīti 97 tūkst. m³/dnn. Saskaņā ar ūdens attīrīšanas stacijas „Baltezers” sniegto informāciju, Baltezera ūdensgūtņu maksimālā jauda ir 99 tūkst. m³/dnn (Dēliņa u.c., 2005).

Ņemot vērā to, ka tiek realizēta krājumu mākslīgā papildināšana no Mazā Balteзера, gruntsūdeņu stāvoklis teritorijā starp Lielo Baltezeru, Mazo Baltezeru, Sekšu un Venču ezeriem ir ievērojami pārveidots (Krutofala un Levins, 2006).

Baltezera pazemes ūdens atradnē, mākslīgā papildināšana tiek realizēta Baltezers un Baltezers II ūdensgūtnēm, Baltezers I ūdensgūtnēi 2008. gadā mākslīgā papildināšana netika veikta. Novērtējot ūdens bilanci ūdensgūtnēs pēc infiltrējamā ūdens atšķaidīšanās pakāpes, ar hidroģeoloģiskās modelēšanas metodi tika aprēķināts, ka lielākais infiltrējamā ūdens ieguldījums, t.i., 60-65% ir ūdensgūtnēi Baltezers II (Levins, 1998). No teritorijā esošajiem 17 GMP infiltrācijas baseiniem atradnē Baltezers tiek izmantoti 12 baseini. Infiltrācijas baseinu kopgarums ir 4 km, gultnes platums vidēji ir 20 - 30 m, bet katra atsevišķa baseina garums aptuveni 200 – 400 m (Levina u.c., 1986). Dēļ tā, ka no mazā Baltezera ūdens infiltrācijas baseinos tiek padots nefiltrēts, notiek infiltrācijas baseinu gultnes kolmatācija, kas samazina infiltrācijas ātrumu un tās apjomu (Levina u.c., 1986). Ūdens padeves apjomi infiltrācijas baseinos ievērojami mainās katru gadu. 1991. gadā tie bija 96 tūkst. m³/dnn, kas gada laikā veido aptuveni 35 milj. m³/gadā; 1996. gadā tie bija 54 tūkst. m³/dnn (Buzajevs u.c., 1997). GMP 2008. gadā vidēji sastādīja tikai 38 tūkst. m³/dnn. Padeves apjomi GMP infiltrācijas baseinos ir ļoti mainīgi katram baseinam atsevišķi, kā arī ievērojami mainās gada griezumā. 2008. gada augusta mēnesī GMP netika veikta nevienā infiltrācijas baseinā (9.pielikums).

Baltezera ūdens atradnes ūdensgūtnu „Baltezers” un „Baltezers II” teritorijā atrodas 144 ekspluatācijas urbumi (Gavena un Levina, 2000), kas izvietoti trīs ekspluatācijas urbumu rindās (1.2. attēls). Ekspluatācijas urbumu skaits pa sifoniem ir dažāds - 124 urbumi izvietoti ūdensgūtnē „Baltezers”, 72 „Baltezers I” un 20 „Baltezers II” (Gavena un Levina, 2000). Vidējais attālums starp ekspluatācijas urbumiem urbumu rindās sastāda 40-50 m (Levina u.c., 1986). Ekspluatācijas urbumu dziļumi ir 22,0 – 67,0 metri. Iecirknī „Baltezers II” ekspluatācijas urbumu dziļums ir 22,0 – 33,0 metri, bet iecirknī „Baltezers” 23,5 – 67,0 metri. (Gavena un Levina, 2000). Arī urbumu filtru intervāls mainās ūdensgūtnu ietvaros (10. pielikums). Ekspluatācijas urbumu īpatnējie debiti sastāda vidēji 0,8-3 l/s, bet atsevišķu urbumu debiti sasniedz pat 9 – 10 l/s un vairāk (Dēliņa u.c., 2005).

Baltezera teritorijā līdz 2000. gadam ir izveidoti 170 novērošanas urbumi, pašreiz to skaits pārsniedz 200. 2008. gadā novērojumi veikti 174 novērojumu urbumos (Gavena un Levina, 2000), no tiem 95 novērojumu urbumi atrodas pētījumu teritorijas modeļa laukumā (11. pielikums).

1.1.4.2. Klimatiskais raksturojums un pazemes ūdens līmeņu gada svārstības

Gruntsūdens līmeņu režīma izmaiņu likumsakarības Latvijas teritorijā nosaka

gruntsūdeņu barošanās apstākļu sadalījums gada gaitā un daudzgadu periodā. Sezonālās gruntsūdeņu līmeņu izmaiņas ir raksturīgas visai Latvijas teritorijai un ir novērojamas sekojošas likumsakarības – pirmspavasara ūdens minimums, pavasara maksimums, vasaras – rudens minimums, rudens – ziemas maksimums (Levina, 1999).

Gada svārstību sākumu un amplitūdu nosaka klimatiskās īpatnības, kas var būt nobīdītas gan laika ziņā, gan arī pēc to amplitūdas. Atsevišķos gados minētās svārstības vispār netiek novērotas (Levina, 1999).

Pirmspavasara minimums saistīts ar ziemas laikā aerācijas zonas caursalšanu, kas neļauj infiltrēties nokrišņiem, kas nozīmē, ka gruntsūdeņu barošanās nenotiek. Pirmspavasara minimuma ilgums mainās atkarībā no gada un ilgst vienu līdz trīs, retāk, līdz četriem mēnešiem. Periods sakrīt ar pēdējo janvāra mēneša dekādi un ilgst līdz pēdējai marta dekādei, kā arī tieši korelējas ar stabilas diennakts vidējo temperatūru zem 0 °C. Reģionāli, pirmspavasara minimuma ilgums mainās no diviem līdz mēnešiem Latvijas austrumu un dienvidaustrumu rajonos (Daugavpils, Subate) līdz 1 – 2,5 mēnešiem Latvijas rietumu rajonos (Ventspils, Liepāja). Pirmspavasara gruntsūdeņu līmeņu amplitūda ir 0,2 – 1,55 m (Levina u.c., 1986).

Vasaras minimums saistīts ar nokrišņu palielinātu iztvaikošanu un transpirāciju. Vasaras minimums turpinās līdz septembrim, vēlākais, oktobra pirmajai dekādei. Mazūdens gados vasaras minimums var ilgt pat līdz novembra beigām vai decembra sākumam. Daudzūdens gados vasaras minimālie līmeņi tiek sasniegti jau jūlijā līdz augusta sākumam, pēc kura sākas strauja līmeņu celšanās, kas pāriet rudens – ziemas maksimumā. Vasaras minimuma svārstības ir 0,2 – 2,25 m (Levina u.c., 1986).

Rudens – ziemas līmeņu celšanās saistīta ar temperatūras krišanos, iztvaikošanas samazināšanos un nokrišņu palielināšanos. Rudens-ziemas maksimums sākas jūlija beigās (daudzūdens gados) līdz decembra sākumam (mazūdens gados). Maksimumu amplitūdas veido 0,2 – 2,6 m. Daudzūdens gados līmeņu svārstību amplitūda nav tik izteikta kā mazūdens gados (Levina u.c., 1986).

Sezonālās līmeņu svārstības 2002. gadā novērojumu urbumos Kvartāra ūdens horizontos Baltezera pazemes ūdens atradnes teritorijā sastādīja no 0,73 m (urbumā 56N) līdz 4,46 m (urbumā 38N), Gaujas D_{3gj} horizontam līmeņu svārstības gada laikā ir 0,68 m (391 urbumā) līdz 0,71 m (390 urbumā), Arukilas D_{2ar} horizontā monitorings veikts tikai vienā urbumā un līmeņa svārstības sastāda 0,68 m gadā (Levina un Levins, 2003).

2008. gads bija otrais vissiltākais gads Latvijā pēdējo 85 gadu laikā. Vidējā gaisa temperatūra bija + 7,6 °C, kas ir 1,8 grādus virs normas (LVĢMC, Bez dat.). Nokrišņu daudzuma ziņā 2008. gads tiek vērtēts kā pietiekami mitrs. Gada nokrišņu daudzums Rīgā

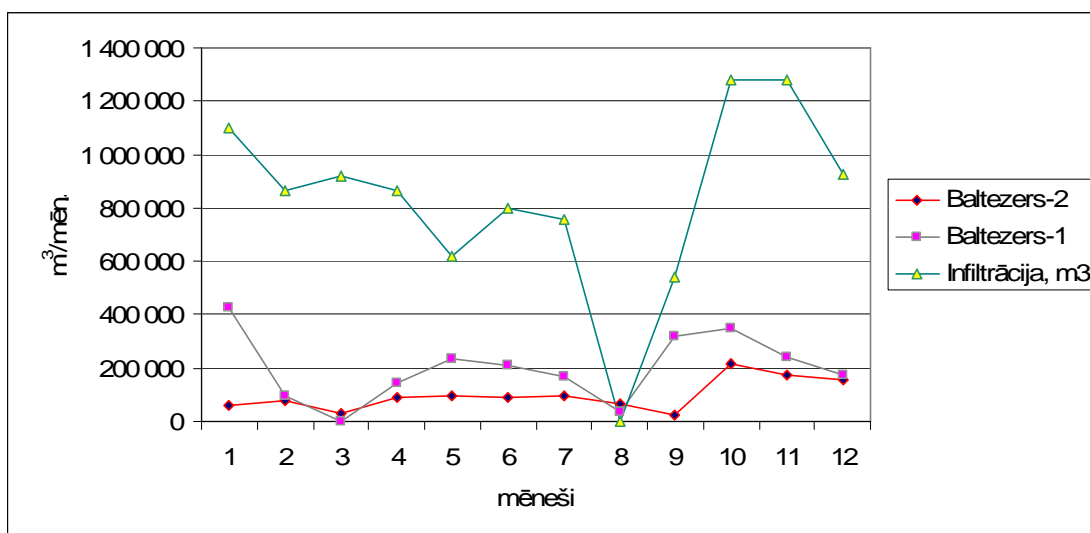
bija 744 mm, kas ir 112 % no normas. 2008. gadā siltāks un mitrāks par normu laiks bija visās gada sezonās. Ziemā gaisa temperatūra pārsniedza normu pat par 4,8 grādiem, bet nokrišņu daudzums sasniedza 118 % no normas, pavasarī šie rādītāji bija 1,8 °C un 114 %, vasarā, t.i., 0,4 °C un 116 %, rudenī, t.i., 1,0 °C un 104 % (LVĢMC, Bez dat.).

Baltezers un Baltezers II ūdensgūtnēs gruntsūdens līmeņu svārstības 2008. gadā atsevišķos monitoringa urbumos bija lielākas par 2 m, tās novērotas urbumos: 13; 124; 247; 295; 314; 10j; 11n; 20n; 25n; 32A; 38n; 49n; 6A; 6j (12. pielikums). Minimālās svārstības viena gada periodā, 0 līdz 0,5 m, novērotas novērojumu urbumos Nr.: 15; 16; 17; 145; 152; 112A; 12j; 14j; 1j; 37j; 38j; 3j (13. pielikums), kur gruntsūdeņu plūsma varētu tikt uzskatāma par dabisku.

1.1.4.3. Gruntsūdens bilances galvenie elementi

Pētījumu teritorijā gruntsūdeņu līmeņu režīmu nosaka nevis dabiskie meteoroloģiskie faktori, bet, galvenokārt, infiltrācijas baseinu un Baltezera ūdensgūtnu izmantošanas režīms (Krutofala un Levins, 2006). Galveno pieteci gruntsūdeņiem sastāda mākslīgā pazemes ūdens papildināšana, mazākā mērā infiltrācija no atmosfēras nokrišņiem un barošanās no Langstiņu un Sidrabu ezeriem. Atslogošanās, galvenokārt, notiek ekspluatācijas urbumu rindās Baltezers (labā un kreisā urbumu rinda), Baltezers II un Baltezers I, mazākā mērā atslogojoties tuvākajos ezeros - Sidrabu, Sekšu, Mazais Baltezers (Levina u.c., 1986). Pazemes ūdeņu noteces lielums Mazajā Baltezerā sastāda 7,8 – 14,2 tūkst. m³/dnn, kas veido vidēji 3 – 5 milj. m³/gadā (Buzajevs u.c., 1997).

Pieplūdes apjoms kopējā ūdens bilancē no GMP baseiniem ir mainīgs, kas atkarīgs no infiltrācijas baseinu darbības režīma. Maksimālā infiltrācijas baseinu jauda ir, aptuveni, 100 tūkst. m³/dnn, 2008. gadā padeves apjoms vidēji sastādīja 38 tūkst. m³/dnn (1.4. attēls). Minimālais padeves apjoms novērojams augusta mēnesī, kad padeves nenotiek vispār, bet maksimālās padeves novērojamas janvāra, oktobra un novembra mēnešos, kad infiltrācijas apjoms pārsniedz 1 milj. m³/mēn. (1.5. tabula). Kopējais GMP ieguldījums ūdens bilancē sastāda aptuveni 10 milj. m³/gadā.



1.4. attēls. Ūdens ieguves un GMP apjoma līknes Baltezers un Baltezers II ūdensgūtnēs m³/mēn (sastādījusi autore, izmantojot RŪ, 2009)

Atmosfēras nokrišņi papildina gruntsūdeņu resursus, infiltrēto atmosfēras nokrišņu daudzums ir atkarīgs no gruntsūdens ieguluma dziļuma un aerācijas zonu veidojošo nogulumu litoloģiskā sastāva. Pēc literatūras datiem Baltezersa ūdens atradnes teritorijā gruntsūdeņos infiltrējas vidēji 20 % nokrišņu jeb 100 – 150 mm/gadā (Buzajevs u.c., 2002a). Infiltrējamā ūdens daudzums m³/dnn tiek aprēķināts pēc vienādojuma (Levina u.c., 1986):

$$Q = sP/tI \quad (1.1.)$$

kur:

s - infiltrācijas laukums (m²)

P - nokrišņu daudzums teritorijā (mm/g/1000)

t - dienu skaits gadā

I - infiltrācijas apjoms daļas veidā.

Kopējais atmosfēras nokrišņu papildinājums pazemes ūdens bilanci sastāda aptuveni 3 - 4 milj. m³/gadā jeb aptuveni 8 - 10 tūkst. m³/dnn uz visas modeļa laukuma virsas.

Gruntsūdeņu plūsmas gradients I ir salīdzinoši neliels un mainās no 0,0027 līdz 0,0062, kas vidēji sastāda 0,0045 (Krutofala un Levins, 2006). Plūsmas dabiskais gradients pirms infiltrācijas sistēmas un Baltezersa ūdensgūtnu ierīkošanas bija 0,0029, kas atbilst gruntsūdeņu īpatnējās plūsmas lielumam 3,6 m²/dnn, kas ir 65 % no esošās transformētās gruntsūdeņu plūsmas lieluma (Krutofala un Levins, 2006).

Veicot pieplūdes aprēķinu no modelī iegūtajiem datiem pēc 1.2. vienādojuma aprēķināts, ka galvenās gruntsūdens plūsmas virzienā pieplūde veido aptuveni 9 tūkst. m³/dnn, kas kopējā gada plūsmā sastāda 3,3 milj. m³/gadā. Izmantojot 1.2. vienādojumu aprēķināts arī noteces apjoms noteces virzienā, tikpat lielā laukumā kā pieteces laukums.

Notece, galvenokārt, notiek Mazajā Baltezerā, kas skaidrojams ar ūdens nesējslāņa slīpumu ezera virzienā un lielo ezera dziļumu. Aprēķinātā notece veido līdz 5 milj. m³/gadā jeb 14 tūkst. m³/dnn. Aprēķinātie pazemes ūdens bilances elementi apkopoti pielikumā (14. pielikums).

Baltezera apkārtnē iegūstamajā ūdenī pieplūdi nodrošina (Krutofala un Levins, 2006):

- vietējo nokrišņu infiltrācija;
- reģionālā ziemeļrietumu gruntsūdeņu plūsma Mazā Baltezera virzienā;
- gruntsūdeņu krājumu mākslīgā papildināšana ar infiltrācijas baseiniem ūdeni no Mazā Baltezera.

Baltezera apkārtnē ūdens atslodze notiek:

- pa ekspluatācijas urbumu rindām;
- ar noteci Mazajā Baltezerā.

Izmantojot aprēķinātos un zināmos lielumus tika sastādīta ūdens bilance, lai tiktu izveidota ūdens aprites shēma modeļa laukumam (1.5. attēls). Vispārināti, pazemes ūdeņu bilances aprēķinam tiek pielietots ūdens bilances vienādojums (Welsh, 2007):

$$\Delta S = Q_{in} - Q_{out} \quad (1.2)$$

kur:

ΔS – krājumi;

Q_{in} – pazemes ūdeņu pietece;

Q_{out} – pazemes ūdeņu notece.

Atsevišķās bilances sastāvdaļas gruntsūdeņiem tiek aprēķinātas pēc sekojošiem vienādojumiem pietecei (1.3.) un notecei (1.4.) (sastādījusi autore, pēc Welsh, 2007):

$$Q_{in} = Q_{atm} + Q_{laterin} + Q_{GMP} \quad (1.3.)$$

kur:

Q_{in} – kopējā pietece;

Q_{atm} – atmosfēras nokrišņu infiltrācija;

$Q_{laterin}$ – sānu pieplūdes;

Q_{GMP} – gruntsūdeņu mākslīgā papildināšana

$$Q_{out} = Q_{bore} - Q_{laterout} \quad (1.4.)$$

kur:

Q_{out} – kopējā notece;

Q_{bore} – ekspluatējamie pazemes ūdens apjomi;

$Q_{laterout}$ – sānu notece.

Tā kā nav zināms perkolācijas un pārteces apjoms, kā arī citu ezeru summārā ietekme

uz gruntsūdeņu plūsmu, tad vienādojums sastādīts tikai no zināmajiem lielumiem. Apkārtējā teritorijā daudzviet gruntsūdeņu līmenis parasti ir augstāks kā artēzisko ūdeņu līmenis, līdz ar to pārteces loma gruntsūdeņu bilancē ir nenozīmīga (Krutofala un Levins, 2006). Perkolācijas un pārteces aptuvenie aprēķini veikti pēc vienādojuma 1.5. (Bamberg, 1993). Tomēr nav zināms precīzs lielums, tādēļ tā aprēķins nepieciešams tikai plūsmas analīzei (šis jautājums sīkāk apskatīts 3.3. nodaļā).

$$q = \frac{k_0}{m_0} (H_1 - H_2) \quad (1.5.)$$

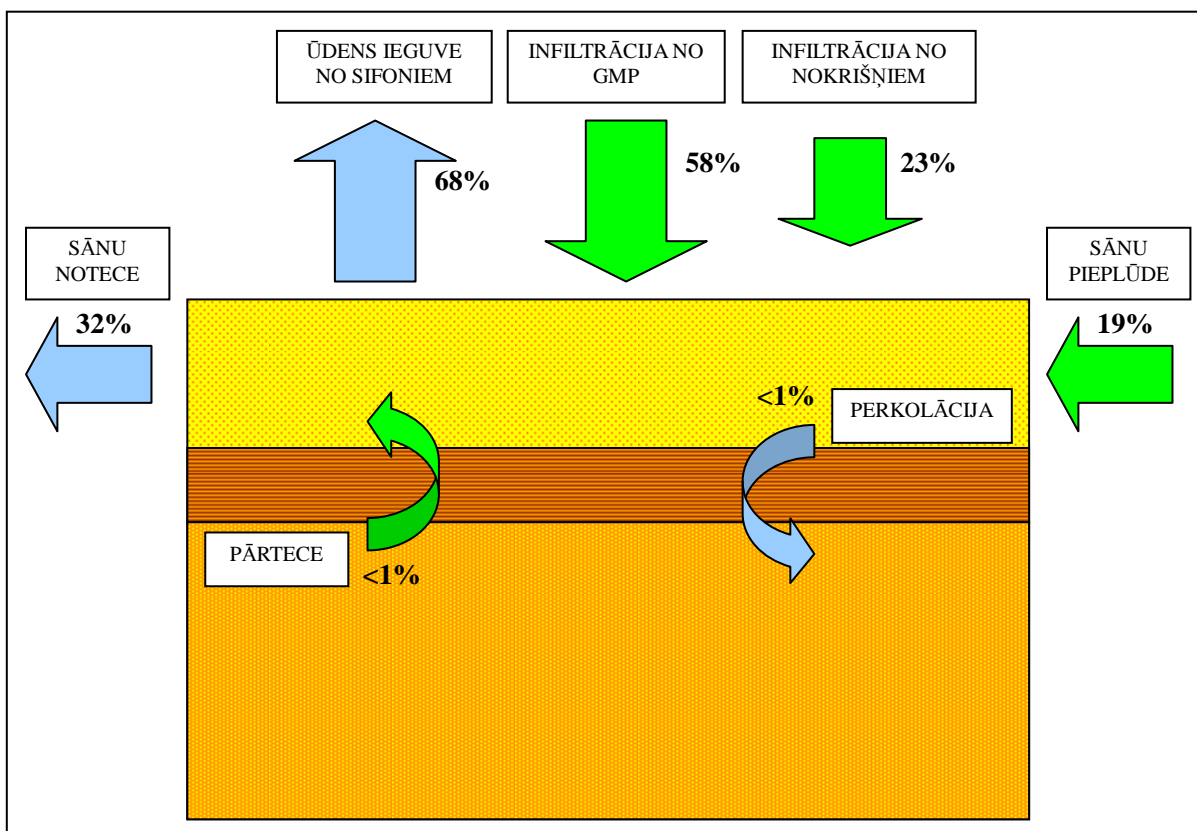
kur:

k_0 – atdalošā vāji filtrējošo nogulumu slāņa filtrācijas koeficients;

m_0 – atdalošā vāji filtrējošo nogulumu slāņa biezums;

H_1 un H_2 – gruntsūdeņu un spiedienūdeņu pjezometriskais līmenis.

Aptuvenais aprēķinātais pārteces apjoms starp gruntsūdeņiem un artēziskajiem ūdens horizontiem, aprēķinos izmantojot vidējos lielumus pa visu modeļa teritoriju, sastāda 0,0001 m³/dnn. Ņemot vērā, ka teritorijā gruntsūdens un pjezometriskais līmenis ir mainīgs, kā arī mazcaurlaidīgā slāņa biezums ievērojami mainās, tad pārteces apjoms varētu būt līdzvērtīgs un tā ietekme uz gruntsūdens līmeņu sadalījumu ir nenozīmīga. Ūdens kompleksu mijiedarbības noskaidrošanai ir liela nozīme, lai pārlicinātos, ka robežnosacījumi (sīkāk aprakstīti 1.3.4. apakšnodaļā) artēziskajiem ūdens horizontiem ir definēti pareizi. Pretējā gadījumā būtu novērojams liels ūdens daudzuma zudums vai tā ievērojama papildināšanās kvartāra ūdens kompleksā, uz ko norādītu augšupejoši vai lejupejoši plūsmu vektori modeļa šķērsgriezumā.



1.5. attēls. Gruntsūdens bilances elementu procentuālais sadalījums Baltezersa ūdensgūtnei 2008. gadā (sastādījusi autore)

Modeļa teritorija esošie pazemes ūdens bilances elementi parādīti 1.5. attēlā. Procentuālais sadalījums atbilst 2008. gada situācijai. Tā kā nav zināms Sekšu, Venču un Sudraba ezeru ieguldījums kopējā plūsmas bilancē, tad šie lielumi nav iekļauti aprēķinos. Daļēji aprēķinos izmantoti iegūtie parametri no autores sagatavotā ģeoloģiskā modeļa, galvenokārt, ūdens horizontu un ūdens mazcaurlaidīgo slāņu biezumi. Vismainīgākās bilances vērtības ir no ekspluatācijas urbumu rindām atsūknētā ūdens daudzums un GMP apjoms. Pie ļoti intensīvas ūdensgūtnes ekspluatācijas, kā tas noticis 1960. gados, kad ūdensgūtņu jauda bija līdz 100 tūkst. m³/dnn (Buajevs u.c., 1997), GMP un ūdens ieguve no ekspluatācijas urbumu rindām bija aptuveni 80 % no pieteces un noteces bilances.

