

**LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE**

**Arhitektūras un būvniecības katedra
Department of Architecture and Civil Engineering**

Viktors Juhna

**Pētījumi par Rīgas pazemes
ūdensgūtvju attīstību**

**Research about Development of
Riga Groundwater Resources**

**Promocijas darba kopsavilkums
doktora zinātniskā grāda iegūšanai
Hidroinženierzinātnes nozarē
Ūdenssaimniecības apakšnozarē**

**Resume
of academic thesis for doctor`s degree
in Water Resource Engineering Science,
subbranch of Water Management Science**

JELGAVA 2005

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE

Lauku inženieru fakultāte

Arhitektūras un būvniecības katedra

Mag.sc.ing.

Viktors Juhna

Pētījumi par Rīgas pazemes ūdensgūtvju attīstību

Promocijas darba kopsavilkums

**doktora zinātniskā grāda iegūšanai
Hidroinženierzinātnes nozarē
Ūdenssaimniecības apakšnozarē**

Jelgava 2005

Promocijas darbs izpildīts Latvijas Lauksaimniecības Universitātes Lauku inženieru fakultātes Arhitektūras un būvniecības katedrā laika posmā no 2000 līdz 2005. gadam.

Darba raksturs: promocijas darbs hidroiņģinierzinātnes nozarē

Darba zinātniskais vadītājs: Dr.sc.ing. Ē.Tilgalis, Latvijas Lauksaimniecības Universitāte.

Darba recenzenti:

Jānis Valters - Dr.hab.sc.ing., LLU profesors, Latvijas Lauksaimniecības Universitāte;

Igors Levins -Dr.ģeol., Vides ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūras galvenais hidroģeologs;

Valdis Lediņš - Dr.sc.ing., docents, Rīgas Tehniskā Universitāte.

Promocijas darba publiska aizstāvēšana notiks Latvijas Lauksaimniecības Universitātes Hidroiņģinierzinātņu nozares Hidroloģijas, Hidrotehnikas un Ūdenssaimniecības apakšnozares promocijas padomes atklātā sēdē _____ Lauku inģinieru fakultātē, Jelgavā, Akadēmijas ielā 19, 202 auditorijā.

Ar promocijas darbu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā, Lielā ielā 2, Jelgavā.

Atsauksmes sūtīt Promocijas padomes sekretāram Dobeles ielā 43, Jelgavā, LV-3001; tālr. 3025517

Padomes priekšsēdētājs - Jānis Valters, Dr. hab. sc.ing., LLU profesors.

Doctoral Thesis has been carried out at Faculty of Rural Engineering at Latvian University of Agriculture from 2000 until 2005.

Description of work: Academic Dissertation for Degree of Doctor in branch of Water Resource Engineering Science, sub-branch of Water Management Science.

Supervisor of the scientific work: **E.Tilgalis**, Dr..sc.ing., Professor of Latvia University of Agriculture.

Official reviewers:

Jānis Valters - Dr. hab. sc.ing., Profesor of Latvia University of Agriculture

Igors Levins - Dr. geol., Chief hydrogeologist at Agency of Environmental and Meteorology;

Valdis Lediņš - Dr. hab. sc.ing., assist. Prof. (docent) of Riga Technical University

Public defence of doctoral thesis will be held at the meeting of Promotion Board of Water Resources Engineering science, sub-branch-Hydrology, Hydraulic Engineering and Water Management in auditorium 202 Akadēmijas Street 19, Jelgava, on _____ 2005. at _____. The thesis will be presented in Latvian.

Doctoral thesis **is available for the review at the Research Library of Latvia University of Agriculture**, Lielā Street 2, Jelgava.

You are welcome to send your **comments** to the secretary of the Promotion Council, Dobeles Street 43, Jelgava, LV-3001, phone 3025517

Chairperson of the Board - **Jānis Valters**, Dr. hab. sc.ing., Profesor of Latvia University of Agriculture.

SATURS

| | lpp. |
|--|------|
| Darba vispārīgais raksturojums | 5 |
| Darba aktualitāte | 5 |
| Promocijas darba mērķis un uzdevumi | 7 |
| Pētījuma objekta apraksts | 8 |
| Zinātniskā novitāte | 9 |
| Zinātniskā darba aprobācija | 10 |
| Metodika un materiāli | 12 |
| Rezultāti un to analīze | 13 |
| Ūdens patēriņa prognoze | 13 |
| Rīgas pazemes ūdensgūtvju attīstības perspektīvas | 17 |
| Dzelzs formu analīze | 18 |
| Pazemes ūdeņu attīrīšana no dzelzs un mangāna | 19 |
| Aku reģenerācijas rezultāti | 19 |
| Jaunas gruntsūdens akas konstrukcijas izstrādāšana | 21 |
| Secinājumi | 24 |
| Pateicības | 26 |

DARBA VISPĀRĪGAIS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Nekaitīgs un kvalitatīvs dzeramais ūdens ir sabiedrības veselības viens no galvenajiem priekšnoteikumiem. Ūdens avota izvēle ir atkarīga no daudziem faktoriem, tai skaitā, no sagatavošanai nepieciešamā dzeramā ūdens daudzuma, pieejamiem ūdens resursiem, avotu veida (virszemes vai pazemes), attīrīšanas un transportēšanas izmaksām. Kā rāda prakse, pasaulē biežāk izmanto pazemes avotus jo tie tiek uzskatīti par drošākiem lietošanā.