Atsūknēšanas un GMP apjomi ūdensgūtņu Baltezers un Baltezers II apkārtņē (sagatavojusi
autore, pēc RŪ, 2009)

Mēnesis	Atsūknēšanas apjomi, m ³	Infiltrācijas apjomi, m ³
1	887993	878 408
2	870807	927 056
3	882309	893 372
4	909803	950 544
5	954382	571 028
6	883283	691 018
7	757477	717 960
8	795440	0
9	755791	520 408
10	777081	1 452 148
11	923776	1 324 164
12	957272	943 944
Kopā gadā	10 355414	9 870 050

1.2. Datu ievākšanas metodika

Baltezera gruntsūdeņu režīms un ķīmiskais sastāvs ir pētīts vairākkārtēji un ļoti detalizēti. Ir pētītas gruntsūdeņu ieguves palielināšanas iespējas pazemes ūdens atradnē „Baltezers”; Mazā Baltezera ūdens pašattīrīšanās filtrācijas ceļā no infiltrācijas baseiniem līdz ūdens ieguves urbumiem, kā arī veicot iegūstamā gruntsūdeņu kvalitātes monitoringu un gruntsūdeņu režīma novērojumus.

Ģeoloģiskā griezuma un urbuma kataloga izveidošanai izmantoti dati no LVĢMC, VĢD fondu materiāliem, galvenokārt, no iepriekš veikto modelēšanas darbu atskaitēm pētījumu teritorijā, hidroģeoloģisko apstākļu pētījumiem un derīgo izrakteņu atradnes pašu sastādīšanas atskaitēm. Urbuma kataloga izveidošanai izmantoti dati no ekspluatācijas urbumu atradnes pasēm, monitoringa urbumu tīkla paplašināšanas darbiem, kā arī izmantota informācija par teritorijā esošajiem urbumiem no LVĢMC datu bāzes „Urbumi” (LVĢMC DB „Urbumi”, Bez dat.).

Informāciju par ūdensgūtņu darbības režīmu, t.i., infiltrācijas baseinos padotā ūdens daudzumu; no ekspluatācijas urbumu rindām atsūknētā ūdens daudzums iegūti no RŪ sūkņu stacijas „Baltezers.” Tostarp, no RŪ sūkņu stacijas „Baltezers” iegūti arī gruntsūdeņu līmeņu novērojumi monitoringa urbumos 2008. gadā.

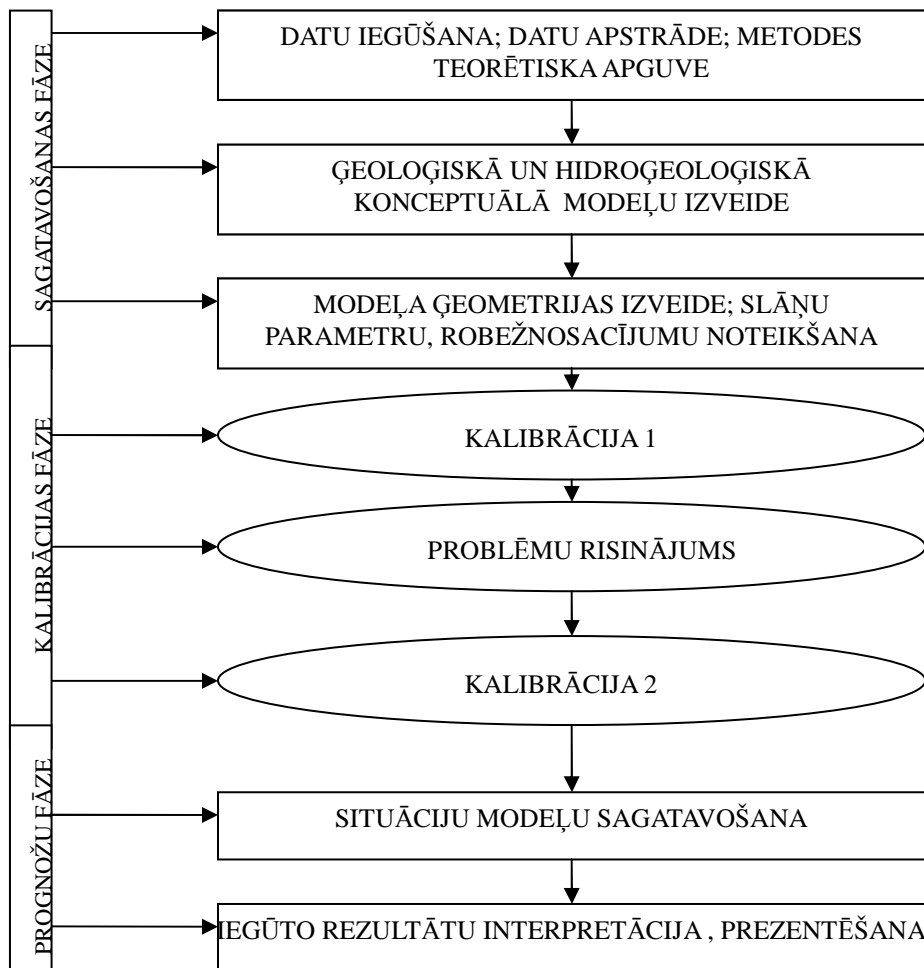
Darba teorētiskā daļa sagatavota, galvenokārt, izmantojot 26 npublicētos literatūras avotus vienu interneta resursu un 25 publicētos literatūras avotus. Lielāko daļu no publicētajiem materiāliem veido publikācijas starptautiskajos žurnālos. 15 Zinātniskie raksti atlasīti no Latvijas Universitātes abonētajām datu bāzēm *Scencedirect* un *Springerlink*.

Modeļa sagatavošanai citi nepieciešamie hidroģeoloģiskie parametri, t.i., ūdens līmeņu sezonālās svārstības, modelī sākotnēji izmantotie filtrācijas koeficienti, atmosfēras nokrišņu infiltrācijas apjomi, dūņu slāņu biezumi un citi, iegūti no iepriekš veikto izpētes darbu atskaitēm, kas veikti Baltezera pazemes ūdens atradnes teritorijai. Modeļa izveidei trūkstošie parametri noteikti vai precizēti pēc vidējiem rādītājiem no hidroģeoloģisko pētījumu atskaitēm plašākā Latvijas teritorijā vai aprēķināti pēc standartizētiem vienādojumiem no zināmajiem lielumiem. Brīvības pakāpes un hidroģeoloģisko parametru precizēšana modeļa laukumam tika veikta jau modeļa kalibrācijas procesā.

Kartogrāfiskais materiāls sagatavots patstāvīgi ĢIS vidē, izmantojot ArcGIS ArcInfo 9.3 datorprogrammu, par pamatni izmantojot *Bijušās PSRS armijas ģenerālštāba topogrāfisko karšu mozaīka mērogā 1:10 000 (TOPO 10K PSRS)*, *Bijušās PSRS armijas ģenerālštāba 63. gada sistēmas topogrāfisko karšu mozaīka mērogā 1:25 000 (TOPO 25K63g PSRS)*, *Valsts Ģeoloģijas Dienesta Kvartāra nogulumu karšu mozaīka mērogā 1:200 000 (Kvartargeoloģija)*, *VZD Satelītkaršu mozaīka. Latvijas Republikas satelītkarte mērogā 1:50 000 (TOPO 50K Satelītkarte)*. Kartogrāfiskais materiāls iegūts LU ĢZZF WMS sistēmā.

1.3. Modeļa sagatavošanas procedūra

Modeļa sagatavošana klasiski tiek iedalīta vairākos tā attīstības posmos, pats modelēšanas process bieži vien aizņem mazāko daļu no ieguldītā darba. 1.6. attēlā redzama autores izstrādātā un realizētā modeļa sagatavošanas shēma.



1.6. attēls. Darba izstrādes shēma, kreisajā pusē relatīvā laika skala (sagatavojuši autore, pēc Dawoud & Raouf, 2007)

1.3.1. Modelēšanas programmatūras un to papildiespēju izvēle

Pēc vairāku hidroģeoloģisko plūsmas datormodelēšanas programmu (Argus Holdings ArgusONE 4.0 studentu versija, Waterloo Hydrogeologic VisualMODFLOW 2.8.2, MODFLOW-2000 un HiFiGeo 3.5) izmēģināšanas un to papildiespēju novērtēšanas, tika izvēlēta *HiFiGeo* datorprogramma, jo tai konstatētas vairākas priekšrocības attiecībā pret citām programmām. Kā galveno priekšrocību jāmin neierobežota modeļa laukuma veidošana, neierobežotu slāņu un robežnosacījumu definēšanas iespēju modeļa teritorijai, kas izmēģinājuma versijas datorprogrammās ir ierobežotas. Atšķirībā no līdzīgām brīvpieejas pilnas versijas programmām, *HiFiGeo* ir skaidrāka lietotāja saskarne, labāka dokumentācija un tā ir vieglāk lietojama, ar mazākām prasībām pret darba stacijas veiktspēju.

Maģistra darba pētījumam izvēlēta PAIC izstrādātā *HiFiGeo* v.3.5 datorprogramma paredzēta trīsdimensionālu ģeoloģisko struktūru vizualizācijai un modifikācijai, filtrācijas procesu modelēšanai ģeoloģiskajās struktūrās, ieskaitot piemaisījumu izplatības pazemes ūdeņos modelēšanai un iegūto rezultātu apstrādei, kā arī filtrācijas režīma novērojumu vizualizācijai (PAIC, 2002).

Pazemes ūdens filtrācijas režīma matemātiskā modelēšana nozīmē telpiskā pjezometriskā ūdenslīmeņa sadalījuma atrašanu, balstoties uz stacionāra pazemes ūdeņu filtrācijas pamatvienādojuma atvasinājumiem.

Lai veiktu šo ūdens līmeņu aprēķinu, nepieciešams izpildīt sekojošas darbības (PAIC, 2002):

1. aprakstīt trīsdimensionālu ģeoloģisko struktūru;
2. uzdot sākotnējo pjezometriskā ūdenslīmeņa sadalījumu;
3. uzdot ģeoloģiskajā struktūrā sastopamos materiālus un to filtrācijas parametrus;
4. uzdot robežnosacījumus;
5. uzdot aprēķinu pārtraukšanas kritērijus (PAIC, 2002).

Izvēlētā programma diskretizācijas režģi veido pēc divu dimensiju triangulācijas metodes (režģa diskretizācijas metodes sīkāk apskatītas 2. nodaļā). Programmatūra nodrošina arī urbuma kataloga izveidi, taču urbuma kataloga izveidei un uzglabāšanai tika izvēlēta *RockWare* izstrādātā *Rockworks2006* integrētā programmatūras pakotne ģeoloģisko datu apstrādei, uzglabāšanai, analīzei un vizualizācijai. Faktisko GŪL hidroizohipsu sagatavošanai izmantota *Golden Software Surfer 8*, kas pieejama LU ĢZZF Vides procesu modelēšanas laboratorijā.

1.3.2. Konceptuālā modeļa sagatavošana un ģeoloģiskā nenoteiktība teritorijā

Pēc pētījumu teritorijas ģeoloģiskās uzbūves apzināšanas un ģeoloģiskā modeļa izveides, nākamais solis paredz noteikt hidroģeoloģisko griezumumu jeb izveidot konceptuālo hidroģeoloģisko modeli. Teritorijas hidroģeoloģiskā griezumuma izveidošana paredz ģeoloģisko slāņu izdalīšanu pēc to filtrācijas īpašībām (Ghosh et al., 2006; Wen et al., 2007). Konceptuālā modeļa izveidē ir svarīgi sākotnēji noteikt vienlaidus izsekojamus ūdens mazcaurlaidīgus slāņus un ūdens horizontus un katra ūdens horizonta piederību ūdens kompleksam. Griezumam precizēšanai svarīgi noteikt vienlaidus neizsekojamo ūdens mazcaurlaidīgo slāņu biežumus un to telpisko novietojumu (Barthel et al., 2005). Ja ir zināmi arī citi materiāli ar atšķirīgām filtrācijas īpašībām, vai arī filtrācijas maiņu, filtrācijas plūsmas ceļā, tad arī tos būtu vēlams iestrādāt konceptuālajā modelī (El Idrysy & Smetdt, 2006).

Subreģionālu un reģionālu modeļu izveidē pārsvarā slāņi tiek izdalīti pēc stratigrāfiskām (Zhang & Werner, 2009) vai litostratigrāfiskām vienībām (Barthel et al., 2005).

Baltezera pazemes ūdens atradnes teritorijas ģeoloģiskā izpēte veikta ievērojamā laika periodā, sākot jau no 19 gs. beigām, tādēļ urbumu materiālu interpretācija būtiski atšķiras pat topogrāfiski tuvu novietotiem urbumiem. Tāpat nav vienota viedokļa par smalkāku

stratigrāfisko vienību izdalīšanu kvartāra perioda nogulumos. Salīdzinoši detalizēti ir izdalīti slāņi eksploatācijas urbumos, īpaši ūdensgūtnē „Baltezers II”, kurā visi urbumi ierīkoti salīdzinoši neilgā laika posmā (Gavena un Levina, 2000). Taču eksploatācijas urbumi ir izvietoti vienā līnijā un par ģeoloģisko uzbūvi plašākā teritorijā no tiem secināt nevar. Monitoringa urbumi izretoti plašāk pētījumu teritorijā, bet to ģeoloģiskā informācija biežāk ir mazāk detāla, t.i., kvartāra nogulumos netiek izdalītas sīkākas stratigrāfiskās vienības un monitoringa urbumu dziļums reti sniedzas dziļāk par 10 m (Buzajajevs u.c., 1997; Gavena un Levina, 2000; Driķis, 1999).

Nemot vērā, to, ka modeļa izveides teritorijā slāņu sagulums ir nevienmērīgs un daudzi slāņi izķīlējas, tad hidroģeoloģiskais griezumš tika veidots un slāņu virsmas vilktas pa stratigrāfisko vienību robežām. Dažādā citu pētīnieku veiktā urbumu interpretācija neļāva izdalīt arī ievērojamākas ūdens vāji caurlaidīgu materiālu lēcas vai starpslāņus un pēc daba autores domām tik detāla griezumš izveidošana nesniegtu lielāku modeļa precizitāti, bet pat palielinātu aprēķinu ilgumu un aprūtinātu filtrācijas koeficientu precizēšanu modeļa ģeoloģiskajiem slāņiem (šis jautājums sīkāk tiks apskatīts nodaļās Rezultāti un Diskusija). Atsevišķi tika izdalīti tikai eolie nogulumi un dūņu slānis zem teritorijā esošajiem ezeriem. Pētījumu teritorijā ir izdalīti septiņi ūdens horizonti un divi sprotslāņi (1.3. tabula). Neskatoties un vienotu kvartāra ūdens horizontu uzbūvi, to dažādo filtrācijas īpašību dēļ, Kvartāra un Arukilas-Amatas ūdens kompleksos izdalīti vairāki ūdeni saturošie slāņi.

1.3. tabula

Hidroģeoloģiskais griezumš modeļa laukumā (sagatavojusi autore, izmantojot LVĢMC DB „Urbumi”, Bez dat.)

Periods	Ģeoloģiskais indekss	Litoloģija	Ūdens komplekss
Q	eQ4	Smilts, vidēji graudaina	Q
Q	lgQ3 ltv b	Smilts smalka līdz rupja, grants	Q
Q	lgQ3 ltv	Smilts smalka līdz vidēji graudaina	Q
Q	gQ3	Smilšmāls un mālsmilts ar grants un smilts lēcām	-
D	D3gj2	Smilšakmens ar aleirīta starpkārtām	D2 – D3
D	D3gj1	Smilšakmens ar aleirīta starpkārtām	D2 – D3
D	D3br	Smilšakmens ar aleirīta starpkārtām	D2 – D3
D	D2ar	Smilšakmens ar aleirīta starpkārtām	D2 – D3
D	D2nr	merģelis	-

1.3.3. Modeļa struktūras izveide

Modeļa struktūras jeb ģeoloģiskā modeļa izveidošanas procesā tika izdalīti vairāki

secīgi soļi, kas sevī ietver (PAIC, 2002):

- datu sagatavošanu;
- slāņu virsmu sagatavošanu;
- slāņu virsmu ģenerēšanu modeļa struktūras režģī;
- materiālu īpašību piešķiršanu attiecīgajam struktūras slānim.

Datu sagatavošana ietver slāņu virsmu augstuma atzīmju atlasīšanu no urbuma datiem, pēc jau izveidotā hidroģeoloģiskā griezuma. Katram slānim tiek sagatavota atsevišķa rēķintabula. Pēc darba rēķintabulu sagatavošanas, tās tika ielasītas programmā *Surfer 8*, kur no esošajām virsmas vērtībām tās interpolētas un ekstrapolētas izmantojot *kriging* algoritmu. Iegūtais pavairoto augstuma atzīmju *Ascii* fails ielasīts PAIC izstrādātā režģa sagatavošanas programmā *Mesheditor*, kur ar triangulācijas metodi tika savienoti punkti, izveidojot katra slāņa virsmas režģus. Sagatavotie virsmu režģa faili ielasīti programmā *HiFiGeo* sākot no virsmas slāņa. Sekojoši, katram slānim tiek pievienots zemāk esošais režģa slānis, nosakot augšējā slāņa biezumu. Modeļa struktūra ir izveidota, kad visi modeļa slāņi ir savietoti nepieciešamajā kārtībā (PAIC, 2002).

Modeļa ģeometriju veido 10 virsmas un 9 slāņi (15. pielikums). Katra režģa virsma sastāv no 5 699 režģa punktiem, kopā tie veido 56 990 režģa krustpunktus. Režģa solis sastāda 75 x 75 metri, vietām, galvenokārt, infiltrācijas baseinu un ekspluatācijas urbumu tuvumā režģa solis ir ievērojami mazāks, lai tie tiktu precīzāk iestrādāti modeļa laukumā, modeļa diskretizācija laukumā atainota 16. pielikumā.

Kad struktūras režģis ir izveidots un ielasīts modelēšanas programmā, katram no izveidotajiem slāņiem tiek piešķirtas tam raksturīgā materiāla īpašības, izmantotie materiāli apkopoti 1.4. tabulā.

Jebkurā režģa slāni iespējams iestrādāt vairākus materiālus. Tas nepieciešams, ja ģeoloģisko slāņu izplatība ir lokāla, kā piemēram, dūņu gadījumā, t.i., to izplatība ir tikai zem ezeriem. Virsmas slānī, kas ir pirmais slānis no augšas, iespējams interpolēt dažādu izmantoto materiālu biezumu ar dažādiem interpolācijas veidiem. Pārējiem slāņiem materiāls tiek nomainīts tikai noteiktā laukumā, bet visa slāņa biezumā. Tādēļ, režģa sagatavošanas laikā nepieciešams rezervēt iespēju materiālu īpašību maiņai pārējo slāņu ietvaros, mainīgā biezumā. To var realizēt, režģa sagatavošanas laikā, katram konceptuālā modeļa slānim izveidojot vairākas vienādas virsmas. Šāda pieeja palīdz papildināt modeli, ja teritorijā ir izteikta filtrācijas īpašību maiņa filtrācijas ceļā.

Modelī izmantoto slāņu un materiālu raksturojums (sagatavojusi autore, izmantojot Prols u.c., 1998; Legzdiņš, 1996)

Virsmas Nr.	Virsmas nosaukums	Slāņa nosaukums	Slānī imantotie materiāli	slāņa biezumi, m
1	Virisma	Virisma	eQ	4-20
			Dūņas	0.65 – 2
			Dūņas zem baseiniem	4
2	lgQ3ltvb	lgQ3ltvb	lgQ3ltvb	9 - 41
3	lgQ3ltv	lgQ3ltv	lgQ3ltv	8 - 27
4	gQ3ltv	gQ3ltv	gQ3ltv	2 - 30
5	D3gj2	D3gj2	D3gj2	4 - 40
6	D3gj1	D3gj1	D3gj1	11 - 50
7	D2br	D2br	D2br	40 - 70
8	D2ar	D2ar	D2ar	47 -60
9	D2nr	D2nr	D2nr	20
10	Bottom	-	-	

Modeļa virsmas reljefa slānis sagatavots digitizējot topogrāfisko karti mērogā 1:25 000 (TOPO 25K63g PSRS), tās izolīnijas un augstuma atzīmes un ekspluatācijas urbumu augstumu atzīmes. Ezeru gultnes reljefs, modelī iestrādāts no teritorijā esošo ezeru digitizētajām batimetrijas kartēm, kuras digitizētas PUMa projekta ietvaros. GMP infiltrācijas baseinu kontūras un to dziļumi, iestrādāti jau modeļa virsmas reljefā. Eolie nogulumu definēti pēc kvartāra nogulumu izplatības (LVGD Kvartargeologija; Prols u.c., 1998) virs 11 m v.j.l. atzīmes un augstāk.

Modeļa izveidē ezeru gultnē noteikts dūņu slānis vienādā biezumā visā ezera gultnes platībā, atbilstoši zināmajam ezerā noteiktajam dūņu slāņa biezumam. Pēc citu pētnieku veiktās zondēšanas rezultātiem dūņu slāņa maksimālais biezums Mazajā Baltezerā sasniedz 2,5 m. Biezāks par 1,0 m slānis ir aptuveni 42 ha platībā. Sekojoši, vidējais nogulu biezums uz visu ezera platību ir 0,65 m (Legzdiņš, 1996). Venču ezera gultnē dūņas izsekojamas lielākā biezumā, līdz 9 m, šajā teritorijā papildus izsekojami arī citi vāji caurlaidīgi nogulumi. Tiek pieņemts, ka ezers nav saistīts ar gruntsūdeņiem (Buzajevs u.c., 1997). Ņemot vērā to, ka ne visiem ezeriem ir zināms precīzs dūņu slāņa biezums un tā horizontālā izplatība, tad kalibrācijas procesā dūņu slāņa biezums un tā filtrācijas īpašības izmantotas kā mainīgais modeļa lielums.

1.3.4. Robežnosacījumu definēšana

HifiGEO programmatūra pieļauj 8 veidu robežnosacījumu noteikšanu (PAIC, 2002), kas šīs nodaļas ietvaros ir sīkāk aprakstīti.

1. *Head* un *Well* veida RN grupu robežnosacījumi paredz pjezometriskā ūdenslīmeņa vērtību h_0 (*Head*) uzdošanu. Robežnosacījumi tiek uzdoti režģa krustpunktos uz hidroģeoloģisko slāņu virsmām. Atšķirības starp *Head* un *Well* tipa robežnosacījumiem rezervētas programmatūras attīstībai, tādēļ tiek rekomendēts izvēlēties robežnosacījuma tipu *Well* atslodzes urbumu un drenāžu uzdošanai, bet *Head* visos citos punktos, kur tiek uzdots fiksēts PŪL.
2. RN veidu *Waterlevel* uzdod $h = h_0$ uz tiem RN grupas punktiem, kuros $z < h_0$. RN veidu *Waterlevel* ieteicams lietot uz upju un ūdenskrātuvju pārsegtajiem topogrāfiskās virsmas apgabaliem.
3. *Marginal3* tipa grupas punktos tiek uzdots 3. veida robežnosacījums imantojot 1.6. vienādojumu (PAIC, 2002):

$$k \frac{\partial h}{\partial n} = \alpha(h - h_0) \quad (1.6.)$$

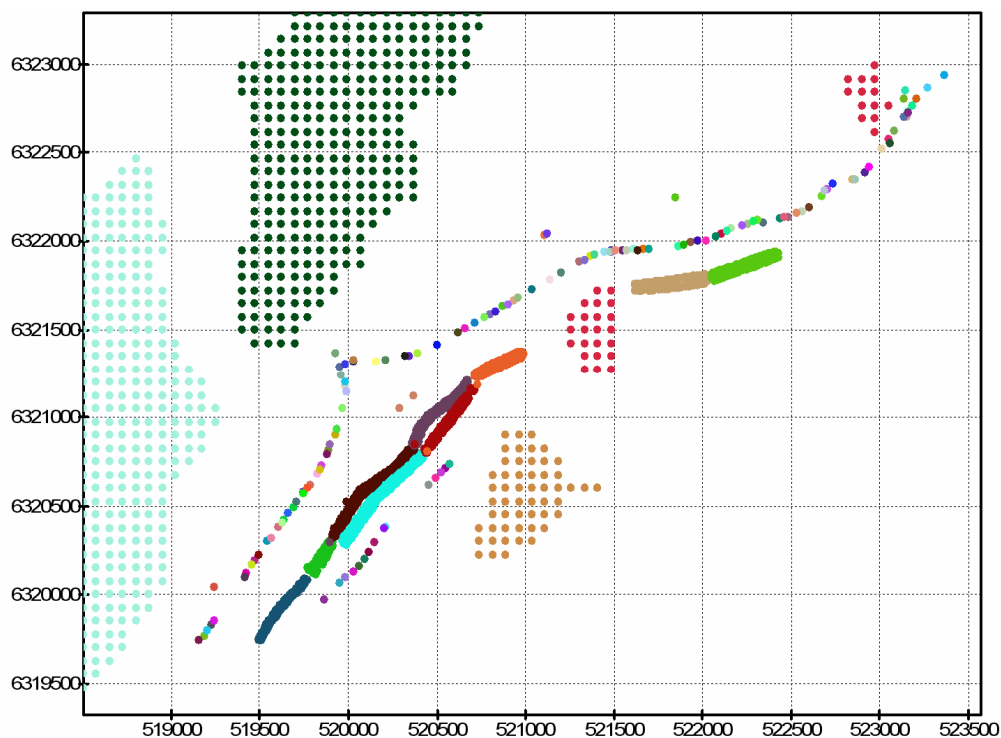
kur

n ir normāle pret ārējo robežu,

h_0 – reģionālais pjezometriskais ūdens līmenis,

α - reģionālās ietekmes koeficients (PAIC, 2002).

4. Robežnosacījumu tipi *Relief H0*, *Relief Q0* un *Relief QH* paredzēti atslodzes urbumu noteikšanai; tie jāizvēlas atslodzes urbumiem, kam zināms filtra augstumu diapazons, caurules rādiuss r_0 un attiecīgi, atslodzes augstums h_0 un filtra piesērējums λ (*Relief H0* gadījumā), caurplūdums Q_0 un filtra piesērējums λ (*Relief Q0* gadījumā) vai atslodzes augstums h_0 un caurplūdums Q_0 (*Relief QH*). Programmatūra automātiski aprēķina hidroģeoloģisko slāņu virsmas, kur jāpielieto šie robežnosacījumi; lietotājam tie jāuzdod plaknes režģa punktā (t.i. uz jebkura slāņa virsmas).
5. Robežnosacījumu tips *AdmixtureWell* uzdod piemaisījuma ievadīšanu urbuma filtra daļā; tas ļauj uzdot piemaisījuma avota jaudas blīvumu q_a (PAIC, 2002).



1.7. attēls. Iestrādātie virsmas robežnosacījumi modeļa laukumā. Ar dažādas krāsas punktiem apzīmēti režģa krustpunkti, kuros definēti atšķirīgi robežnosacījumi (sagatavojuši autore)

Programmā iestrādātais rīks *Curve* nodrošina poligona vai punktveida objekta atainošanu pēc objekta koordinātēm. Rīks tika izmantots, lai noteiktu katra robežnosacījuma telpisko novietojumu un modeļa iekšējie robežnosacījumi tiktu precīzi iestrādāti modelī.

Modeļa laukumā kopā nedefinēti 162 robežnosacījumi. Modeļa virsmā iestrādātie iekšējie robežnosacījumi atainoti 1.7. attēlā.

Ekspluatācijas urbumi veido 144 punktveida *Relief Q0* robežnosacījumus, izmantotie urbumu parametri apkopoti 10. pielikumā. Artēziskajiem ūdens horizontiem: D_{3gj} ; D_{3br} ; D_{2ar} noteikti 3. veida robežnosacījumi, t.i., pjezometriskie līmeņi kā *Marginal3* veida robežnosacījums. Līmenis noteikts 6, 6,2 un 6,3 m v.j.l., koeficients α noteikts kā 0,2. Visiem modeļa laukumā esošajiem ezeriem, Mazais un Lielais Baltezers, Sidraba, Venču un Sekšu ezers, noteikts pirmā veida robežnosacījums *Waterlevel*. Modelī izmantotie ezeru līmeņi ir parādīti 1.5. tabulā. Sekšu un Sidraba ezeru līmeņi laika griezumā ir bijuši ļoti mainīgi. Tā, piemēram, Sekšu ezera līmenis 1930. gadā bija 1 m v.j.l., turpretī, 1997. gadā 4,5 m v.j.l., Sidraba ezera minimālais līmenis 1,5 m., v.j.l., bet 1993. gadā 5,4 m., v.j.l. (Buzajevs u.c., 1997).

Atsevišķu 2008. gada mēnešu līmeņi Mazajā un Lielajā Baltezerā noteikti pēc Ķīšezerā novietotās Rīgas ūdens līmeņu mērījumu stacijas, jo Lielajam un Mazajam Baltezeram šāda novērojumu stacija nav izveidota. Ķīšezers ir saistīts ar Lielo Baltezeru caur Juglas kanālu, tādēļ var pieņemt, ka to līmeņi ir ļoti tuvi vai to svārstības ir vienādas. Citiem

ezeriem ūdens līmeņu svārstības 2008. gadā nav zināmas.

1.5. tabula

Modeļa laukumā esošo lielo ūdenstilpju raksturojums (sastādījusi autore, izmantojot TOPO 10K PSRS; Latvijas Hidrometroloģijas aģentūra, 2009)

Ezera nosaukums	Ezera līmenis (m v.j.l.) pēc TOPO10K PSRS.	Ezera līmenis (m v.j.l.) 2008.g	Modelī izmantotais ezeru līmenis (m v.j.l.)
Lielais Baltezers	0.1	0.2	0.2
Mazais Baltezers	0.1	0.2	0.2
Sudrabezers	5.5	-	5.8
Sekšu ezers	2.5	-	3.5
Venču ezers	3.5	-	3.8

Infiltrācijas baseini veido 12 modeļa iekšējos robežnosacījumus. Infiltrācijas baseini tika nodefinēti kā ūdenstilpnes ar noteiktu ūdens līmeni kā pirmā veida *Waterlevel* robežnosacījumi. Ūdens padeve GMP infiltrācijas baseinos ir ļoti nevienmērīga gan gada griezumā kopā, gan katrā baseinā atsevišķi. Vairāki infiltrācijas baseini 2008. gadā netika izmantoti vispār, bet vairākos padeves ir ļoti retas, atsevišķos gada mēnešos. Sākotnējie ūdens līmeņi katram infiltrācijas baseinam pieņemti no tiem blakus esošajiem monitoringa urbumu ūdens līmeņu mērījumiem (1.6. tabula). Infiltrācijas baseinus modelī iespējams nodefinēt arī citādi, t.i., piedēvējot tiem īpašus materiālus, kuriem tiek noteikta ļoti apjomīga virszemes atmosfēras infiltrācija. Šādā gadījumā, infiltrācijas baseini pat netiek definēti kā robežnosacījums. Aprēķinātie ekvivalentie atmosfēras infiltrācijas apjomi m/dnn 2008. gadam apkopoti 17. pielikumā. To līmeņi precizēti modeļa kalibrācijas laikā.

GMP baseinu tuvumā esošo monitoringa urbumu vidējie, minimālie un maksimālie GŪL 2008. gadā, m v.j.l. (sagatavojusi autore, pēc RŪ, 2009)

Baseina Nr.	Urbuma Nr.	vidējais GŪL m v.j.l. 2008.g.	minimālais GŪL m v.j.l. 2008.g.	maksimālais GŪL m v.j.l. 2008.g.
5	6A	5.09	6.36	3.98
4	25n	5.83	6.67	5.02
3	247	5.12	6.48	3.52
8	38n	4.91	6.62	3.61
2	7j	5.05	6.13	4.29
7	12b;13b	8.94	9.9	8.3
9/10	10bc	3.85	4.87	3.21
1	32A	4.88	6.65	4.04
6	11n/43n	3.66/3.08	5.4/3.87	2.84/2.84
16	126	4.7	6.46	3.52
17	156	5.59	6.53	4.9

Kvartāra ūdens komplekss nav pārsegts ar necaurlaidīgu iežu slāni, līdz ar to augšējo robežnosacījumu veido atmosfēras nokrišņu daudzums, kas infiltrējas gruntsūdeņos (Barthel et al., 2005). Infiltrācijas apjoms un pieplūdes sadalījums būtiski mainās laikā, atkarībā no meteoroloģiskajiem apstākļiem, galvenokārt, nokrišņu un temperatūras režīma. Aprēķinātie infiltrācijas apjomi sīkāk apskatīti 1.1.4. nodaļā. Atmosfēras infiltrācija modelī tiek definēta struktūrā esošajiem materiāliem, kuri atsedzas zemes virspusē. Apjoma noteikšanai tiek izmantotas metra vienības diennaktī. Visai teritorijai tika definēts vienots infiltrācijas apjoms.

Lai noteiktu atšķirīgus infiltrācijas apjomus atsevišķos teritorijas apgabalos, teritorijas ziņā apjomīgākos modeļos laukumu ieteicams sadalīt pēc infiltrācijas apstākļiem (He et al., 2005), kā tas nereti tiek darīts arī gadījumos, kad notiek lauksaimniecības zemju apūdeņošana (Wen et al., 2007; Kollet & Maxwell, 2005; El Yaouti et al, 2008). Infiltrācijas barošanās lielums ir atkarīgs no daudziem faktoriem – gruntsūdens līmeņa ieguluma dziļuma, aerācijas zonu veidojošo nogulumu litoloģiskā sastāva, teritorijas drenētības pakāpes, veģetācijas tipa u.c. (Levins, 2006; El Yaouti et al, 2008).

1.3.5. Modeļa kalibrācija

Izveidotais modelis tika pārbaudīts un kalibrēts manuāli, pēc aprēķināto ūdens līmeņu atbilstības faktiskajiem GŪL novērojumiem. Kalibrācijas kopu veidoja modeļa laukumā izvietotie 95 monitoringa urbumi ar līmeņu mērījumiem vienu reizi mēnesī (11. pielikums). No mērījumiem tika sastādīti vidējie novērojumu urbumu līmeņi 2008. gadam. Modeļa kalibrācija tika veikta vairākos secīgos posmos. Monitoringa urbumu kopa tika sadalīta divās grupās, pēc nejaušas izvēles principa.

Grupa Nr 1, tika izmantota pirmās kalibrācijas procesā, bet grupa Nr. 2 tika izmantota

atkārtotas kalibrācijas vajadzībām. Pēc modeļa kalibrācijas modeļa verifikācija veikta ar abām novērojumu grupām kopā.

Sākotnēji monitoringa urbumos novērotie GŪL tika apstrādāti nosakot to minimālos un maksimālos līmeņi viena gada laikā, pēc kā iespējams noteikt to maksimālās gada svārstības un aprēķināt katra novērojuma urbuma gada vidējos līmeņus. Tālāk, izmantojot *HiFiGeo* programmatūras funkciju, tika ielasīti datu faili ar urbumu koordinātēm, to numuriem, filtra intervāliem un tajos novērotajiem gada maksimālajiem un minimālajiem GŪL. Attiecīgi, katrā novērojumu rindā atainojās modeļa aprēķinātie GŪL katram urbumam. Nākamajā solī rezultāti ielasīti rēķintabulās un aprēķinātas to vidējo vērtību starpības un starpību variāciju amplitūda. Kalibrācija tika veikta līdz vidējie aprēķinātie lielumi no vidējiem novērotajiem atšķīrās mazāk kā par 1 m.

Lai objektīvi novērtētu kalibrācijas precizitāti, jāievieš skaitliski izmērāms lielums. Šādā novērtējumā jāiekļauj pieejamā informācija par novērotajiem PŪL un caurplūdumiem (ja tie ir aprēķināmie parametri) (Seņņikovs, 2010).

Vidējā novirze, tiek aprēķināta izmantojot 1.7. vienādojumu, tā, galvenokārt, raksturo, vai modeļa aprēķinātās PŪL vērtības vidēji sakrīt ar novērotajām (Seņņikovs, 2010):

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_{mer} - h_{apr})_i \quad (1.7.)$$

kur:

h_{mer} – nomērītās līmeņu vērtības;

h_{apr} – aprēķinātās līmeņu vērtības;

N – novērojumu skaits.

Vidējā kvadratiskā novirze – raksturo, vai modeļa aprēķinātās PŪL vērtības sakrīt ar novērotajām katrā no vietām (Seņņikovs, 2010), to aprēķina pēc vienādojuma (1.8.):

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_{mer} - h_{apr})_i^2} \quad (1.8.)$$

kur:

h_{mer} – nomērītās līmeņu vērtības;

h_{apr} – aprēķinātās līmeņu vērtības;

N – novērojumu skaits.

Ja modeļa aprēķini visos novērojumu punktos sakrīt ar novērojumiem, tad šie kritēriji ir tuvināti 0 (Seņņikovs, 2010).

Modeļa kalibrācija uzsākta ar literatūrā pieejamajiem parametriem, no iepriekš veiktajiem pētījumiem teritorijā vai tās tuvumā. Modeļa kalibrācijas procesā materiālu filtrācijas koeficienti būtiski mainīti, lai nodrošinātu modeļa labāko atbilstību modelētajai

videi. Modeļa kalibrācija ir ļoti laikietilpīgs process, bet kalibrācijai ir liela nozīme, jo tā ietekmē rezultātu ticamību un to interpretāciju (Dawoud & Raouf, 2008). Modeļa teritorijā Baltijas ledus ezera un limnoglaciālajiem nogulumiem, kas ir kvartāra ūdens horizonta ūdeni caurlaidīgā daļa filtrācijas koeficients novērtēts intervālā no 20 m/dnn līdz 74 m/dnn, atkarībā no izpētes laukuma atrašanās vietas un tajos izplatīto iežu litoloģiskā sastāva (Gavena un Levina, 2000). Tādēļ kalibrācijas laikā šie lielumi mainīti ievērojamā diapazonā, sākot no 10 – 90 m/dnn. Kalibrācijas procesā tika izstrādāti vairāki simti scenāriju, t.i., veikti līmeņu aprēķini pie mainīgiem apstākļiem. Labākie 138 scenāriji dokumentēti un statistiski apstrādāti. Sākotnēji, lai risinātu modeļa aprēķinu neatbilstību novērotajiem līmeņiem, tika precizētas un piemeklētas izmantoto materiālu īpašības, līdz variācijas amplitūda starp aprēķinātajiem un novērotajiem lielumiem vairs būtiski nemainījās. Sekojoši noteiktas teritorijas, kur kļūda nav saistīta ar materiālu filtrācijas īpašībām. Līdz ar to tika mainīti arī sākotnēji uzstādītie robežnosacījumi, galvenokārt, ūdens līmeņu augstuma atzīmes infiltrācijas baseinos un pētījumu teritorijā esošajos ezeros.

Modeļa kalibrācijas laikā tika atklātas vairākas modeļa nepilnības, kas pie atbilstošiem RN un ievades parametriem pieļāva modelī kritiskas kļūdas. Tādēļ tika salīdzinātas urbumu augstumatzīmes novērojumu urbumiem ar virsmas atzīmēm modelī, vietās, kur līmeņi būtiski atšķīrās. Rezultātā tika atklātas vairākas kļūdainas slāņa virsmas atzīmes, kas lielā mērā sakrita ar kļūdaini aprēķinātajiem GŪL modeļa laukumā. Kļūdainie novērojumu urbumi tika izslēgti no kalibrācijas urbumu kopas. Kopā no 95 urbumiem, tika izslēgti 7 urbumi Nr: 104, 145, 152, 14j, 5n, 85a, 8j.

Kalibrācija tika turpināta ar jaunizveidoto datu kopu līdz vidējā starpība starp aprēķinātajiem un novērotajiem līmeņiem dažādos aprēķinu mēģinājumos sasniedza 0,02 m, 0,029 m un 0,04 m. No visas kalibrācijas datu kopas maksimālās un minimālās starpības starp novērotajiem un modelētajiem līmeņiem konstatētas 17. urbumā -3,65 m, kur aprēķinātais līmenis bija par zemu, bet 107. urbumā līmenis 3,22 m bija par augstu; Šādām kritiskām vērtībām ir izskaidrojums, kas sīkāk apskatīts 3.3. nodaļā. Balstoties uz kopējo datu kopu, šāda kļūda netika uzskatīta par pietiekamu modeļa tālākai kalibrācijai. Kalibrācijas process tika apstādināts, kad autore secināja, ka pie izveidotās ģeoloģiskās struktūras modelis ir sasniedzis iespējami labāko rezultātu.

2. DARBA TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS

Lai labāk izprastu darbā aprakstīto metodiku un spētu atbilstoši interpretēt darbā iegūtos rezultātus, nepieciešams izprast metodikas teorētisko daļu. Nodaļā aprakstīti: telpiskas plūsmas hidroģeoloģiskie vienādojumi; galvenie principi un attīstības posmi hidroģeoloģisko modeļu veidošanā; kā arī to pielietojums.

2.1. Hidroģeoloģisko plūsmu aprēķinu pamatvienādojumi

Pazemes ūdens plūsmu nosaka daudzi grunts raksturojošie parametri, taču vispārējās ūdens plūsmas likumsakarības porainos vai nedaudz plaisainos iežos nosaka Darsī likums, ko izsaka ar vienādojumu (Rushton, 2005):

$$Q = kF \frac{\Delta H}{l} \quad (2.1.)$$

kur:

Q - plūsmas caurtece jeb ūdens tilpums, kas filtrējas caur iežu slāņa šķērsriezuma laukumu laika vienībā, ko izsaka m^3/dnn ;

F – ūdens plūsmas ieža šķērsriezuma laukums, m^2 ;

ΔH – līmeņu starpība divos plūsmas šķērsriezumos, m ;

l – filtrācijas ceļa garums, m ;

k – filtrācijas koeficients, kas raksturo ieža ūdenscaurlaidību, m/dnn .

Telpiskas plūsmas risinājumu veidošanai izmanto sarežģītākus vienādojumus, kas atvasināti no Darsī likuma. Vispārīgi trīsdimensionālas ūdens piesātinātas plūsmas raksturošanai porainā vidē tiek izmantots stacionāras pazemes ūdeņu filtrācijas pamatvienādojums 2.2. vienādojums (Ghosh et al., 2006):

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(K_{xx} \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_{yy} \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(K_{zz} \frac{\delta h}{\delta z} \right) - Q = S_s \frac{\delta h}{\delta t} \quad (2.2.)$$

kur:

K_{xx} , K_{yy} ; K_{zz} – filtrācijas koeficients paraleli x , y un z asīm, pieņemot, ka tas ir vienāds paralēli galvenajām asīm;

h – pjeozmetriskais ūdens līmenis;

Q – debits;

S_s – ūdens atdeves koeficients.

Tā kā filtrācijas koeficients ir viens no svarīgākajiem parametriem hidroģeoloģisko skaitlisko modeļu sagatavošanā, tad tas tika apskatīts detalizētāk (2.1. tabula).

Dažādu iežu filtrācijas koeficienta aptuveno vērtību intervāli (Indāns, 1986; Todd & Mays, 2005)

Māli	< 0.001	Smilts, rupjgraudaina	20 - 50
Smilšmāls	0.001 - 0.1	Grants	20 - 150
Mālsmilts	0.1 - 0.5	Oļi (oļi ar smilti)	100-500 (500-1000)
Less	0.5 - 1.0	Smilšakmens	0.1 - 100
Smilts, putekļaina, smalkgraudaina	1 - 5	Kūdra, atkarībā no sadalīšanās pakāpes	0.01 - 15
Smilts, vidējgraudaina	5 - 20	Dūņas	0.1 -0.0001

2.2. Matemātiskie modeļi un simulācijas

Matemātiskās modelēšanas mērķis ir izveidot kādas reāli funkcionējošas sistēmas imitāciju. Pazemes ūdeņu izpētē un apsaimniekošanā ir vairāki paņēmieni un pieejas, kā šādas imitācijas iespējams realizēt. Viena no perspektīvākajām ir datormodelēšana, kas būtībā ir matemātiskās modelēšanas veids, izmantojot datorprogrammas kā palīgīdzekli (Andersen, 1993).

Hydroģeoloģisko modeļu izstrādi var iedalīt divpadsmit tā attīstības posmos (Todd & Mays, 2005):

1. modeļa mērķa noteikšana un problēmas izvirzīšana;
2. konceptuālā modeļa attīstīšana;
3. pamatvienādojumu un programmatūras izvēle;
4. modeļa dizains – konceptuālā modeļa piemērošana modelēšanas vajadzībām;
5. kalibrācija – noskaidrošana vai modeļa parametri sakrīt ar veiktajiem lauka mērījumiem;
6. modeļa jutīguma analīze – ticamības noteikšana kalibrētam modelim;
7. modeļa verifikācija – izmantojot kalibrētos parametrus un slodzes izveidot mainīgus lauka apstākļus, lai pārlicinātos, ka modelis patiešām strādā precīzi;
8. simulāciju sastādīšana, lai novērtētu sistēmas reakciju;
9. simulāciju jutīguma analīze, lai novērtētu parametru mainīguma ietekmi;
10. modelēšanas rezultātu un materiāla prezentācija;
11. pēcaudita revīzija ar jauniem lauka mērījumiem;
12. modeļa pārprojektēšana vadoties pēc revīzijas rezultātiem.

Pirms modelēšanas procedūras svarīgi ir izvērtēt pieejamo datu precizitāti, īpašu uzmanību veltot parametriem, kas būtiski var mainīt modeļa aprēķināto rezultātu. Taču nav nepieciešamības iegūt pēc iespējas lielāku datu kopu, kas ir mazāk svarīga modeļa reprezentācijai, jo tas tikai var ietekmēt datorprogrammu veikspēju un datu iegūšanai tiek nelietderīgi patērēts papildus laiks (Ghosh et al., 2006).

Modeļa sagatavošanai nepieciešama informācija par četrām galvenajām datu kopām,

kas sekojoši sīkāk aprakstītas (Fetter, 2001).

- Ūdens atradnes novietojums un tās konfigurācija. Hidroģeoloģiskā griezuma parametri, t.i., ūdens nesējslāņu un sprosts slāņu biezumi un izplatība; virszemes ūdens objektu un avotu atrašanās un konfigurācijas; robežnosacījumi katram slānim hidroģeoloģiskajā griezumā.
- Caurplūdumi, filtrācijas koeficientu un krājumu apjomi un to variācijas ūdens horizontiem un sprosts slāņiem, ūdens horizontu mijiedarbība ar citiem ūdens horizontiem un hidrauliskā saistība ar virszemes ūdens objektiem.
- Pjezometriskais un GŪL, kā arī plūsmas virzieni, kas noteikti pēc izohipsu un izopjēzu kartēm vai novērojumiem dabā; ūdens horizontu dabīgās papildināšanās un atslodzes apjomi.
- Mākslīgo ūdens papildināšanas vai atslodzes objektu, piemēram, dīķi, meliorācijas grāvji, ūdensguves urbumi, akas, to daudzums, atrašanās vietas un mijiedarbības apjomi ar ūdens horizontu; ūdensguves objektu statistiskie un dinamiskie līmeņi.

Specializētas programmatūras izmantošanai hidroģeoloģisko procesu modelēšanai ir vairākas priekšrocības salīdzinot ar citiem modelēšanas paņēmieniem (Fetter, 2001):

1. modeļa sagatavošana ir ātra, jo nav nepieciešamības veidot iekārtas vai maketus, kā arī aprēķini daudzkārt tiek veikti automātiski;
2. metode ir salīdzinoši lēta, galvenie materiālie ieguldījumi saistās ar tehnikas un programmas nodrošinājuma iegādi;
3. metode ir viegli modificējama un atkārtoti izmantojama;
4. process ir atgriezenisks, t.i., procesa gaitā pieļautās kļūdas ir labojamas;
5. vienlaicīgi iespējams ņemt vērā vairākus komplicētus faktorus un to savstarpējo mijiedarbību;
6. laikā neierobežots, t.i., iespējams veikt ne tikai faktiskās situācijas modelēšanu, bet arī prognozes laikā pie mainīgiem apstākļiem jeb simulācijas.

Tiek pieņemts, ka vairumā gadījumu datormodelēšanu izmanto četru galveno veidu problēmu risināšanā (Groat, 2001):

1. pazemes ūdeņu plūsmas virzienu un ātrumu noteikšanai;
2. piesārņojuma izplatības un dinamikas prognozēšanai;
3. pazemes ūdens temperatūras izplatības kartēšanai;
4. pazemes ūdens horizontu konfigurācijas un neviendabīguma noteikšanai.

Galvenokārt, datormodeļus iedala pēc to funkcijām, savietojamības ar dažādām darba platformām un citu datormodeļu pakotnēm. Pieejamības, ka arī pamataprēķinu atvasinājumu atšķirībām. Pēc vides iedala porainas un plaisainas vai kavernoza vides modeļus, kas izdalīti

sakarā ar dažādo ūdens kustību likumsakarībām atkarībā no iežu uzbūves. Pēc mērķa jeb modeļa funkcijām izdala plūsmu, materiālu transporta, izšķīdušās vielas transporta, peldošā slāņa transporta un temperatūras plūsmas modeļus vai to papildu pakotnes (Ghosh et al., 2006).