Pagājuša gadsimta sākumā Rīgas pilsēta ar dzeramo ūdeni pilnībā tika apgādāta no pazemes avotiem kuri atradās Baltezera reģionā. Laikā gaitā ūdens patēriņam pilsētā pieaugot, sāka izmantot arī virszemes ūdens ieguves avotus, lai nodrošinātu nepieciešamo ūdens daudzums. Pagājušā gadsimta deviņdesmitajos gados pilsētā ievērojami samazinājās ūdens patēriņš, tāpēc bija nepieciešams izvērtēt pazemes un virszemes ūdensgūtvju izmantošanu dzeramā ūdens sagatavošanai.

Promocijas darbā pētīti jautājumi, kuri ir saistīti ar iespējām palielināt pazemes ūdens izmantošanas īpatsvaru Rīgas pilsētas ūdensapgādē. Promocijas darba galvenie pētījuma virzieni bija sekojoši:

- Prognozējamais ūdens patēriņš (Promocijas darba 1.daļa);
- Pazemes ūdensgūtvves Baltezers attīstības iespējas (Promocijas darba 2.daļa);
- Ūdens kvalitāte un attīrīšanas iespējas (Promocijas darba 3.daļa);
- Pieejamo ūdens resursu izmantošana (Promocijas darba 4. daļa);
- Ūdens ņemšanas iekārtu darbības efektivitātes palielināšana (Promocijas darba 5, 6, 7, 8.daļas).

Ūdensgūtvju attīstības noteikšanai bija jānoskaidro, kā izmainīsies ūdens patēriņš pilsētā nākamajos desmit gados. Iepriekšējie pētījumi par ūdens patēriņu Rīgā prognozēja dzeramā ūdens turpmāku samazināšanos [1]. Tomēr prakse pierādīja, ka prognozes dati atšķīrās no reāliem datiem. Patēriņš kritās vēl straujāk nekā tas tika prognozēts. No otras puses, ir jāņem vērā, ka nākotnē ūdens patēriņš pilsētā var pieaugt, pieslēgumu palielināšanās un ūdens apgādes sistēmas paplašināšanās rezultātā, pievienojot pilsētas

ūdensapgādei tuvumā esošās apdzīvotās vietas. Ūdens patēriņa nevienmērības izlīdzināšanai ir iespējams uzkrāt ūdens rezerves ūdenstorņos un apakšzemes rezervuāros. Pašreiz pilsētas ūdensapgādes 20 pazemes rezervuāru kopējais tilpums ir 90600 m³ un četru ūdenstorņu rezervuāru kopējais tilpums - 7500 m³. Tādējādi, kopējais uzkrājums ir 98100 m³ vai 31% no diennakts ūdens padeves. Salīdzinājumam: uzkrājuma procents Stokholmā ir 277, Kopenhāgenā - 440, Amsterdamā - 130, Antverpenē – 155 % no diennakts ūdens patēriņa. Lai nodrošinātu nepieciešamos ūdens caurplūdumus maksimālā patēriņu laikā, uzkrātu ūdens rezerves, kas nepieciešamas sūkņu staciju profilaktisko darbu veikšanai un sūkņu staciju avāriju gadījumos, līdz 2010.gadam ir jārada ūdens padeves rezerve 50 - 60% no diennakts ūdens patēriņa.

Pazemes ūdensgūtvju izmantošanas apjomu noteikšanai ir jāapzinās pieejamie resursi. Pilsētā ūdens sadales tīkls vēsturiski izveidots tāds, ka optimālo hidraulisko režīmu tīklā iespējams nodrošināt izmantojot virszemes un pazemes ūdensgūtvves. Daudzas Rīgas pazemes ūdensgūtvves bija novecojušas un to tehniskais stāvoklis neapmierinošs, lai nodrošinātu kvalitatīvu dzeramo ūdeni. Tāpēc bija nepieciešams veikt pētījumu, kurā noskaidrotu, kuras no ūdensgūtvēm ir lietderīgi slēgt un kuru darbību vajag atjaunot.