Konceptuālā modeļa izstrādei, kas uzskatāms par pirmo posmu modeļa attīstīšanā, nepieciešams izveidot teritorijas ģeometriju jeb hidroģeoloģisko apstākļu maiņu vertikālā un horizontālā virzienā (Robins et al., 2004). Kad izveidots hidroģeoloģiskais griezumš, tiek veidota teritorijas ģeometrija, jeb modeļa režģis. Ir izveidotas vairākas pieejas šī uzdevuma risināšanai, plašāk tiek lietotas trīs diskretizācijas formas galīgo tilpumu centrētu mezglu centrēta, galīgo tilpumu režģa centrēta un galīgo elementu metodes (Fetter, 2001).

Galīgo tilpumu metodes būtība ir sastādīt bilanci diskretizācijas objektos. Katrā objektā tiek aprēķināta sava pjezometriskā līmeņa vērtība. Galīgo diferencu metode ir galīgo tilpumu metodes gadījums, ja diskretizācijas elementi ir taisnstūra paralēlskaldņi. Galīgo elementu metodē pjezometriskais līmenis tiek definēts diskretizācijas elementu mezglu punktos, bilances vienādojums tiek sastādīts visiem objektiem, kas satur doto punktu. Līdz ar to bilance tiek sastādītā pārklājošos apgabalos. Katra apgabala iekšienē pjezometriskais līmenis mainās atbilstoši bāzes funkcijām, kuras vienkāršākā gadījumā ir lineāras (Seņņikovs, 2010).

Nestrukturēti režģi ir labāk pielāgojami objekta formai kā arī vieglāk pielāgojami pārejai no rupjākas diskretizācijas uz smalkāku (Seņņikovs, 2010).

Galīgo elementu metodes pamatideja ir pārveidot pamatvienādojumu integrālā formā, kas raksturotu katra elementa aprēķinu kārtību, bet netiek attiecināts uz visu aprēķinu apgabalu (Thangarajan, 2007).

2.3. Robežnosacījumu definēšana, matemātisko modeļu kalibrācija un verifikācija

Robežnosacījumi ir telpiski noteikti ierobežojumi katram modelī iestrādātajam slānim. Ir divas pieejas robežnosacījumu iezīmēšanai, t.i., manuāli ar peles kursoru grafiskajā datorprogrammas dialogā iezīmētas robežas vai nodefinētas matemātiski koordināšu veidā (Pinder, 2002).

Robežnosacījumi tiek noteikti ūdens horizonta visām malām horizontālā plaknē, kā arī horizontu pārsedzošajam un apakšā esošajam sprostslnim (Reilly, 2001).

Pazemes ūdens plūsmas sistēmā tiek izdalītas trīs veidu robežas (2.2. tabula): noteikta līmeņa, noteiktas plūsmas lieluma un līmeņa kā atkarīgā mainīgā plūsmas (Groat, 2001).

Robežnosacījumu veidi dabā hidroģeoloģiskajās sistēmās (sagatavojusi autore, pēc Groat, 2001)

Robežas veids	Robežas nosaukums, pēc autora latviskotais nosaukums (angliskais nosaukums)	Matemātiskais robežas apzīmējums
1. veida robežnosacījums	Dirihlē (Dirichlet)	$h(x, y, z, t) = konst$
2. veida robežnosacījums	Neimaņa (Neumann)	$\frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial n} = konst$
3. veida robežnosacījums	Košī (Cauchy)	$\frac{\partial h}{\partial n} + ch = konst$

Kalibrācijas matemātiskajos modeļos tiek veiktas pēc konceptuālā modeļa pirmreizējās izstrādes. Kalibrāciju galvenais mērķis ir tuvināt izveidotā modeļa parametrus reāli funkcionējošai sistēmai. Kalibrācija tiek veikta mainot izmanto parametru lielumus, līdz modelis sakrīt ar lauka datiem (Welsh, 2008). Kalibrāciju var veikt papildinot ūdens līmeņu datu kopu vai iestrādājot modelī izohipsu vai izopjēzu kartes. Kalibrācija tiek veikta laikā nemainīgai situācijai (Pinder, 2002).

Kalibrācija ir nezināmo (nenoteikto) modeļa parametru noteikšana, lai aprēķinu rezultāti sakristu ar faktiskajiem novērojumiem dabā (Rushton, 2005). Kalibrāciju var veikt manuāli vai automātiski (He et al., 2007). Automātiskas kalibrācijas vajadzībām tiek izmantotas atsevišķas programmu pakotnes, kas atvieglo kalibrācijas procesu. Šādas pakotnes ir pieejamas lielai daļai plaši izmantotām hidroģeoloģiskās modelēšanas datorprogrammām (He et al., 2007).

Galvenie parametri, pēc kuriem var tikt salīdzināti modelēšanas rezultāti un faktiskie rezultāti ir (Todd et al., 2005):

- 1) ūdens līmeņi;
- 2) ūdens plūsmas virziens;
- 3) hidrauliskais gradients;
- 4) ūdens daudzums horizontālā;

Piesārņojuma izplatības modelēšanas vajadzībām tiek izmantoti vēl sekojošie parametri (Todd et al., 2005):

- 1) piesārņojuma koncentrācijas;
- 2) piesārņojuma migrācijas ātrums;
- 3) piesārņojuma migrācijas virzieni;
- 4) piesārņojuma degradācijas ātrumi.

Kompleksā modelī ir daudz nenoteiktības pakāpju un kalibrācija parasti nav viennozīmīga. Kalibrēts modelis sniedz labāko iespējamo, nevis patieso priekšstatu par

modelējamo objektu (Seņņikovs, 2010).

Ir pieņemts, ka labā prakse ir ierobežot brīvības pakāpju skaitu, jo gadījumā, ja ir iespēja patvaļīgi mainīt materiāla īpašības katrā elementā vai robežnosacījumus, var nokalibrēt gandrīz jebkuru modeli (Seņņikovs, 2010). Modelēšanas labā prakse nosaka, ka simulētajiem datiem nevajadzētu atšķirties vairāk par 10 % no lauka apstākļos novērotajiem (Fetter, 2001). Taču jebkura modeļa kalibrācijas pakāpe ir subjektīva un atkarīga no vairākiem faktoriem (Al-Abed & Al-Sharif, 2008; El Idrysyy & De Smedt, 2006; Zyvoloski, et al., 2003):

- modelējamās teritorijas izmēra;
- modelēšanas mērķa;
- kalibrācijas kopas izmēra;
- pieejamo datu apjoma un to kvalitātes;
- ģeoloģiskās uzbūves apstākļiem.

Verifikāciju veic pēc kalibrēta konceptuālā modeļa izstrādes. Verifikācijas process ir izstrādātā modeļa pārbaudes veids, kurā tiek noskaidrots kā izveidotā sistēma reaģē uz tai pieliktajām izmaiņām, slodzēm. Verifikācijas procesa vajadzībām var tikt sastādīts prognožu modelis uz īsu laiku un, ja ir tāda iespēja, tad pārbaudīti prognožu rezultāti ar izmaiņām reālajā sistēmā (Fetter, 2001). Verifikācijas soļa veikšana ir obligāts iekšējās modeļa pārbaudes etaps, taču pēc tā izdarīšanas ir lietderīgi pārkalibrēt modeli, izmantojot visus pieejamos novērojumu datus, lai samazinātu objektīvo kalibrācijas parametru nenoteiktību (Seņņikovs, 2010).

Modeļa verifikācija tā ekspluatācijas laikā tiek veikta ar jauniem novērojumiem dabā. Filtrācijas koeficientu maiņa ir plašāk pielietotais mainīgais lielums verifikācijas procesā (Seņņikovs, 2010).

2.4. Vizualizāciju iespējas un to nozīme ģeoloģiskajos datormodeļos

Vizualizācijām ir liela nozīme gan datormodeļu sagatavošanā, gan to prezentācijā (Robins et al, 2005). Divu un trīs dimensiju paņēmieni izmantošana pirms hidroģeoloģiskā modeļa sagatavošanas sniedz iespēju detalizētāk noskaidrot pētījumu teritorijas ģeoloģisko uzbūvi, kas dod iespēju izstrādāt precīzāku hidroģeoloģisko griezumumu un konceptuālo hidroģeoloģisko modeli (Robins et al, 2005). Modelēšanas rezultāti bieži vien ir tieši atkarīgi no minētās konceptualizācijas detalitātes (Robins et al, 2005). Pārāk ģeneralizēts modelis, teritorijās ar sarežģītu ģeoloģisko uzbūvi, sniedz kļūdainus rezultātus, tādēļ ģeoloģiskā modeļa sagatavošanai ir būtiski izmantot trīs dimensiju vizualizācijas. Kā vēl viena priekšrocība minama iespēja apvienot vairāku datu avotu piemēram, urbumu litoloģisko un stratigrāfisko informāciju vienlaicīgu atainošanu (Regli et al., 2004).

Rezultātu analīzei vizualizācijas nepieciešamas, lai noskaidrotu plūsmas virzienus un telpisko pazemes ūdens līmeņu sadalījumu modelī. Šādas iespējas palīdz novērtēt radušos kļūdu un iemeslus un tos novērst (Todd & Mays, 2005).

3. MODELĒŠANAS REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Plūsmas modeļa iegūtie rezultāti

3.1.1. Stacionāra līmeņu sadalījuma modeļa iegūtie rezultāti

Balstoties uz to, ka ūdens līmeņus starp novērotajiem un modelētajiem rezultātiem nav iespējams objektīvi novērtēt, tad nepieciešama to statistiska salīdzināšana. Modeļa kalibrācijas procesā tika novērtēti un salīdzināti centrālās tendences un variācijas rādītāji starp novērotajām un aprēķinātajām datu rindām.

Tika sagatavoti divi kalibrēto modeļu varianti modeļa laukumā 2008. gadam:

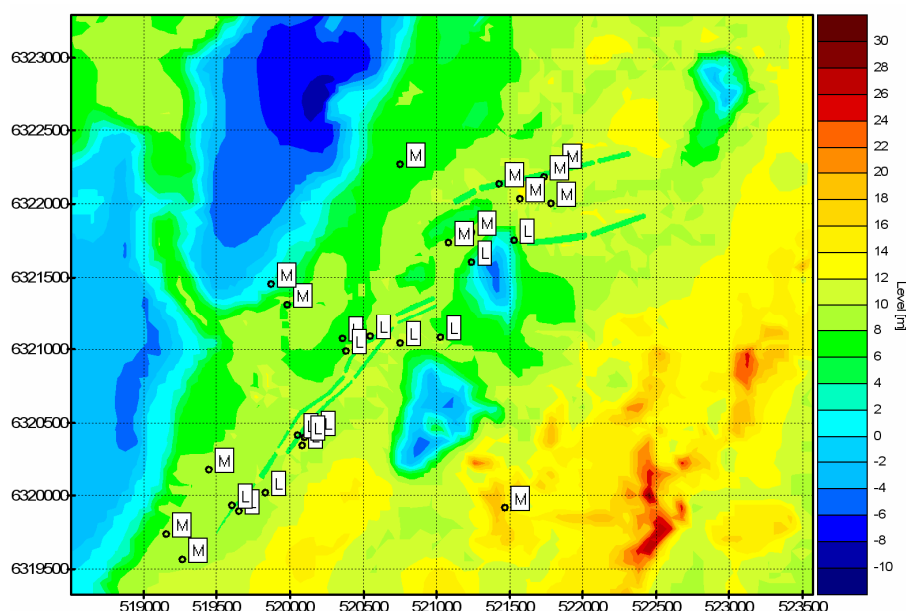
- 1) GMP infiltrācijas baseinus nodefinējot kā pirmā veida robežnosacījumus;
- 2) GMP infiltrācijas baseinos ūdens pieplūdi nodrošinot ar intensīvāku atmosfēras infiltrāciju.

Pirmajā gadījumā modelis ticis kalibrēts detalāk un viens no mainīgajiem lielumiem bija pašu infiltrācijas baseinu ūdens līmenis. Pirmajā variantā starpība starp modeļa aprēķinātajām vērtībām un novērojumiem dabā vidēji atšķīrās par 0,2 m. Modelis nokalibrēts imantotojot materiālu īpašības, kas apkopotas 3.1. tabulā. Novērotie un modeļa aprēķinātie vidējie GŪL 2008. gadam apkopoti 18. pielikumā. Atsevišķos iecirkņos šī GŪL starpība ir daudz lielāka un starpības variācijas amplitūda veido 7,05 m. Maksimālā starpība novērojumiem un aprēķinātajiem lielumiem ir 17. urbumā, kur modeļa aprēķinātais GŪL ir par 3,9 m zemāks nekā novērojumos konstatētais. Urbumā 32A aprēķinātais GŪL ir par 3,15 m augstāks kā novērotais GŪL. Urbumi, kuros GŪL atšķirība sastāda vairāk par 2 m, atainoti 3.1. attēlā.

Kā redzams attēlā pārāk augsti GŪL līmeņi ir tiešā infiltrācijas baseinu tuvumā, bet pārāk zemi līmeņi ir starp ūdensgūtnes Baltezers urbumu rindām un Lielo un Mazo Baltezeru. Pārējā teritorijā aprēķinātais gruntsūdens līmeņu sadalījums ir tuvāks novērotajiem. Un uzskatāms par ļoti atbilstošu. Neskatoties uz atsevišķās vietās novērotajām lielajām GŪL starpībām, pēc autores domām, atbilstoši iegūtajiem datiem, modelis ir nokalibrēts apmierinoši.

Modeļa kalibrācijas laikā piemeklētie materiālu parametri

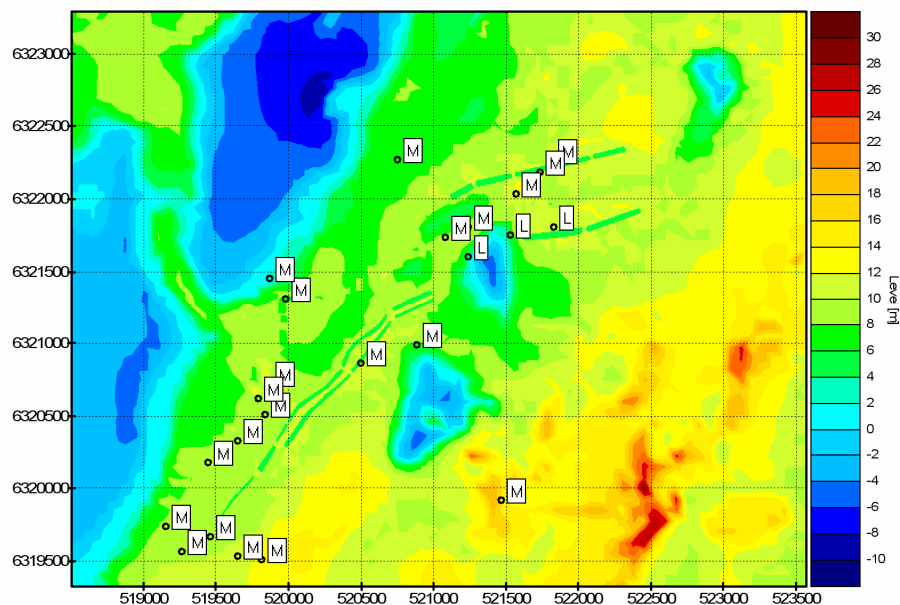
Materiāls	Filtrācijas koeficients XY	Filtrācijas koeficients Z	Porainība
eQ4	50	50	0.39
lgQ3ltvb	40	40	0.39
lgQ3ltv	10	10	0.39
gQ3ltv	0.01	0.01	0.3
D3gj2	13	13	0.2
D3gj1	15	15	0.2
D2br	1.2	1.2	0.2
D2ar	1.2	1.2	0.3
D2nr	0.00001	0.00001	0.3
Dūņas	0.5	0.5	0.3



3.1. attēls. Pirmais kalibrētā modeļa variants ar monitoringa urbumu līmeņu starpību lielāku par 2 m starp aprēķinātajiem un novērotajiem ūdens līmeņiem (L- aprēķinātais līmenis ir par augstu; M – aprēķinātais līmenis ir par zemu)

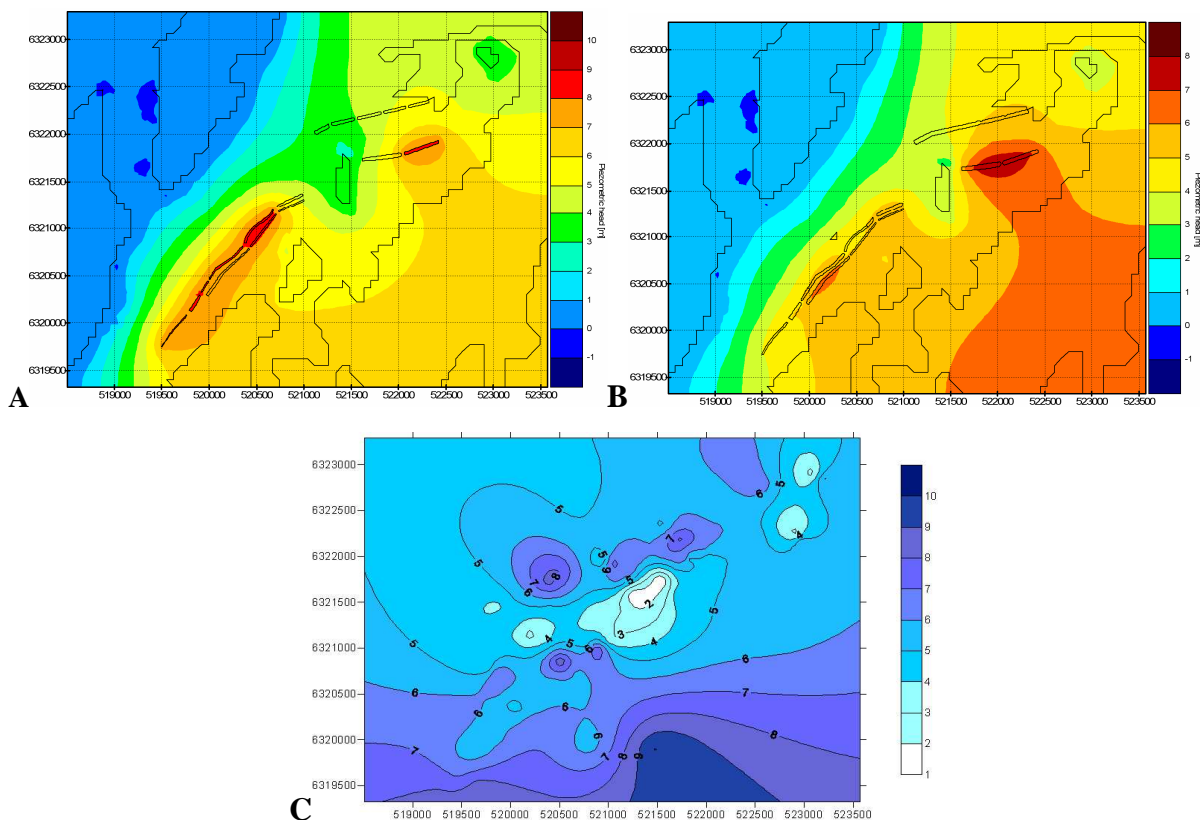
Otrajā gadījumā starpība starp novērotajiem un aprēķinātajiem līmeņiem pa visu modeļa laukumu vidēji veidoja -0,84 m starpību. Novērotie un modeļa aprēķinātie vidējie GŪL 2008. gadam apskatāmi 18. pielikumā. Atsevišķos iecirkņos šī starpība ir daudz lielāka un starpības variācijas amplitūda ir lielāka kā pirmā varianta gadījumā, t.i., 7,9 m. Maksimālā starpība starp novērojumiem un aprēķinātajiem lielumiem ir urbumā 1j, kur modeļa aprēķinātais GŪL ir par -5 m zemāks nekā novērojumos konstatētais, kā arī urbumā 107, kur aprēķinātais GŪL ir par 2,98 m augstāks nekā novērotais. Urbumi, kuros GŪL atšķirība sastāda vairak par 2 m, atainoti 3.2. attēlā. Kā redzams attēlā pārāk augsti GŪL līmeņi ir 16.

un 17. infiltrācijas baseinu tuvumā, bet pārāk zemi līmeņi ir novērojami pie nefunkcionējošajiem infiltrācijas baseiniem Nr. 11, 12, 13, 14 un 15, kā arī ekspluatācijas urbumu rindā un pie modeļa ārējās robežas.



3.2. attēls. Otrais kalibrētā modeļa variants ar monitoringa urbumu līmeņu starpību lielāku par 2 m starp aprēķinātajiem un novērotajiem ūdens līmeņiem (L- aprēķinātais līmenis ir par augstu; M – aprēķinātais līmenis ir par zemu)

Izmantojot modeļos aprēķinātās GŪL sadalījuma vērtības sagatavotas GŪL izohipsu kartoshēmas 3.3. attēls, kur tās salīdzinātas ar kartoshēmu, kas sagatavota pēc faktiski novērotajiem GŪL modeļa laukumā. Kā redzams attēlos, novērotais ūdens līmeņu sadalījums nav konsekvents. Un aprēķinātais GŪL sadalījums abos variantos tikai aptuveni sakrīt ar novērojumiem dabā. Šis jautājums sīkāk apskatīts 3.3. nodaļā.



3.3. attēls. Kalibrēto modeļu aprēķināto GŪL salīdzinājums ar monitoringa urbumos novērotajiem GŪL. A – izohipsas 1. kalibrācijas variantam; B-izohipsas 2. kalibrācijas variantam; C- novēroto ūdens līmeņu izohipsas. (sagatavojusi autore, pēc RŪ, 2009)

Kas attiecās uz citiem iegūtajiem parametriem, tad kopējais ūdens daudzums modelī, uz ko norāda salīdzinoši nelielā starpība starp novērojumu un aprēķinu vērtībām, ir atbilstošs. hidrauliskais gradients kvartāra ūdens horizontā un plūsmu vektori ir līdzīgi abos izmēģinātajos variantos un ir atbilstoši teorētiskajam plūsmas virzienam un atbilst arī literatūrā minētajiem vidējiem lielumiem (Buzajevs u.c., 1997; Krutofala un Levins, 2006).

Infiltrācijas baseinu noteikšanas metode 2. variantā ir labāks risinājums īslaicīgu prognožu sastādīšanai, jo baseina papildināšanās notiek pakāpeniski, un pietece baseinam šādā gadījumā ir maināma katram mēnesim, atbilstoši patiesajam infiltrācijas apjomam, nevis, kā pirmā robežnosacījuma gadījumā kad ir noteikts patstāvīgs ūdens līmenis. Lai varētu izmantot situāciju modeļos 2. variantu, nepieciešams to atkārtoti nokalibrēt, tādēļ situāciju sagatavošanai tika izvēlēts 1. variants.

3.1.2. Situāciju modeļu iegūtie rezultāti

Par pamatni situāciju modeļiem tika izmantots 1. kalibrētais modeļā variants, kur darba gaitā tika sagatavoti divi situāciju modeļi jeb scenāriji:

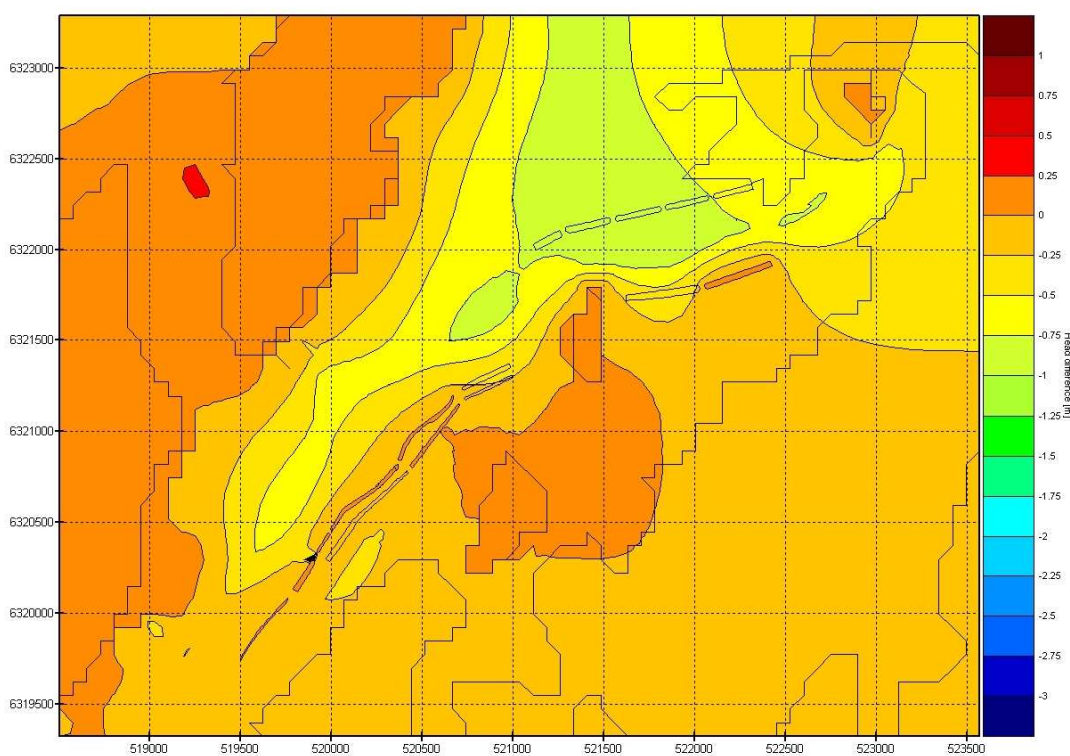
- gruntsūdens līmeņu sadalījums teritorijā pie dubultas ekspluatācijas palielināšanās,

nemainot GMP apjomus;

- gruntsūdens līmeņu sadalījums teritorijā pie patreizējiem ekspluatācijas apjomiem, neizmantojot GMP;

Gruntsūdens līmeņu sadalījums teritorijā pie dubultas ekspluatācijas palielināšanās, nemainot GMP apjomus.

Pie divkāršas ūdensgūtnu jaudas palielināšanas, vidējais GŪL pazeminājums monitoringa urbumos pēc modeļa prognozēm modeļa laukumā sastāda vidēji - 0,5 m. Ievērojamākais pazeminājums novērojams pie ūdensgūtnes Baltezers ekspluatācijas urbumu rindas (3.4. attēls), kas ir saprotami, jo šajā teritorijā veidotos lielāka depresijas piltuve. Ekspluatācijas urbumos pazeminājums sastādītu aptuveni no 0,2 līdz 1 m ūdensgūtnei Baltezers, bet ūdensgūtnei Baltezers II pazeminājums sastādītu ne vairāk par 0,2 m. Lielākais līmeņu pazeminājums vērojams arī vietās, kur atsevišķo urbumu attālums rindā ir mazāks par 20 m. Daudz savstarpēji ļoti tuvi novietotu urbumu ir starp 85 un 106 ekspluatācijas urbumiem.

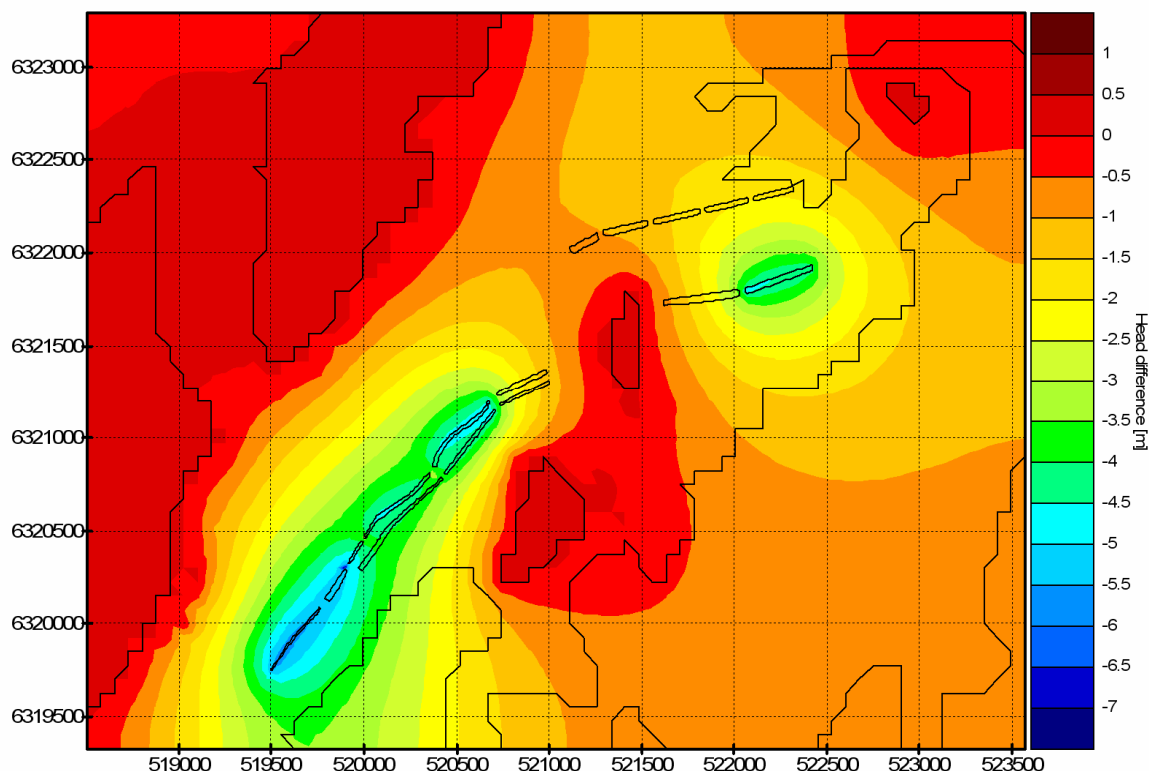


3.4. attēls. Ūdens līmeņu izmaiņas pie divkāršas ūdensgūtnu jaudas palielināšanas, m

Šāda situācija ir pieņemama, jo urbumu filtriem ir liels filtra intervāls kā arī pētījumu teritorijā ūdens horizontu veido salīdzinoši liela biezuma nogulumi ar labām filtrācijas īpašībām, kas izskaidro salīdzinoši nelielo līmeņu pazeminājumu pie ievērojamas pazemes ūdens ieguves palielināšanās. GŪL sadalījums šai situācijai pievienots darbam 19. pielikumā.

Gruntsūdens līmeņu sadalījums teritorijā pie patreizējiem ekspluatācijas apjomiem, neizmantojot GMP.

GMP pārtraukšana modeļa laukumā veidos GŪL pazeminājumu vidēji par 1,68 metriem. Vislielākais pazeminājums novērojams pašos GMP infiltrācijas baseinos un aptuveni 300 – 500 rādiusā ap tiem (3.5. attēls), kas ietekmē arī līmeņu pazeminājumu pie Baltezera ūdensgūtnes ekspluatācijas rindas, kur pazeminājums veido aptuveni 1 līdz 2 metrus. Vismazāk līmeņu pazeminājums ietekmē modeļa laukumā esošo ezeru ūdens līmeni. Sagatavotās situācijas GŪL sadalījums apskatāms 20. pielikumā.

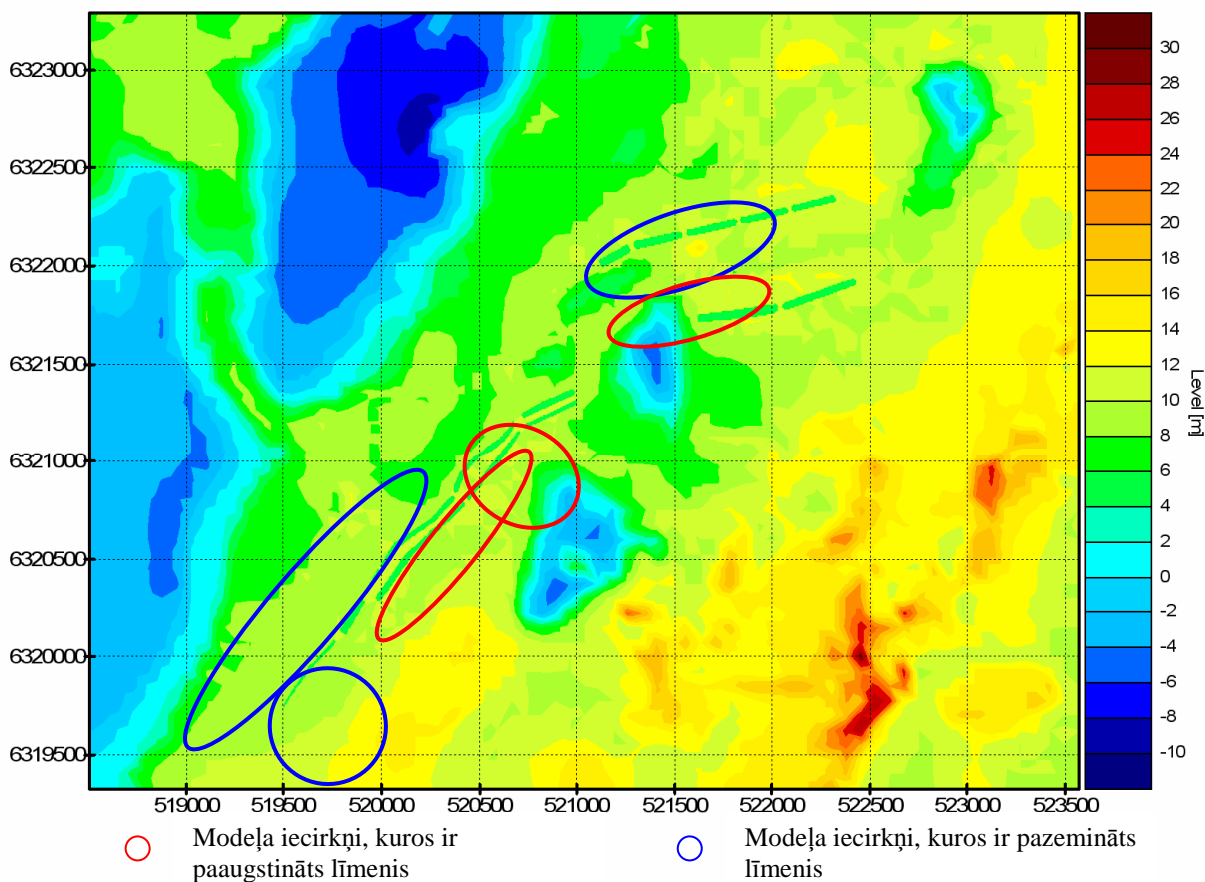


3.5. attēls. Ūdens līmeņu izmaiņas ņemot vērā ūdens padeves pārtraukšanu GMP infiltrācijas baseinos, m

3.2. Modeļa jutīgās teritorijas un jutīgie ievades parametri

Modeļa jutīgās teritorijas ir modeļa laukumi, kurās ir novērotas kalibrācijas grūtības; jutīgie ievades parametri ir modelī ievadāmie lielumi, pie kuriem būtiski mainās modeļa aprēķinātais rezultāts (Welsh, 2008). Vairākās vietās konstatētas lielākas neatbilstības starp aprēķinātajiem un faktiskajiem PŪL (3.1. un 3.2. attēli). Lielākās neatbilstības atrodas tiešā ekspluatācijas urbumu ietekmes zonā, kā arī atsevišķos mazākos iecirkņos pie modeļa ārējām robežām. Jau stacionāra modeļa kalibrācijas posmā tika konstatēts, ka kļūdainajās teritorijās, neatkarīgi no ievades parametriem, situācija būtiski neuzlabojas un kļūdainos PŪL nav iespējams uzlabot kalibrācijas procesā (šis jautājums sīkāk apskatīts 3.3. nodaļā). Arī mainot infiltrācijas baseinus kā robežnosacījumus uz infiltrācijas daudzumu, nevis definējot to kā

pirmā veida robežnosacījumu, jutīgo teritoriju līmeņi un to konfigurācija būtiski nemainījās. Modeļa teritorijā tika izdalīti seši jutīgie iecirkņi (3.6. attēls).



3.6. attēls. Iecirkņi modeļa laukumā, kuros raksturīgi ievērojami neatbilstīgi GŪL (sagatavojuši autore)

Modeļa jutīgākās teritorijas izvietotas starp infiltrācijas baseiniem un ekspluatācijas urbumu rindām, pārveidotajā pazemes ūdens plūsmas daļā. Īpaši mainīgi apstākļi novērojami starp infiltrācijas baseiniem un Lielo un Mazo Baltezeru, kā arī teritorijā no 16. infiltrācijas baseina līdz ūdensguves urbumiem, ieskaitot teritoriju arī aiz tiem. Kā redzams 3.5. attēlā, šie iecirkņi ir novietoti ļoti tuvu un vietām pat pārklājas. Kas norāda uz to, ka līmeņu sadalījums teritorijā ir ļoti komplicēts. Vietām ir konstatējamas pat lokālas paaugstinātas vai pazeminātas GŪL ieplakas un paaugstinājumi, kas nav saistīti ar ūdens līmeni kādā virszemes ūdens objektā vai ekspluatācijas urbumu darbību.

Kalibrācijas un modelēšanas laikā konstatēti arī vairāki ievades parametri, pret ko modelis ir jutīgāks un to maiņa būtiski maina modeļa aprēķināto rezultātu. Pats nozīmīgākais parametrs, kas maina līmeņu sadalījumu teritorijā ir infiltrācijas baseinu līmeņi Atsevišķu baseinu līmeņu ievades atšķirības par 0,1 m modelī jau būtiski mainīja rezultātu. Tas saistīts ar to, ka infiltrācijas baseini ir visdinamiskākā teritorijas daļa. Rezultātu ietekmē arī liels monitoringa urbumu skaits to tiešā tuvumā. Ņemot vērā, ka infiltrācijas baseinos pievadītais

ūdens daudzums sasniedz vairāk nekā 50% no kopējā ūdens pieplūdes daudzuma teritorijā, tad tā sadalījums un mainība laikā ir ļoti nozīmīgs modeļa funkcionalitātei.

Ļoti nozīmīga un rezultātus ietekmējoša ir arī filtrācijas koeficientu izvēle. Īpaši liela nozīme ir ūdeni vadošajiem kvartāra kompleksa smilšaino nogulumu filtrācijas koeficientu precīzai piemērošanai. Lai gan pēc autores domām, detalizētāka kalibrācija kā mainīgos izmantojot filtrācijas koeficientus minētajā modelī nesniegs labākus rezultātus. Salīdzinoši nelielu nozīmi kopējā ūdens bilancē nosaka arī *gQ3ltv* ūdens mazcaurlaidīgā slāņa filtrācijas īpašību izvēle, kas nosaka pārteces apjomus starp Kvartāra un Gaujas ūdens horizontiem.

3.3. Modeļa rezultātu apspriešana

Svārstību amplitūda.

Svārstības 2008. gada periodā atsevišķos monitoringa urbumos novērotas lielākas par 2 metriem 13., 124., 247., 295., 314., 10j., 11n., 20n., 25n., 32A., 38n., 49n., 6A. un 6j. urbumos (12. pielikums). Minimālās svārstības 2008. gada laikā novērotas urbumos 15, 16, 17, 145, 152, 112A, 12j, 14j, 1j, 37j, 38j un 3j (13. pielikums), kur svārstību amplitūda novērota no 0 līdz 0,5 m. Šādas minimālās starptības vērojamas tālāk no ūdensgūtņu ietekmes zonas, kas lielāka par 200 dienām (Buzajevs u.c., 1997). Iespējams, teritorijā, kurā atrodas minētie urbumi, ir raksturīgi mākslīgi neietekmēti hidroģeoloģiskie apstākļi un svārstību amplitūdu vairāk ietekmē infiltrācijas apstākļu izmaiņas daudzgadu periodā un sānu pietece, nevis ūdensgūtnes darbība.

Pārteces ietekme.

Ir zināms, ka vietām Baltezera apkārtnē sprostsblānis starp Kvartāra un Arukilas – Amatas pazemes ūdens kompleksi ir ļoti plāns un ūdens kompleksi ir hidrauliski saistīti (Aņikejeva u.c., 1997), tas varētu nozīmēt lielākas līmeņu svārstības tieši šajos iecirkņos, kur saikne starp ūdens horizontiem ir ciešāka. Ņemot vērā, ka zemāki gruntsūdeņu līmeņi ir vērojami tālāk no papildināšanas baseiniem, kā arī minimuma periodos, tad pārtece (barošanās) no Gaujas horizonta ūdeņiem varētu notikt šajos iecirkņos, kā arī gruntsūdens pirmspavasara un vasaras-rudens minimumos. Pārteces apjoms gan nav tik liels, šis faktors ietekmētu GŪL vairāk kā par dažām metra daļām.

Reljefs.

Ļoti liela nozīme bezspiediena ūdeņu plūsmu modelēšanai ir virsmas reljefa precīza izveide, jo tas ievērojami ietekmē lokālus gruntsūdeņu plūsmas virzienus. Neskatoties uz ievērojamo datu kopu virsmas reljefa izveidē, tas ir pārāk vispārināts un detalāku modeļu, ieskaitot ikmēneša modeļa izveidei ir pārāk ģeneralizēts. Tas galvenokārt saistīts ar faktu, ka virsmas reljefs tika izveidots bez daļējas monitoringa urbumu datu kopas augstumu atzīmju

piesaistes. Nepilnības tika konstatētas tikai modeļa kalibrācijas procesā. Šo problēmu iespējams risināt tikai sākotnēji noskaidrojot monitoringa urbumu augstumatzīmes un to precizitātes līmeni. Nenoteiktību iespējams labot tikai pārveidojot modeļa virsmas režģi, kas nozīmētu visa modeļa struktūras maiņu un arī visu robežnosacījumu atkārtotu definēšanu.

Modeļa laukums un diskretizācijas intervāls.

Modeļa laukuma palielināšana iespējams sniegtu precīzākus rezultātus. Kā trūkums šādam risinājumam minms, ka modeļa laukuma palielināšana ievērojami palielinātu veicamo darbu apjomu un modeļa kalibrācijas laiku, kā arī pieaugtu nezināmo lielumu daudzums. Modeļa laukuma palielināšana novērstu iespējami kļūdaini aprēķinātos līmeņus gar modeļa ārējām robežām. Sānu pieteces apjoms modeļa laukumā būtiski ietekmē tikai aprēķinātos GŪL pie modeļa ārējām robežām.

Modeļa režģā mezglu punktu palielināšana.

Palielinot modeļa režģa elementu blīvumu, iespējams precīzāk aprēķināt ūdens līmeņu sadalījumu plānā un vertikālā griezumā, kā arī papildināt modeli ar aktuālākajiem datiem. Tomēr, režģa elementu blīvuma palielināšana palielinātu nozīmētu jauna modeļa struktūras izveidi. Modeļa režģa blīvuma palielināšana palielinātu aprēķinu ilgumu.

Mainīgie pazemes ūdens bilances elementi un robežnosacījumu definēšana.

Galvenie mainīgie apstākļi modeļa laukumā ir nokrišņu daudzums, atsūkņēšanas apjomi, ezeru ūdens līmeņi un ūdens padeve infiltrācijas baseinos.

Infiltrācijas baseinu darbības un raksturojuma trūkums veicināja problēmas to iestrādei modelī, jo nav zināms precīzs infiltrācijas baseinu dziļums un ūdens padeves režīms tajos. Tāpat nav skaidrs, kā tiek realizēta padeve un vai ūdens līmenis baseinos tiek uzturēts pastāvīgi, vai ūdens padeve uz baseiniem ir periodiska. Tādēļ modeļa kalibrāciju būtu nepieciešams veikt ar vismaz vairāku gadu novērojumu datu rindām. Šāda pieeja varētu atrisināt vēsturiskā GŪL sadalījumu nenoteiktību teritorijā.

Pētījumu teritorijā pazemes ūdens atsūkņēšanas apjoms ir mainīgs, vidēji gada periodā Baltezers ūdensgūtnē tas svārstās no 2 l/s līdz 2,6 l/s vienam urbumam, Baltezers II ūdensgūtnē no 0,5 līdz 3,7 l/s vienam urbumam. Visi urbumi ir pieslēgti sifonvadiem, tādēļ katra atsevišķa urbuma ietekme uz atsūkņētā ūdens daudzumu nav zināma - tas svārstās no 0,9 – 10 l/s. Tādēļ darba ietvaros netika netika precizēts katra urbuma īpatnējais debīts, filtra intervāls un filtra diametrs, jo tas, iespējams, radītu vēl lielāku nenoteiktību un modeļa kalibrācijas grūtības. Nestrādājoša urbuma iestrāde datormodelī ar vidējiem parametriem sniegs mazāku kļūdu, nekā nestrādājoša urbuma iestrāde ar tā patiesajiem apjomiem. Lai varētu nodrošināt katra urbuma inventarizāciju, izmantojot modelēšanas metodi, modelis būtu jāveido daudz detālāks. Lai gan ņemot vērā ekspluatācijas urbumu izmantoto ūdens horizonta

intervālu, atsevišķu urbumu darbība, esošajā režīmā situāciju ietekmē ļoti minimāli.

Ņemot vērā to, ka infiltrētā ūdens apjoms no baseiniem izplatās salīdzinoši lēni filtrācijas ilgums no infiltrācijas baseiniem līdz ūdensgūtnēm novērtēts no 90 līdz 260 dnn., kas ir aptuveni 3 – 8 mēneši (Buzajevs u.c., 1997), tad tas neietekmē ūdens līmeņu sadalījumu modelētajā mēnesī, bet gan ievērojami vēlāk. Kā jau tika minēts iepriekš, būtu nepieciešamas detalizētākas datu rindas par vairāku gadu periodu. Lielākais filtrācijas ātrums raksturīgs ūdensgūtnes Baltezers II iecirknim (Aņikejeva u.c., 1997).

Darba izstrādes laikā nav atrasta informācija par veiktiem pētījumiem par infiltrācijas apjoma mainību pie atšķirīga temperatūras un nokrišņu režīma. Ir zināms vidējais infiltrācijas apjoms gadā periodā ilggadīgajiem klimatiskajiem apstākļiem. Tāpat, nav skaidra infiltrācijas apjoma aprēķinu shēma pie negatīvām gaisa temperatūrām, kā arī katra atsevišķa mēneša infiltrācijas apjoms, kas nosaka pziemes ūdeņu barošanas no atmosfēras nokrišņiem arī par mainīgo lielumu.

Datu precizitāte.

Svarīgs nepieciešamais lielums ir nomērīto GŪL novērojumu precizitāte un to savstarpējā savietojamība. Darba izstrādē nav noskaidrota arī monitoringa urbumu augstuma atzīmju noteikšanas precizitāte. Nav skaidrs ar kādu precizitāti tiek noteikts atsūknētā ūdens daudzums no sifonvadiem, kā arī GMP infiltrācijas baseinos padotā ūdens daudzuma datu ticamība.

Konceptuālais modelis.

Iespējams, ka, balstoties uz iegūto pieredzi, modeļa precizitāti varētu uzlabot jauna konceptuālā modeļa izveide. Šādā gadījumā būtu svarīgi pievērst papildus uzmanību ūdens vāji caurlaidīgo nogulumu izplatībai lgQ_{3lv} b un lgQ_{3lv} slāņos, un to veidošanās apstākļu noskaidrošanai, lai varētu precīzāk noteikt mazcaurlaidīgo slāņu konfigurāciju. Autore uzskata, ka konceptuālā modeļa precizēšana un izveide pēc litoloģiskajām vienībām nav ieteicama, jo pat ļoti ģeneralizēta modeļa izveide, ģeoloģiskās nenoteiktības un dažādo urbumu materiālu interpretāciju dēļ, sniegs neprecīzus modeļa rezultātus. Jauna konceptuālā modeļa izveidē būtu ieteicams pievērst papildus uzmanību hidroģeoloģisko logu novietojumam plašākā modelētās teritorijas ietekmes laukumā.

Filtrācijas īpašību noteikšana.