Liela daļa no Rīgas pazemes ūdensgūtvēs ierīkotajiem urbumiem tiek izmantoti ilgstoši un to vidējais vecums pārsniedz 20 gadus. Ūdens apgādei tiek izmantoti mākslīgi papildinātie gruntsūdeņi, kuru organisko vielu koncentrācija ūdenī ir relatīvi augsta un tas veicina urbumu aizsērēšanu (kolmatāciju). Dažās Rīgas pazemes ūdensgūtvēs ir norisinājusies strauja urbumu aizaugšana, tāpēc ūdensgūtvves uz šodienu nevar nodrošināt nepieciešamo ražību. Urbumu attīrīšanas un reģenerācijas darbu izmaksas, salīdzinot ar jaunu urbumu ierīkošanu, ir ievērojami mazākas. Diemžēl šobrīd nav skaidrības par reģenerācijas optimālo režīmu un tās efektivitāti. Iepriekšējā pieredze rāda, ka sālsskābe un nātrija ditionīts var tikt izmantoti kā reaģenti kolmatanta šķīdināšanai. Tomēr, nav metodikas par šo reaģentu izmantošanu urbumiem, kas ir vecāki par 10 gadiem. Nepieciešams izstrādāt aku reģenerācijas metodiku.

Aku kolmatācija rada ievērojumus ekonomiskus zaudējumus, jo pieaug elektoenerģijas patēriņš ūdens pārsūkņēšanai un aku reģenerēšanas izmaksas. Aizsērēšanu galvenokārt veicina tērauda apvalkcaurules ar metālu tinumu, kuras rada labvēlīgus apstākļus elektroķīmiskiem un fizikāliem procesiem ūdenī kas satur augstu dzelzs, kalcija,

mangāna, magnija un organisko vielu koncentrāciju. Tā rezultātā metāla daļas korodē un rodas kolmatanta veidojumi filtrā un ap to. Akas debits samazinās un ūdens kvalitāte pasliktinās, jo akas ūdenī palielinās dzelzs, kalcija, magnija un mangāna daudzums. Tāpēc ir nepieciešamība izstrādāt jaunu urbtās akas konstrukciju ar zemāku aizsērēšanas ātrumu, modernizēt aku konstrukciju, kas ļautu izmantot akas ar augstāku efektivitāti. Baltezera reģionā aku ražības aprēķiniem pašlaik izmantotās formulas dod nepietiekami precīzus rezultātus. Tas rada nepieciešamību izstrādāt jaunu formulu, kuru varētu izmantot aku aprēķinos pētāmajā reģionā.

Rīgas ūdensgūtvēs, līdzīgi kā daudzviet Latvijā, pazemes ūdens ir nekaitīgs un kvalitatīvs, izņēmums ir dzelzs un mangāna koncentrācija. Tradicionāli izmantotās atdzelžošanas metodes ne vienmēr ir pietiekami efektīvas un atdzelžošanas procesā rodas daudz nogulsnes. Ūdens attīrīšanai no mangāna tradicionāli pielieto ķīmiskās metodes. Pasaulē pēdējos gados aizvien biežāk sāk pielietot bioloģisko (tiešās aerācijas un filtrācijas) metodi, kuras pamatā ir bioloģiskie un virsmas katalītiskie procesi. Pasaules pieredze rāda, ka ar šo metodi var ūdeni efektīvi attīrīt no dzelzs un mangāna bez ķīmisko reaģentu pielietošanas un tās procesā rodas mazāk nogulsnes. Metodes pielietošanas potenciāls Rīgas pazemes ūdeņu attīrīšanai nav līdz šim novērtēts.

Atdzelžošanas efektivitāte ir atkarīga no dzelzs piemaisījumu atrašanās formas. Pētāmajā rajonā pazemes ūdens ir mākslīgi papildināts no virszemes avota, kas satur augstu dabisko organisko vielu koncentrāciju. Tāpēc, pastāv varbūtība, ka iegūtajā pazemes ūdenī dzelzs atrodas citā, piemēram, koloīdā vai ar humusvielām saistītā formā, nevis izšķīduša divvērtīga jona formā. Ir nepieciešams veikt pētījumu, lai noskaidrotu dzelzs atrašanās formu pētāmajā pazemes ūdenī.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