Salīdzinot modeļa struktūrā noteiktos gruntsūdens horizonta biezumus un literatūrā minētos caurplūdes koeficientus (Aņikejeva u.c., 1997; Buzajevs u.c., 1997; Buzajevs u.c., 2002a; Buzajevs u.c., 2002b; Gavena un Levina, 2000), ir skaidrs, ka filtrācijas īpašību vērtības nesakrīt vietās, kur caurplūdes koeficienti (iežu ūdens vadāmība) raksturoti kā mazāki Baltezera ūdensgūtnēi. Neskatoties uz ūdens horizonta nemainīgo biezumu, autore

spriež, ka filtrācijas īpašības no papildināšanas baseiniem ziemeļaustrumu virzienā pasliktinās. Ir raksturīga filtrācijas īpašību maiņa filtrācijas ceļā, par ko liecina gan iepriekš veiktie pētījumi (Aņikejeva u.c., 1997; Buzajevs u.c., 1997; Buzajevs u.c., 2002a; Buzajevs u.c., 2002b; Krutofala un Levins, 2006), gan novērtētā iežu caurplūdes koeficienta maiņa reģionālās plūsmas virzienā. Arī modeļa rezultātos ir uzskatāmi parādīts, ka modeļa jutīgajā teritorijā, starp GMP baseiniem un Lielo un Mazo Baltezeru, kur novērojami ievērojami pazemināti GŪL. Modelētā GŪL virsma ir ieliekta, bet pēc novērojumu datiem GŪL virsmai būtu jābūt izliektai, lai nodrošinātu novērojumiem atbilstošus GŪL. Tas apstiprina iespēju, ka filtrācijas īpašības filtrācijas ceļā samazinās. Un to ir iespējams izskaidrot ar mālainā materiāla biežāku sastopamību ūdens nesējslānī problemātiskajā modeļa iecirknī. Par vides heterogenitāti (filtrācijas ātrumu maiņu plūsmas virzienā) ir minēts arī iepriekš veiktajos pētījumos (Gavena un Levina, 2000) un izpētes darbos Baltezera ūdens atradnes teritorijā, tostarp tas konstatēts arī pēc trasera eksperimenta (Buzajevs u.c., 1997). Tādēļ šis būtu uzskatāms par vienu no galvenajiem GŪL sadalījuma nenoteiktības iemesliem.

Daudzkārt dažādās publikācijās minēts, ka vides heterogenitāte hidroģeoloģiskajos modeļos ir nenovērtēta (Welsh, 2008) Ļoti bieži krasa filtrācijas īpašību maiņa plūsmas ceļā ir raksturīga aluviālajiem un deluviālajiem nogulumiem (Regli et al., 2003; Köhn et al., 2002).

Pētījuma ietvaros tika novērots, ka samazinot filtrācijas īpašības ūdens horizontam, pie atslodzes urbumiem veidojās lielāka depresijas piltuve, kas atbilst literatūrā minētajiem procesiem.

Viena no jutīgajām modeļa teritorijām atrodas pie modeļa dienvidu malas jeb ārējās robežas, liemeņu neatbilstības šajā iecirknī iskaidrojamas ar Langstiņa ezera atrašanos tieši pie modeļa laukuma dienvidu malas, ņemot vērā, ka Langstiņu ezers neietilpst modeļa laukumā, tā ietekme neietekmēja GŪL sadalījuma aprēķinu.

3.4. Modeļa tālākā attīstība un izmantošanas iespējas

Izveidotais modelis ir funkcionāls un var tikt izmantots hidroģeoloģiskās situācijas apzināšanai un galveno bilances elementu un plūsmas virzienu noteikšanai. Papildus to var izmantot arī piesārņojuma pārneses ātrumu noteikšanai un teritorijas ģeoloģiskās uzbūves pētījumiem. Modelis tā tālākā attīstības gaitā var tikt praktiski izmantots plūsmu prognozēm, t.i., GŪL sadalījuma noteikšanai pie dažādu antropogēno slodžu izmaiņām, kā, piemēram, vides apstākļu izmaiņām, GŪL izmaiņām daudzūdens, mazūdens gados un klimata maiņu ietekmē. Paralēli modeļa tālākai izmantošanai, nepieciešama arī tālāka modeļa attīstīšana.

Detālāka un precīzāka modeļa attīstīšanai būtu nepieciešams pievērst uzmanību sekojošiem jautājumiem:

- noskaidrot padeves režīmu infiltrācijas baseinos;
- noskaidrot infiltrācijas baseinu dziļumu;
- veikt modeļa laukuma izvēli un tā pamatojumu;
- virsmas reljefa interpolācijā izmantot visas pieejamās monitoringa urbumu augstumatzīmes, kā arī iespējami detālāku reljefa informāciju;
- nepieciešams atlasīt uzticamākos GŪL novērojumus un kalibrāciju veikt pēc tiem;
- kalibrācijas datu rindu veidot vismaz trīs gadu perioda,.

Modeļa rezultātu vienmērīgāku raksturu pa modeļa laukumu un precīzākus rezultātus varētu nodrošināt arī modeļa struktūras precizēšana, galvenokārt, ūdeni mazcaurlaidīgo slāņu izdalīšana *lgQ3ltv* un *lgQ3ltv b* slāņos, taču, ņemot vērā lielo ģeoloģisko nenoteiktību teritorijas kvartāra uzbūvē, tad nekorekta konceptuālā modeļa izveide varētu novest rezultāta ar lielāku ģeoloģisko nenoteiktību. Šo problēmu iespējams novērst piedēvējot atšķirīgus modeļa apgabalos atšķirīgus materiālus ar mainīgām filtrācijas īpašības gruntsūdeņu plūsmas virzienā.

Modeļa funkcionalitāti nedaudz iespējams uzlabot arī mainot materiālu filtrācijas īpašības *x*, *y* un *z* asu virzienā katra slāņa ietvaros. Šis risinājums var ievērojami sarežģīt kalibrācijas procesu un tam ir nepieciešams detāli apzināt teritorijas, kurās filtrācijas īpašību maiņa notiek, kā arī to konfigurāciju vismaz divās plaknēs.

Nemainot modeļa laukumu, iespējams uzlabot modeļa funkcionalitāti un datu precizitāti precīzi, nosakot sānu robežnosacījumus. Neskatoties uz to, ka modelis neatbalsta sānu robežnosacījumu definēšanu (PAIC, 2002), to iespējams veikt izmantojot citas programmas piedāvātās iespējas. Pieteces iestrādāšanai modelī iespējams izmantot paņēmienu, kas pielietots arī infiltrācijas baseinu definēšanai 2. variantā, t.i., nosakot ļoti apjomīgu atmosfēras infiltrāciju šaurā joslā pie ārējās robežas. Noteces iestrādāšanai modelī iespējams aprēķināto noteces apjomu aprēķinot un tad iestrādāt atbilstošo noteci pie ārējās robežas izmantojot atslodzes urbumus kā otrā veida robežnosacījumu iespēju.

Nemainot modeļa struktūru iespējams samazināt starpības variācijas amplitūdu, kalibrējot modeli ar vismaz trīs gadu novērojumu datu rindu. Taču arī šādas pieejas izmantošanai pirms tam nepieciešams precizēt arī robežnosacījumu vērtības, galvenokārt, infiltrācijas baseinu parametrus.

Precīzāku prognožu izveidošanai un iespējām modeļa laukumu izmantot metodiskam darbam, Baltezera pētījuma iecirknis nav perspektīvs. Neskatoties uz apjomīgo novērojumu datu kopu un ievērojamo pētījumu apjomu teritorijā, Baltezera ūdensgūtnēs hidroģeoloģiskie apstākļi ir pārāk sarežģīti un neatbilst vairākām svarīgām prasībām. Šāda mērķa realizācijai būtu nepieciešams:

- meteoroloģiskās stacijas tiešs tuvums;
- netransformēta pazemes ūdeņu plūsma;
- ļoti viendabīgs un horizontāls gruntsūdens horizonta ūdens vadošais slānis.

Lai veiktu modelēšanas darbus Baltezera pazemes ūdens atradnē, būtu nepieciešama ievērojama hidroģeoloģisko modeļu sagatavošanas pieredze un detāla izpratne par ūdensgūtnē notiekošajiem procesiem.

SECINĀJUMI

Pētījuma rezultātā izvirzītais mērķis ir sasniegt un ir noskaidrots, ka lielāko ietekmi uz līmeņu sadalījumu pētījumu teritorijā veido Baltezera ūdensgūtņu saimnieciskā darbība, pieteces lielāko apjomu veido gruntsūdens makslīgā papildināšana, savukārt noteci nodrošina atslogošanās ūdensgūtņu ekspluatācijas urbumu rindas.

Stacionārs pazemes ūdens līmeņu modelis ir precizēts līdz 0,2 m, kas tiek vērtēta kā apmierinoša kalibrācijas pakāpe. Atsevišķos iecirkņos līmeņu sakritība ir mazāka, kas tiek skaidrots ar kalibrācijas datu kopā ietvertā laika sprīža īslaicīgumu un ūdens horizonta filtrācijas īpašību pasliktināšanos plūsmas virzienā. Par to liecina kalibrācijas gaitā nemainīgā starpības variācijas apmilitūda, t.i., neatkarīgi no materiālu filtrācijas īpašību maiņas, nenoteiktība modeļa laukuma jutīgajos iecirkņos bija nemainīga.

Lielākā modeļa nenoteiktība novērota sešos iecirkņos, kas atrodas starp GMP infiltrācijas baseiniem un Baltezers ūdensgūtnes ekspluatācijas urbumu rindu. Ņemot vērā, ka šajā teritorijā līmeņu sadalījums ir atkarīgs no ūdensgūtņu un GMP darbības ilgstošākā laika posmā, teritorijas modeļa precīzāka aprēķina iegūšanai modeļa kalibrācijas kopai vajadzētu aptvert vairāku gadu laika periodu.

Pētījuma rezultātā arī noskaidrots, ka hidrauliskā saistība starp kvartāra un Gaujas ūdens kompleksiem ir nebūtiska un GŪL sadalījumu modeļa laukumā neietekmē.

Sagatavojot situāciju modeli, kur Baltezera ūdensgūtņu jaudas tiek dubulti palielināta, tika noteikts, ka vidējais gada gruntsūdens līmenis pētījumu teritorijā vidēji kritīsies par 0,5 metriem. Lielākais līmeņu pazeminājums, šajā gadījumā, būs novērojams pie Baltezera ūdens gūtnes ekspluatācijas urbumu rindām, kur tas maksimāli kritīsies par vienu metru, lielākais pazeminājums būs novērojams vietās, kur urbumi ir novietoti tuvu viens otram. Batezers II ūdensgūtnes ekspluatācijas urbumu rindā GŪL pazeminājums veidos aptuveni 0,2 metrus.

Sagatavojot modeli situācijai, kad ūdensgūtņēs netiek realizēta GMP, nemainoties Baltezera ūdensgūtņu darbībai, pēc modeļa aprēķiniem konstatēts, ka vidējais gada gruntsūdens līmenis pētījumu teritorijā varētu kristies par 1,68 metriem. Šāda scenārija gadījumā, vislielākais pazeminājums būs novērojams pašos GMP infiltrācijas baseinos un teritorijās ap tiem. Baltezera ūdensgūtnes ekspluatācijas rindā pazeminājums sastādīs aptuveni 1 līdz 2 metrus. Vismazāk līmeņu pazeminājums ietekmēs teritorijā esošo ezeru ūdens līmeni.

Jebkuru gruntsūdens datormodeļu izveidošanai un to precīzākiem aprēķiniem ir svarīgi precīzi modelī nodefinēt: virsmas slāņa reljefu; atmosfēras infiltrācijas apjomus un tā dinamiku; virsmas robežnosacījumus, t.i., upju un ezeru līmeņus.

Pateicības

Darba autore vēlas izteikt pateicību zinātniskā darba vadītājam, LU ĢZZF docentei Dr. ģeol. Aijai dēliņai par atbalstu, izpratni un palīdzību darba izstrādes laikā, kā arī M. ģeol. Tomasam Sakam par ieteikumiem un precizējumiem hidroģeoloģiskā modeļa izstrādes posmā. Tāpat autore vēlas izteikt pateicību ģeoloģijas maģistrantūras 1.kursa studentam Konrādam Popovam par neatlaidīgo palīdzību visā maģistra darba izstrādes laikā. Autore izsaka pateicību arī savai ģimenei par neatsveramo atbalstu un sapratni.

Izmantotā literatūra

Publicētā literatūra

Al-Abed, N. & Al-Sharif, M. 2008. Hydrological Modeling of Zarqa River Basin – Jordan Using the Hydrological Simulation Program – FORTRAN (HSPF) Model. *Water Resources Management*. **22**(9),1203.–1220.

Anderson, F.P. 1993. *A manual of instructional problems for the U.S.G.S. MODFLOW model*. Center for Subsurface Modeling Support. Ada, Oklahoma, 280.

Bambergis, K. 1993. *Ģeoloģija un hidroģeoloģija*. Rīga, Zvaigzne, 175.-278.

Barthel, R., Rojanschi, V., Wolf, J. & Braun, J. 2005. Large-scale water management within the framework of GLOWA-Danube. Part A: The groundwater model. *Physics and Chemistry of the Earth*, **300**(6-7), 372.-382.

El Idrysy, H. & De Smedt, F. 2006. Modelling groundwater flow of the trifa aquifer, Morocco. *Hydrogeology Journal*, **14** (7),1265.-1276.

El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D. & Kaufmann, O. 2008. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research*. **2** (3), 192. – 209.

Fetter, C.W. 2001. *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall, New jersey. 66.-280; 468.-549.

Ghosh, N.C., Sharma, K.D. & Kumar, C.P. 2006. *Groundwater Modelling and Management*. Capital Publishing Company, New Delhi.153.-178.

Groat, C.G., 2001. *System and Boundary Conceptualization in Ground-Water Flow Simulation. Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey*. Book 3, Applications of Hydraulics. Reston, Virginia, USGS, 38.

He, B., Takase, K. & Wang, Y. 2007. Regional groundwater prediction model using automatic parameter calibration SCE method for a coastal plain of Seto Inland Sea. *Resour Manage*. **21**(6), 947.–959.

Indāns, A., Ošiņa, J. un Zobena A. 1986. *Inženierģeoloģija*. Rīga, Zvaigzne, 57.-91.

Kalivarapu, V. & Winer, E. 2008. A multi-fidelity software framework for interactive modeling of advective and diffusive contaminant transport in groundwater. *Environmental Modelling & Software*. **23**(12), 1370.-1383.

Köhn, J., Eduardo, E., Kruse, E.E., Juan, E. & Santos, J.E. 2002. Hydrogeologic Behavior of an Alluvial Aquifer, Salta Province, Argentina: Simulations of Hydraulic Conductivity Field, Groundwater Flow, and Chloride Migration. *Natural Resources Research*. **11**(3), 157. – 166.

Kollet, S.J., Maxwell, R. M. 2005. Integrated surface–groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Advances in Water Resources*, **29**(7), 945.–958.

Dawoud, M.A. & Raouf, A. 2009. Groundwater Exploration and Assessment in Rural Communities of Yobe State, Northern Nigeria. *Water Resources Management*, **23**(3), 581. – 601.

Pinder, G.F. 2002. Groundwater modeling using geographical information systems. John Wiley&Sons, 233.

Regli, C., Rosenthaler, L. & Huggenberger, P. 2004. GEOSAV: a simulation tool for subsurface applications. *Computers & Geosciences*, **30**(3), 221.-238.

Robins, N.S., Rutter, H.K., Dumpleton, S. & Peach D.W. 2005. The role of 3D visualisation as an analytical tool preparatory to numerical modelling. *Journal of Hydrology*, **301**(1-4), 287.-295.

Rushton, K.R. 2005. *Groundwater hydrology. Conceptual and computational models*. Wiley, England. 407.

Thangarajan, M. 2007. *Groundwater Resource Evaluation, Augmentation, Contamination, Restoration, Modeling and Management*. Springer, Netherlands, 189.-236.

Todd, D. K. & Mays, L.W. 2005. *Groundwater Hydrology*. Hoboken, NJ. John Wiley & Sons, 636.

Welsh, W. D. 2008. Water balance modelling in Bowen, Queensland, and the ten iterative steps in model development and evaluation. *Environmental Modelling & Software*. **23**(2), 195.-205.

Wen, X.H., Wu, Y., Lee, L. J. E., Su, J. P. & Wu J. 2007. Groundwater flow modeling in the Zhangye Basin, Northwestern China. *Environmental Geology*. **53**(1), 77.–84.

Zhang, Q., Werner, A. D. 2009. Integrated Surface–Subsurface Modeling of Fuxianhu Lake Catchment, Southwest China. *Water Resource Management*. **23**(11), 2189.–2204.

Zyvoloski, G., Kwicklis, E., Eddebarh, A.A., Arnold, B., Faunt, C. & Robinson B.A. 2003. The site-scale saturated zone flow model for Yucca mountain: calibration of different conceptual models and their impact on flow paths. *Journal of Contaminant Hydrology*. **62-63**(4-5), 731.-750.

Nepublicētā literatūra

Aņikejeva, R., Levins, I. un Levina, N. 1997. *Pazemes ūdeņu krājumi Rīgas centralizētai ūdensapgādei*. Valsts ģeoloģijas dienests. Rīga, 89. (**11758**)

Buzajevs, V. 2001. *Daugavpils pazemes ūdens atradnes "Ziemeļi" bakterioloģiskās un ķīmiskās aizsargjoslas aprēķināšana*. Valsts ģeoloģijas dienests, Rīga. 47.

Buzajevs, V., Dubrovskis, D., Morozova, T., Gavena, I., Krūmiņa, I., Prols, J., Juhna, V., Červinskis, A. un Prole A. 2002. *Baltežera ūdens ņemšanas vietu stingrā režīma aizsargjoslas noteikšana*. RPPU "Rīgas ūdens", 13.

Buzajevs, V., Gaile, R., Gavena, I., Levina, N. un Levins, I. 2002. *Rīgas centralizētai ūdensapgādei izmantoto pazemes dzerama ūdens atradņu aizsargjoslu noteikšana un derīgo*

- izrakteņu pasu sastādīšana. Baltezers, Remberģi, Zaķumuiža.* Valsts Ģeoloģijas dienests, Rīga. 60.
- Buzajevs, V., Levina, N., Levins I. 1997. *Pazemes ūdeņu bilance un kvalitāte Baltezera ūdensgūtnēs.* Valsts Ģeoloģijas dienests, Rīga. 56. **11155**
- Dēliņa, A., Prols, J. un Pare R. 2005. *Baltezera, Remberģu un Zaķumuižas ūdens ņemšanas vietu ķīmiskā aizsargjosla.* Rīgas ūdens, Rīga, 18. **14846**
- Driķis, Ē. 1999. *Gruntsūdens novērošanas urbumu tīkla paplašināšana ūdensgūtnēs "Baltezers" 1999.gadā.* Urbšanas centrs, Rīga. 40. **15645**
- Krutofala, T. un Levins, I. 2006. *Pazemes ūdeņu atradnes "Baltezers", iecirkņa "Akoti" pase. Pazemes ūdeņu ekspluatācijas krājumu novērtējums. Atradne "Baltezers", iecirknis "Akoti". Gruntsūdens horizonts.* Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūra, Ģeoplus, Rīga, 38. **(16422)**
- Krutofala, T un Levins, I.. 2007. *A/s "Aldaris" ūdensgūtnes pazemes ūdeņu atradnes pases sagatavošana.* Pazemes ūdeņu atradnes "Aldaris" pase. Ģeoplus, Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūra, Rīga, 52. **(18441)**
- Latvijas Hidrometeoroloģijas aģentūra. 2009. Ūdens līmeņu novērojumu stacija „Ķīšezers – Rīga” novērojumu periods: I-XII. Valsts Datu Fonds. Inventarizācijas Nr. 12012
- Legzdīņš, M.1996. *Mazā Baltezera dūņu slāņa veidošanās apstākļu apskats un izpēte.* Jumītis, Rīga, 14. **(11821)**
- Levina, N. 1999. *Pazemes ūdeņu monitorings 1998.gads.* Valsts ģeoloģijas dienests, Rīga, 45. **(11978)**
- Gavena, I. un Levina, N. 2000. *Baltezers. Rīgas centralizētai ūdensapgādei izmantoto pazemes dzeramā ūdens atradņu aizsargjoslu noteikšana un derīgo izrakteņu atradņu pases sastādīšana (Baltezers, Remberģi, Zaķumuiža, Katlakalns).* Derīgo izrakteņu atradnes pase (pazemes ūdeņi), Valsts ģeoloģijas dienests, Rīga, 516. **(12281)**
- Levina, N. un Levins, I. 2003. *Pazemes ūdeņu pamatmonitorings 2002.gads.* Valsts ģeoloģijas dienests, Rīga, 343. **(13448)**
- Levins, I. 2006. *Ūdensgūtnes "Vingri" aizsargjoslas noteikšana un pazemes ūdeņu atradnes pases sagatavošana.* Ģeoplus, Rīga, 76. **(16441)**
- Levins, I. 1998. *Ūdens pašattīrīšanās izpēte ūdensgūtnē Baltezers II 1998.gadā.* Valsts ģeoloģijas dienests, Rīga, 21. **11870**
- PAIC. 2002. *HiFiGeo v.3.5 for Windows 95/98/2000/NT/XP.* Lietotāja rokasgrāmata, 67.
- Prols, J., Segliņš, V., Vetreņņikovs, V., Dēliņa, A. 1998. *Ekspluatācijas urbumu kolmatācijas iemeslu izvērtējums, urbumu optimālo konstrukciju noteikšana un urbumu attīrīšana ūdensgūtnēs Baltezers un Baltezers I.* Geo-Consultants, Rīga. 104. **12144**
- Rīgas Ūdens. Sūkņu stacija „Baltezers” 2009. *Gruntsūdens līmeņu novērojumi monitoringa urbumos par 2008. gada periodu.; gruntsūdens mākslīgās papildināšanas apjomi infiltrācijas*

baseinos par 2008. gada periodu.; ūdensgūtnēs atsūknētā ūdens daudzums par 2008. gada periodu.

Tolstovs, J., Levina, N., Prilukova, T. 1986. *Pārskats "Pazemes ūdeņu režīma, bilances, eksogēno ģeoloģisko procesu izpēte un Valsts ūdens kadastra (pazemes ūdeņi) pārzināšana Latvijas PSR 1984.-1986.g."* (Koppārskats par periodu 1976.-1985.g.) Ģeoloģijas pārvalde, Rīga, 470. **10402**

Seņņikovs, J. 2010. Modelēšanas paņēmieni hidroģeoloģijā. *LU Vides un Tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorija*. Lekciju materiāli, projekta PUMa darbiniekiem. 56.

Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes WMS serviss:
<http://kartes.geo.lu.lv/>

TOPO 10K PSRS. *Bijušās PSRS armijas ģenerālštāba topogrāfisko karšu mozaīka mērogā 1:10 000*. skatīts 10.09.09. Pieejams:

<http://kartes.geo.lu.lv/wms.html?zoom=6&lat=6304570.07718&lon=536824.407&layers=FFFFFFFF000000000000B0000000000000>

TOPO 25K63g PSRS. *Bijušās PSRS armijas ģenerālštāba 63. gada sistēmas topogrāfisko karšu mozaīka mērogā 1:25 000*. skatīts 10.09.09. Pieejams:

<http://kartes.geo.lu.lv/wms.html?zoom=6&lat=6304570.07718&lon=536824.407&layers=FFFFFFFF000000000000B0000000000000>

LVGD Kvartargeologija. *Valsts Ģeoloģijas Dienesta Kvartāra nogulumu karšu mozaīka mērogā 1:200 000*. skatīts 10.09.09. Pieejams:

<http://kartes.geo.lu.lv/wms.html?zoom=6&lat=6304570.07718&lon=536824.407&layers=FFFFFFFF000000000000B0000000000000>

TOPO 50K Satelītkarte. *VZD Satelītkaršu mozaīka. Latvijas Republikas satelītkarte mērogā 1:50 000*. skatīts 10.09.09. Pieejams:

<http://kartes.geo.lu.lv/wms.html?zoom=6&lat=6304570.07718&lon=536824.407&layers=FFFFFFFF000000000000B0000000000000>

LVĢMC. [Bez dat.] Datu bāze „Urbumi”. Datu bāzes apraksts, pieejams:

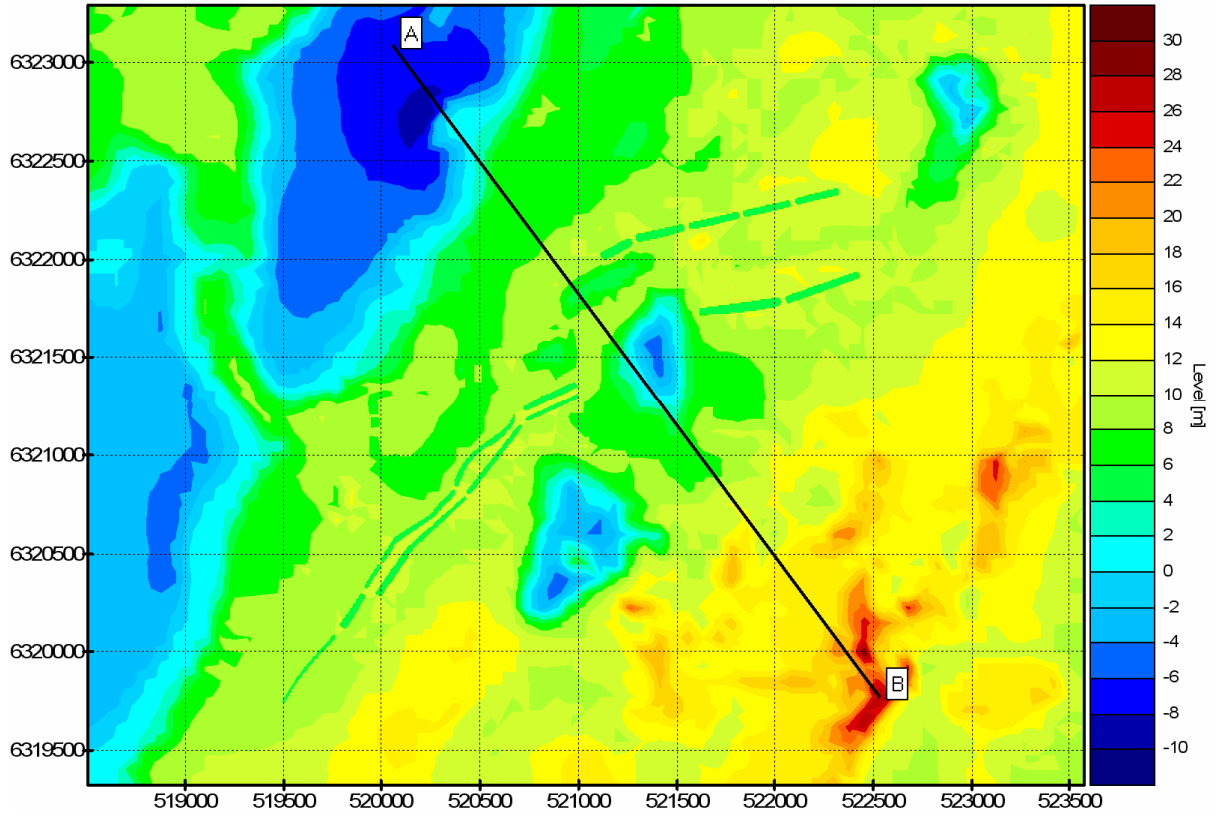
http://www.meteo.lv/public/geodatu_bazes.html?highlite=ZGF0dWLEgXpl.

Tiešsaistē pieejamie resursi:

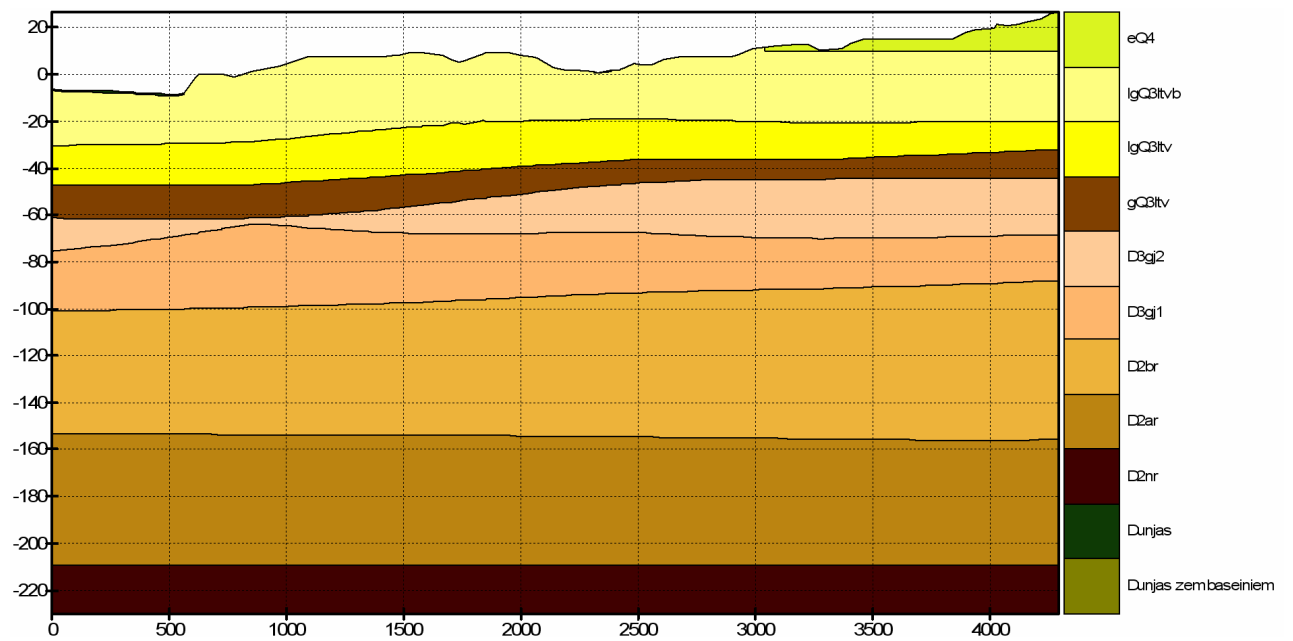
Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, *Laika apstākļi Latvijā 2008. gadā*
<http://www.meteo.lv/public/29461.html> (skatīts, 07.03.10)

PIELIKUMI

1. pielikums
Griezums A-B

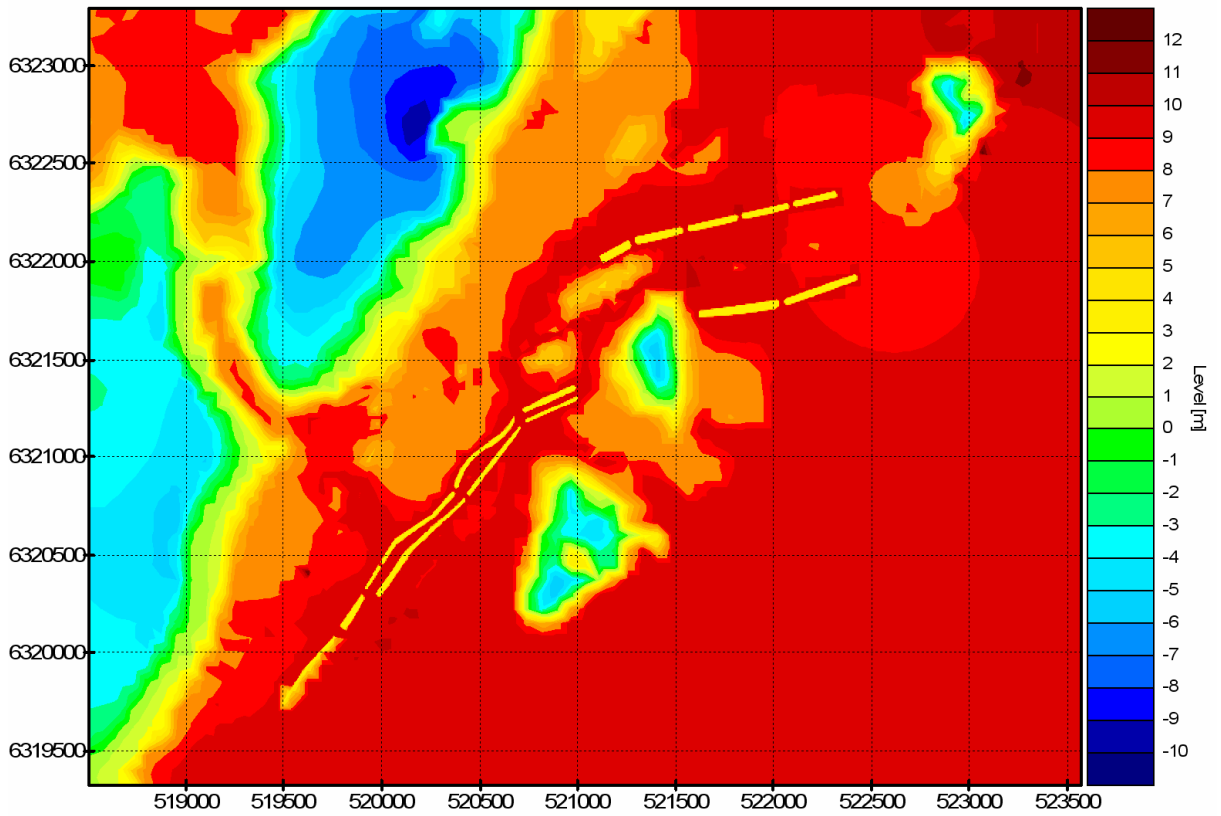


2. pielikums
Modeļa ģeoloģiskais griezumš pa līniju A-B



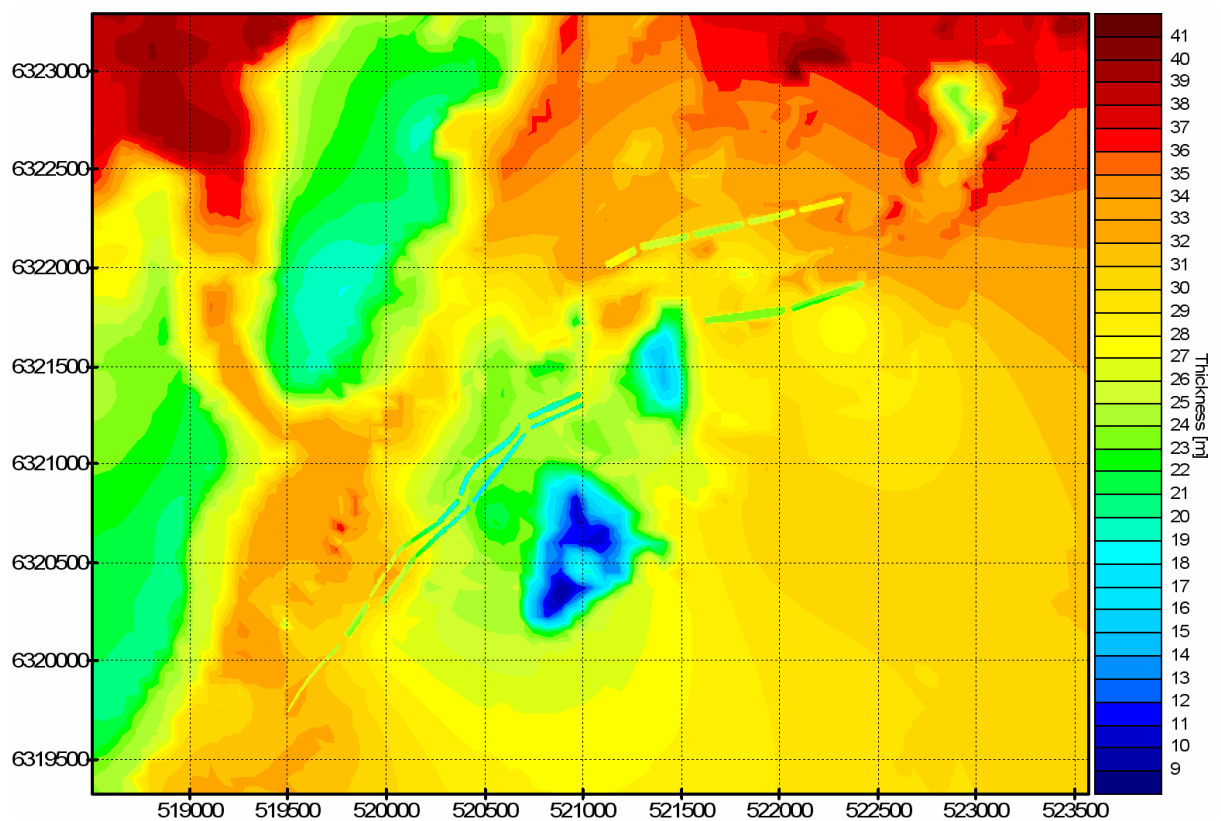
3. pielikums

Baltijas ledus ezera nogulumu virsma modeļa laukumā, m.v.j.l



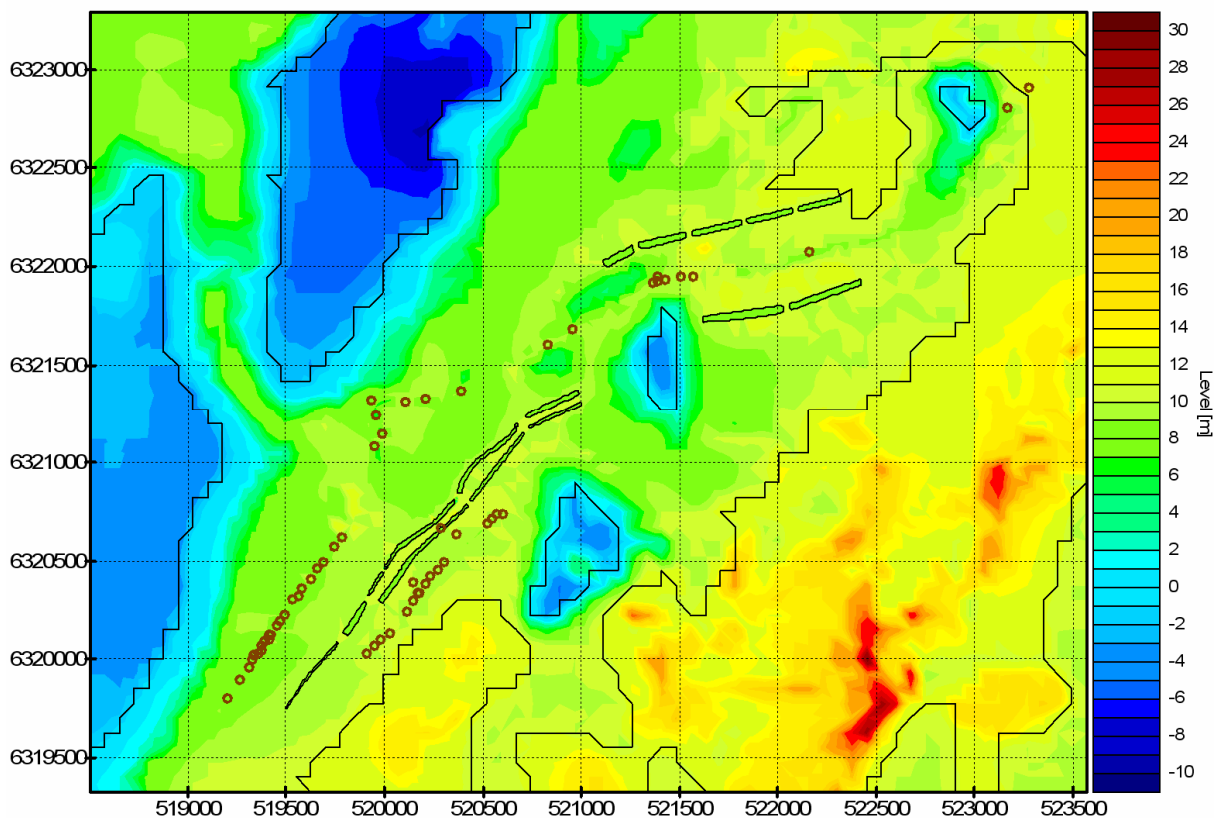
4. pielikums

Baltijas ledus ezera nogulumu biezums modeļa laukumā, m.



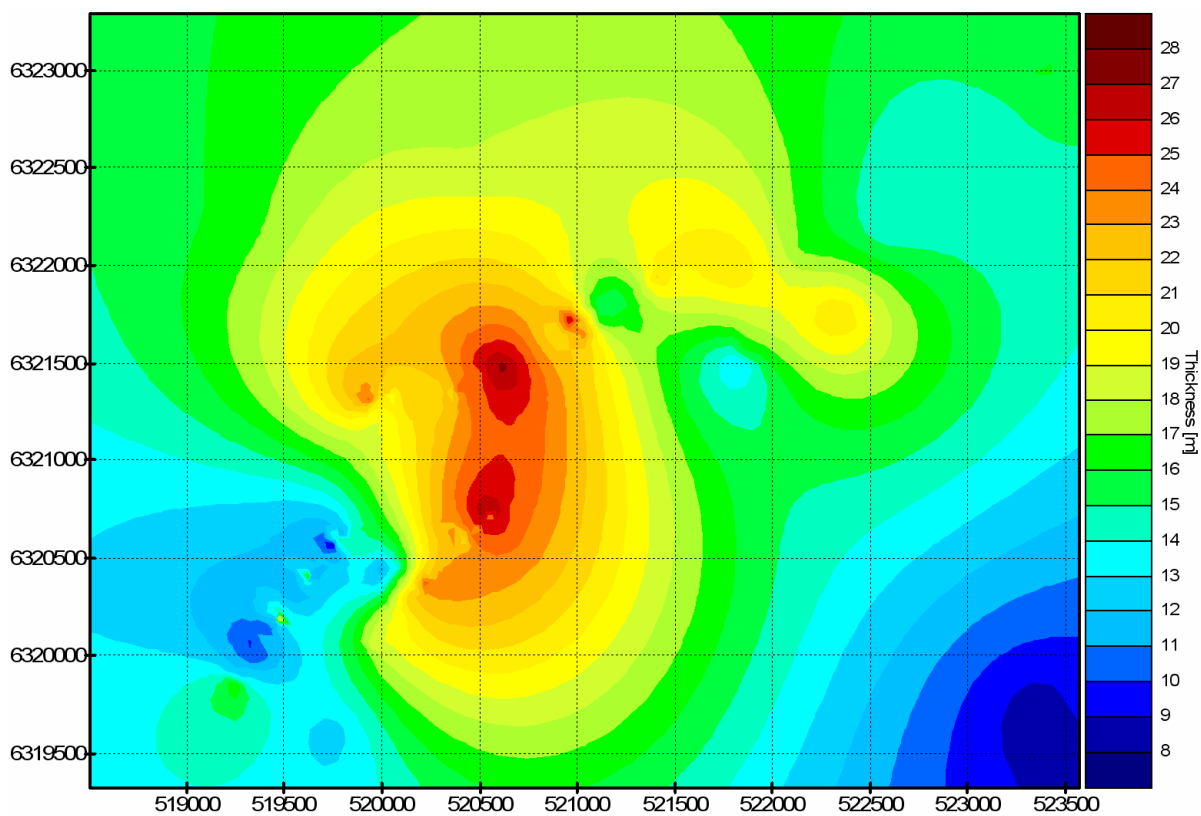
5. pielikums

Urbumi, kuros konstatēti māla starpslaņi Kvartāra ūdens horizontā



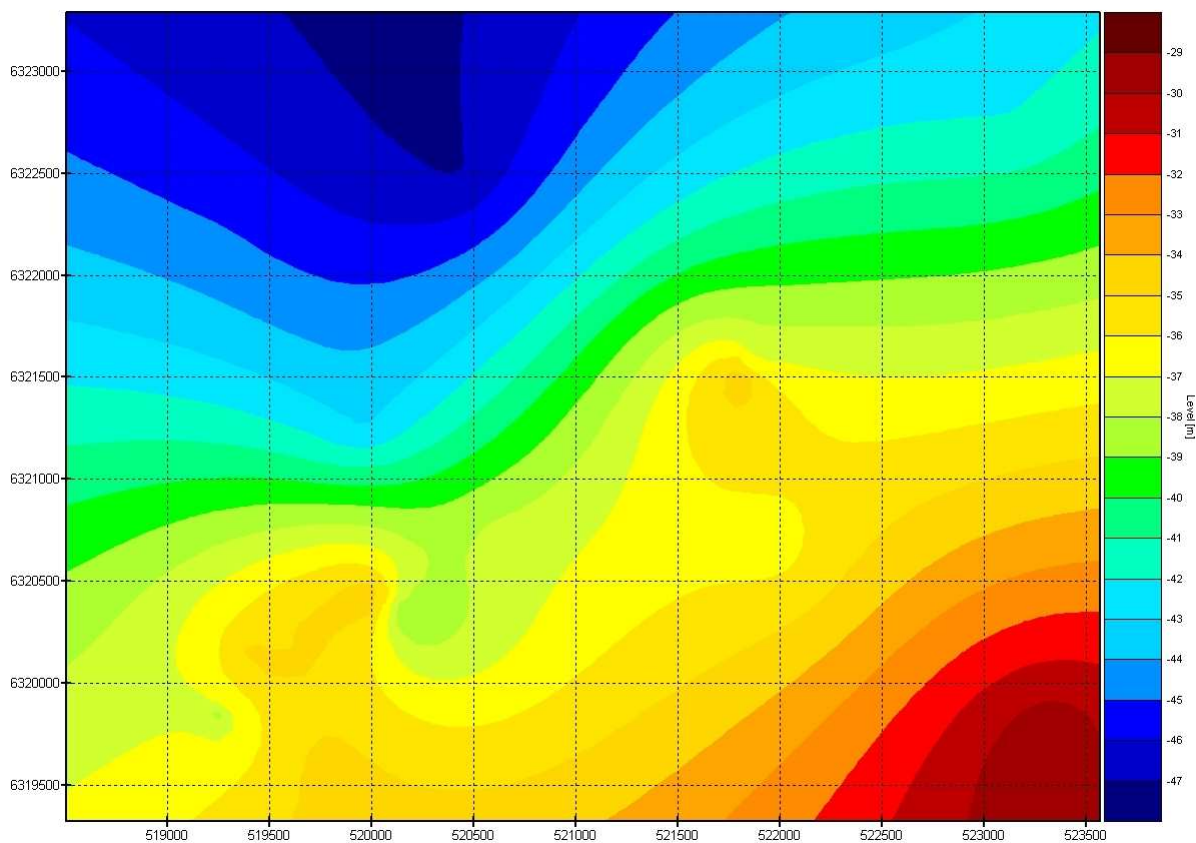
6. pielikums

Modeļa laukumā līnoglaciālo nogulumu biezums, m



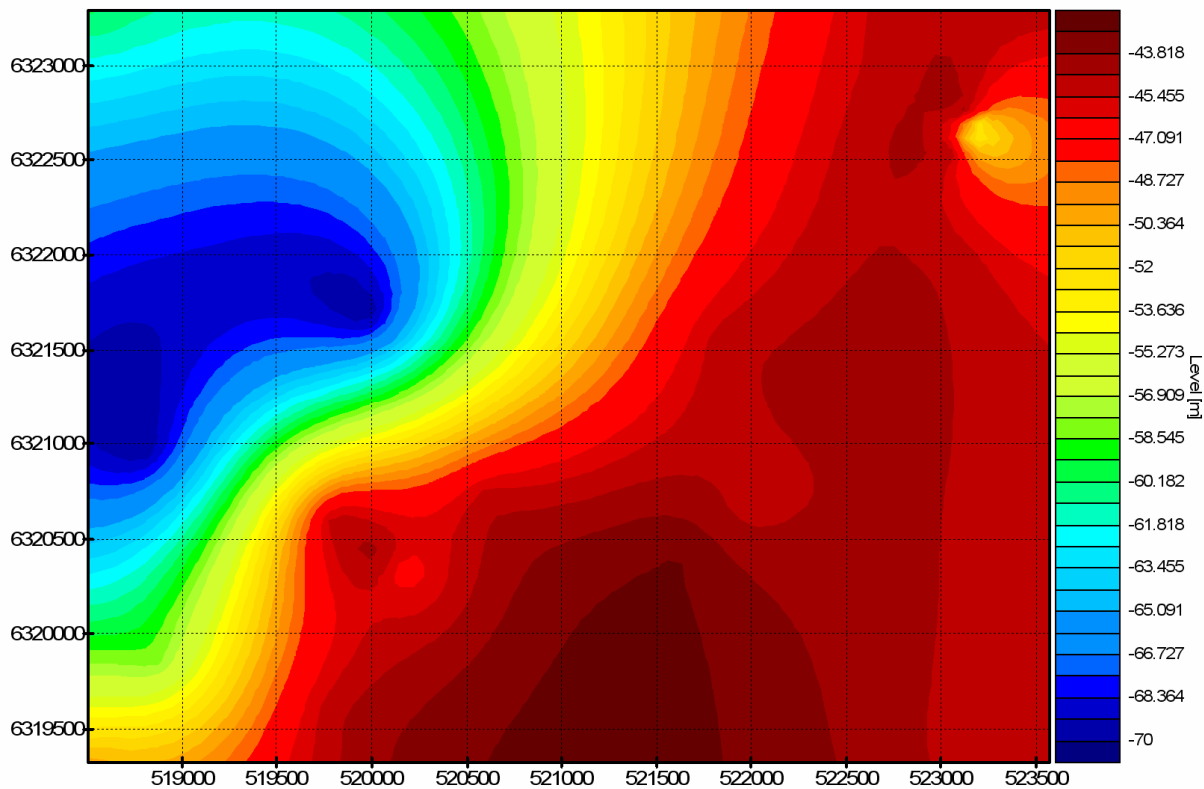
7. pielikums

Modeļa laukumā glaciālo nogulumu ieguluma dziļums, m.v.j.l.



8. pielikums

Subkvartāra virsmas ieguluma dziļums modeļa laukumā, m.v.j.l.



Ūdens padeve infiltrācijas baseinos, pa mēnešiem, m³ (izstrādājusi autore, pēc RŪ „Baltezers” datiem)

Mēnesis	1.baseins	4.baseins	3A.baseins	3.baseins	5.baseins	6.baseins	8.baseins	9./10.bas.	16.baseins	17.baseins
Janvāris	59 280	0	0	0	121 200	195 240	271 008	0	151 680	80 000
Februāris	100 536	0	0	28 000	137 952	185 736	115 752	0	269 280	89 800
Marts	81 312	0	0	0	144 000	149 640	100 080	0	312 840	105 500
Aprīlis	70 584	0	0	0	126 720	179 280	74 640	25 000	355 320	119 000
Maijs	60 120	0	0	0	60 024	140 004	0	0	233 160	77 720
Jūnijs	35 184	0	0	0	0	149 544	138 240	28 000	272 040	68 010
Jūlijs	107 100	0	0	0	48 060	172 800	313 200	0	57 600	19 200
Augusts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Septembris	42 024	28 000	42 384	0	35 280	101 280	231 720	0	18 720	21 000
Oktobris	146 400	108 500	107 856	0	96 192	252 720	330 720	0	269 760	140 000
Novembris	163 104	95 300	94 416	0	70 464	186 000	351 720	0	272 160	91 000
Decembris	88 416	97 000	96 936	0	73 128	161 424	144 000	0	212 040	71 000
Kopā pa gadu	954 060	328 800	341 592	28 000	913 020	1873 668	2 071 080	53000	2 424 600	882 230

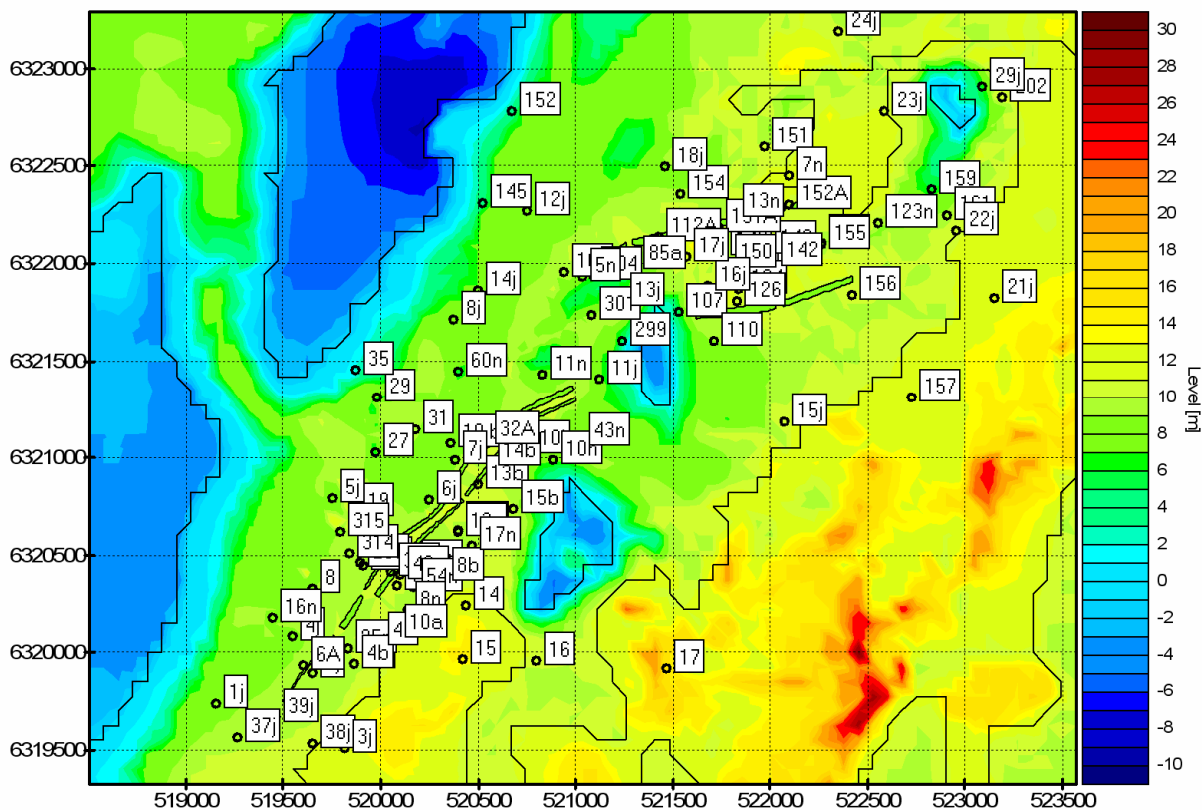
10. pielikums

Ekspluatācijas urbumu vidējie parametri (sagatavojusi autore, pēc RŪ „Baltezers”;
Gavena un Levina, 2000)

Parametrs	Baltezers	Baltezers II
Urbumu skaits sifonos (darbojošos urbumu skaits)	124	22 (20)
Urbumu vidējais diametrs, m	0.22	0.3
Vidējais filtra intervāls, abs. atz., m	-6.8 līdz -24.6	-2.8 līdz -17.9
Vidējais gada (2008) urbuma debits uz vienu urbumu (l/s)	2.3	1.7
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Janvāra mēnesī (l/s)	2.5	1.0
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Februāra mēnesī (l/s)	2.5	1.4
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Marta mēnesī (l/s)	2.6	0.5
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Aprīļa mēnesī (l/s)	2.6	1.5
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Maija mēnesī (l/s)	2.6	1.6
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Jūnija mēnesī (l/s)	2.5	1.6
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Jūlija mēnesī (l/s)	2.0	1.6
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Augusta mēnesī (l/s)	2.2	1.1
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Septembra mēnesī (l/s)	2.3	0.5
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Oktobra mēnesī (l/s)	1.7	3.7
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Novembra mēnesī (l/s)	2.3	3.0
Urbuma debits uz vienu urbumu 2008.g. Decembra mēnesī (l/s)	2.4	2.6

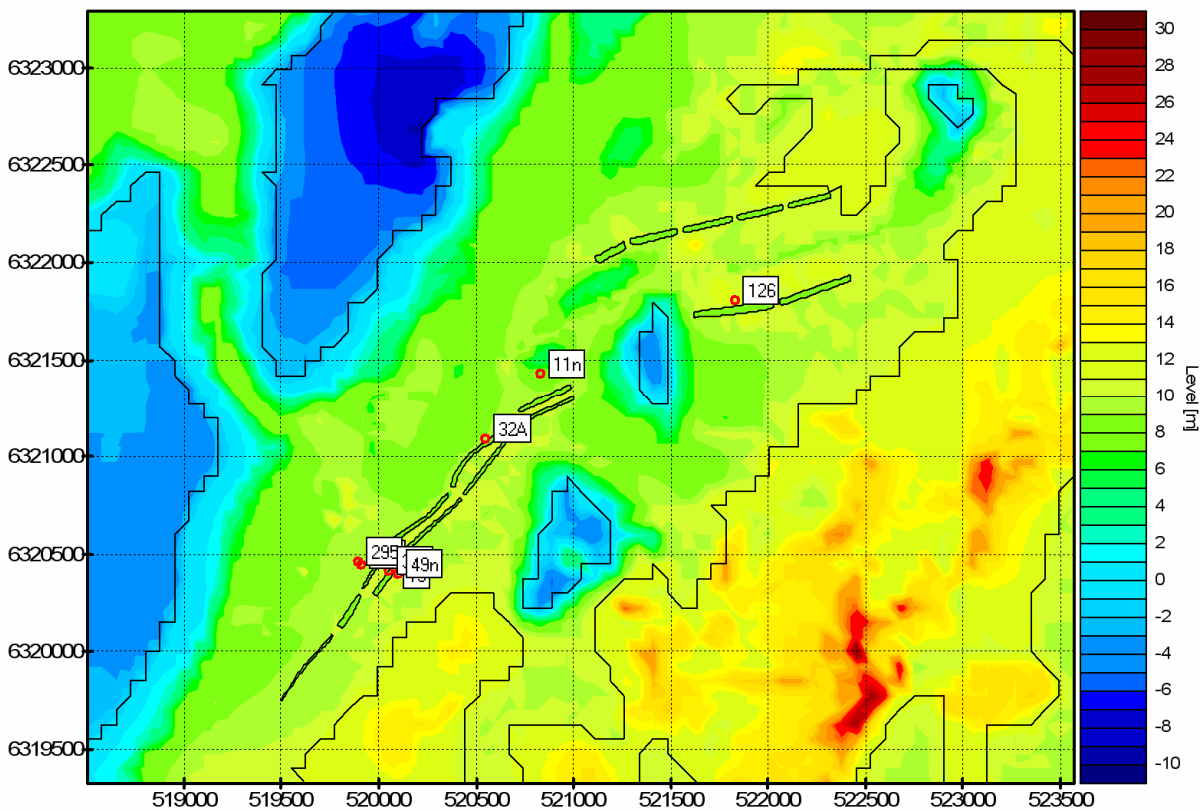
11. pielikums

Novērojumu urbumi modeļa laukumā, kuros veikti mērījumi 2008. gadā

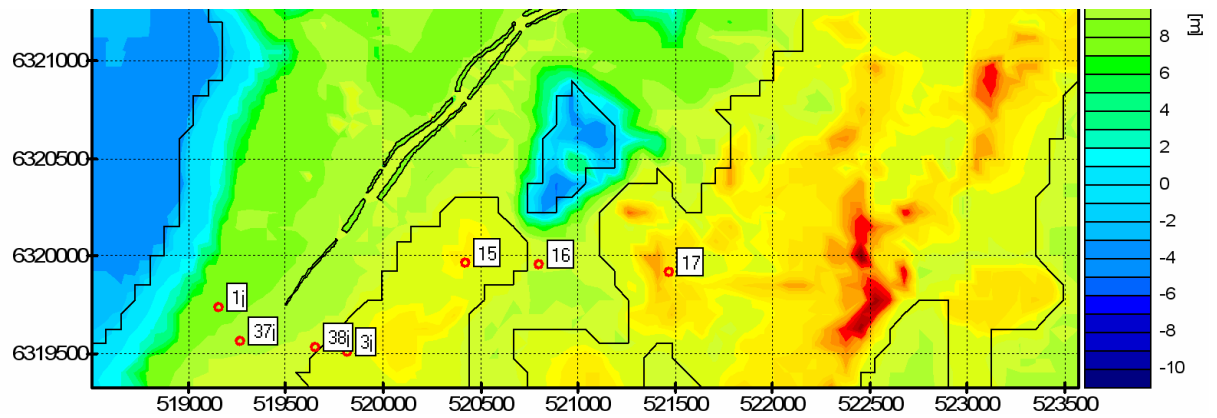


12. pielikums

Maksimālās novērotās GŪL svārstības 2008. gadā



Minimālās novērotās GŪL svārstības 2008. gadā



14. pielikums

Aprēķinātie gruntsūdeņu bilances lielumi 2008. gadam

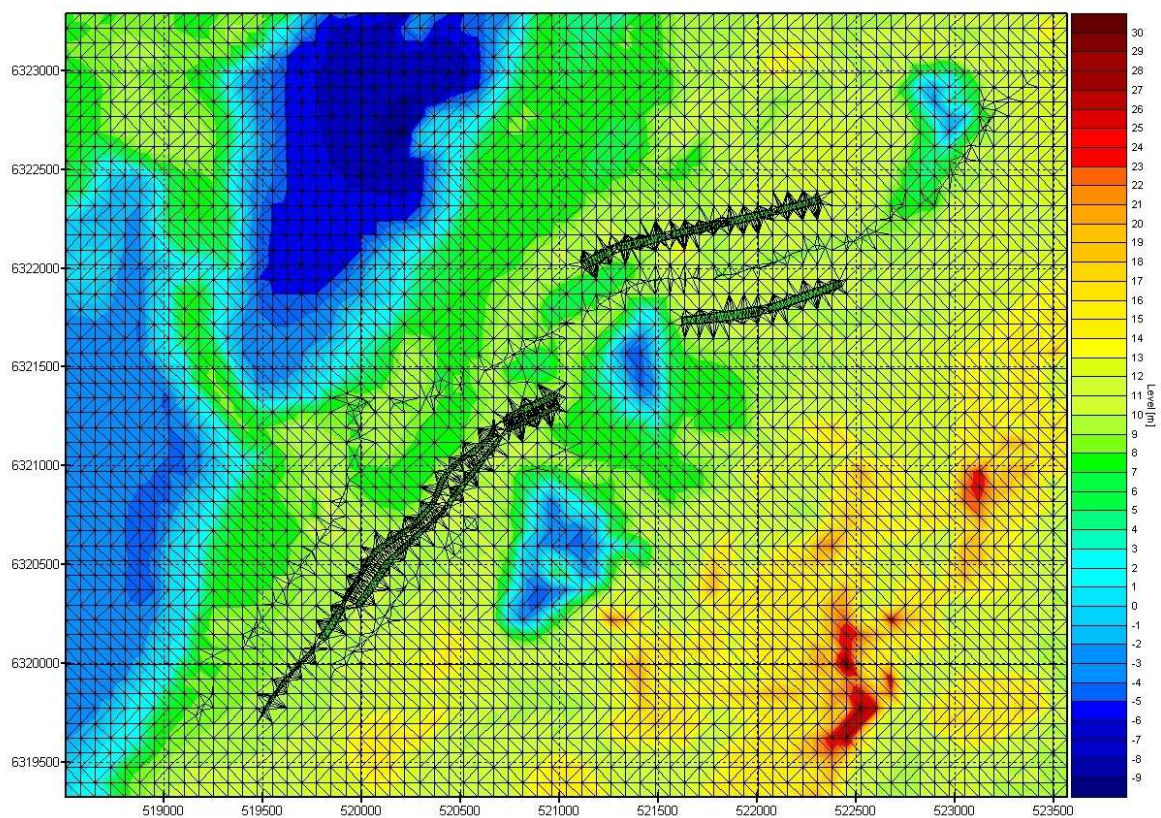
<i>process/mērvienības</i>	<i>m3/dnn</i>	<i>m3/gadā</i>	<i>%, gadā</i>
<i>sānu pietece</i>	8 969	3273685	19
<i>sānu notece</i>	13 650	4982250	32
<i>sifoni</i>	28 370	10 355 414	68
<i>GMP</i>	27 041	9 870 050	58
<i>pūrtece</i>	-0.00003	-0.01095	<1
<i>perkolācija</i>	0.00003	0.01095	<1
<i>nokrišņi</i>	10 958	4 000 000	23

15. pielikums

Modeļa režģim izveidotās virsmas, slāņi un slāņos imantotie materiāli

Virsmas nosaukums	Slāņa nosaukums	Slānī imantotie materiāli
Virisma	Virisma	eQ, Dūņas, Dūņas zem baseiniem
lgQ3ltvb	lgQ3ltvb	lgQ3ltvb
lgQ3ltv	lgQ3ltv	lgQ3ltv
gQ3ltv	gQ3ltv	gQ3ltv
D3gj2	D3gj2	D3gj2
D3gj1	D3gj1	D3gj1
D2br	D2br	D2br
D2ar	D2ar	D2ar
D2nr	D2nr	D2nr
Bottom	-	-

Modeļa virsmas diskretizācija



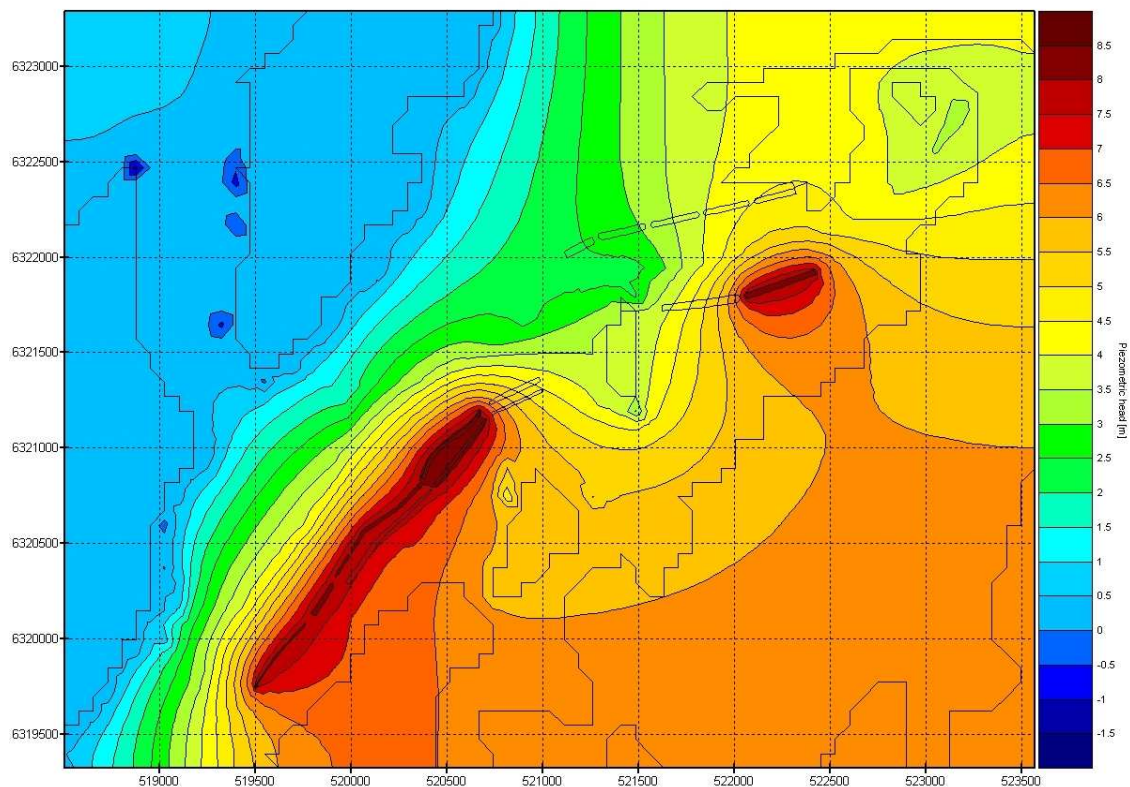
Aprēķinātie infiltrācijas apjomi infiltrācijas baseinos, pēc to apjomu kategorijām (sagatavojusi autore, pēc RŪ, 2009)

Mēnesis	1.baseins	4.baseins	3A.baseins	3.baseins	5.baseins	6.baseins	8.baseins	9./10.bas.	16.baseins	17.baseins
Janvāris	59 280	0	0	0	121 200	195 240	271 008	0	151 680	80 000
Februāris	100 536	0	0	28 000	137 952	185 736	115 752	0	269 280	89 800
Marts	81 312	0	0	0	144 000	149 640	100 080	0	312 840	105 500
Aprīlis	70 584	0	0	0	126 720	179 280	74 640	25 000	355 320	119 000
Maijs	60 120	0	0	0	60 024	140 004	0	0	233 160	77 720
Jūnijs	35 184	0	0	0	0	149 544	138 240	28 000	272 040	68 010
Jūlijs	107 100	0	0	0	48 060	172 800	313 200	0	57 600	19 200
Augusts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Septembris	42 024	28 000	42 384	0	35 280	101 280	231 720	0	18 720	21 000
Oktobris	146 400	108 500	107 856	0	96 192	252 720	330 720	0	269 760	140 000
Novembris	163 104	95 300	94 416	0	70 464	186 000	351 720	0	272 160	91 000
Decembris	88 416	97 000	96 936	0	73 128	161 424	144 000	0	212 040	71 000
Kopā, m3	954 060	328 800	341 592	28 000	913 020	1 873 668	2 071 080	53000	2 424 600	882 230
m/dnn	0.025	0.009	0.009	0.001	0.024	0.050	0.055	0.001	0.064	0.023

Modeļu aprēķinātie un novērotie vidējie GŪL monitoringa urbumos

Urbuma Nr.	1. variants apreķinātais GŪL, m v.j.l.	2. variants apreķinātais GŪL, m v.j.l.	Novērotais GŪL, m v.j.l.	Urbuma Nr.	1. variants apreķinātais GŪL, m v.j.l.	2. variants apreķinātais GŪL, m v.j.l.	Novērotais GŪL, m v.j.l.
8	5.53	3.52	6.15	12j	2.25	2.17	5.11
13	7.48	5.82	4.68	13b	8.03	5.09	8.94
14	6.65	5.65	6.84	13j	3.14	3.25	6.18
15	6.64	5.54	6.82	13n	7.28	5.73	5.72
16	6.25	5.76	5.33	13n	4.76	4.95	7.19
17	6.15	5.95	10.05	14b	8.15	5.01	6.01
19	4.96	3.32	7.13	151A	4.53	4.88	8.29
27	3.92	2.63	4.52	152A	5.23	5.19	6.31
29	2.31	1.61	4.89	15b	6.30	5.34	5.68
31	4.57	3.01	2.65	15j	5.81	5.98	5.13
35	1.29	0.94	3.77	16j	4.23	5.49	5.44
103	3.02	3.00	4.14	16n	4.41	2.77	6.81
107	3.37	3.88	0.90	17j	3.79	4.33	6.71
110	4.69	5.76	4.81	17n	6.88	5.66	5.36
115	4.85	5.75	4.82	18j	3.99	4.01	5.92
124	5.18	6.68	5.24	1j	3.34	2.12	7.14
126	5.24	7.15	4.70	20n	7.38	5.96	5.12
140	5.48	5.81	6.00	21j	5.66	5.49	5.22
142	5.76	6.12	4.70	22j	5.13	4.97	5.50
149	4.61	5.24	6.67	23j	4.55	4.46	6.49
150	4.68	5.53	6.90	24j	4.68	4.58	6.49
151	4.76	4.72	5.42	25n	7.56	4.89	5.12
154	4.12	4.25	4.67	29j	3.93	3.92	2.55
154	5.92	5.64	5.34	2j	7.71	4.58	5.32
155	5.97	5.67	5.06	32A	8.03	4.82	4.88
156	7.34	6.58	5.59	37j	4.41	2.87	7.78
157	6.19	6.07	5.24	38j	6.41	4.23	8.25
159	4.62	4.53	3.25	38n	7.72	5.95	4.91
161	4.94	4.81	2.75	39j	6.17	3.71	6.44
202	3.95	3.95	6.06	3j	6.61	4.59	8.24
247	7.27	4.71	5.12	43n	5.40	5.27	3.08
295	6.98	4.53	5.80	49n	7.53	6.00	5.05
299	3.50	3.52	1.29	4b	7.33	4.89	6.14
301	3.30	3.36	6.22	4j	6.00	3.74	5.83
314	6.14	3.96	6.17	4n	7.23	5.11	6.36
315	4.91	3.22	6.40	54n	7.17	5.71	5.62
10bc	6.47	4.14	3.85	5j	3.94	2.70	4.13
10j	6.91	5.32	4.29	60n	3.81	2.90	4.72
10n	5.96	5.51	8.08	6A	7.76	4.48	5.09
112A	3.67	3.92	6.01	6j	7.47	5.09	5.67
11b	7.26	5.72	5.33	7j	7.44	4.51	5.05
11j	4.08	4.20	3.03	7n	5.00	4.95	5.53
11n	4.58	4.58	3.66	8b	6.98	5.74	5.55
123n	5.34	5.09	5.32	8n	7.12	5.48	6.10

GŪL sadalījums situāciju modelim ar divkaršu ūdensgūtņu jaudas palielināšanos



GŪL sadalījums situāciju modelim ar divkaršu ūdensgūtņu jaudas palielināšanos