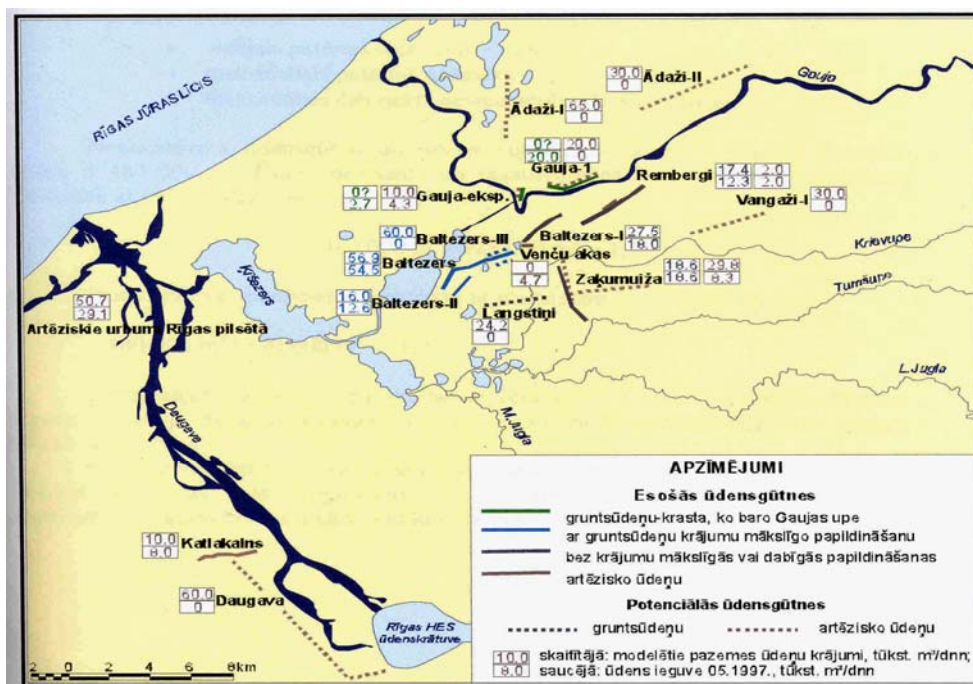
Promocijas darba mērķis ir izvērtēt Rīgas pilsētas esošo ūdensgūtvju stāvokli un perspektīvo pazemes ūdens ieguves avotu attīstību dzeramā ūdens apgādei līdz 2010.gadam.

Promocijas darba uzdevumi:

- prognozēt dzeramā ūdens patēriņu Rīgas pilsētā pētāmajā periodā;
- noteikt pazemes un virszemes ūdens daudzuma īpatsvaru dzeramā ūdens sagatavošanai;
- noteikt dzelzs formas pētāmajā pazemes ūdenī;
- pārbaudīt tiešās aerācijas un filtrācijas metodes pielietošanas iespējas pētāmā pazemes ūdens attīrīšanai no dzelzs un mangāna;
- pilnveidot esošo aku ražības atjaunošanas tehnoloģiju;
- izstrādāt akas konstrukciju, kura ir mazāk pakļauta kolmatācijai;
- izstrādāt teorētisku formulu aku īpatnējā debīta aprēķināšanai pētāmajā rajonā;
- salīdzināt vakuuma un dziļsūkņu aku atsūkņēšanas sistēmas no inženierekonomiskā viedokļa.

Pētījuma objekta apraksts

Rīgas pilsētas ūdensapgādes sistēma ir sarežģītu inženierbūvju komplekss, jo ūdensapgādei tiek izmantoti gan virszemes, gan pazemes ūdens ieguves avoti (1. attēls). 2001. gadā ir pabeigta virszemes ūdens sagatavošanas kompleksa "Daugava" rekonstrukcija, uzstādīti ozonatori un bioloģiski aktīvās ogles filtri. Šīs iekārtas nodrošina dzeramā ūdens sagatavošanu atbilstoši Eiropas Savienības dzeramā ūdens direktīvām. Izmantojamie pazemes ūdens avoti atrodas Mazā Baltezera (M.Baltezera) rajonā, gar Gaujas labo krastu, Garkalnē un Katlakalnā. 2002. gadā ir pabeigta pazemes ūdensgūtvēs "Baltezers" rekonstrukcija, ir izurbtas 40 jaunas akas, kā arī "Baltezers-II" un "Remberģos" daļēji nomainītas iekārtas. Pazemes ūdensgūtvēs "Baltezers", "Baltezers-I", "Baltezers-II", "Zaķumuiža" un "Remberģi" ūdens ieguvei izmanto sifonvadu sistēmu, kā arī dažas akas, aprīkotas ar dziļsūkņiem. Ūdens sūkņu stacijā „Katlakalns” ūdens sūkņēšanai izmanto dziļsūkņus.



1. att. Esošās un potenciālās pazemes ūdensgūtnes Rīgas ūdensapgādei

Pilsētā nav atsevišķas ūdensapgādes sistēmas tehniskajām vajadzībām, tomēr atsevišķos objektos ūdensapgādē eksistē vietējās ūdens ņemšanas ietaises, kas izmanto gan virszemes, gan pazemes ūdeņus. Pilsētas teritorijā ir vairāk kā 400 spiedūdens akas, no kurām 220 tiek izmantotas vietējai ūdensapgādei, kā arī ražošanas un saimnieciskām vajadzībām.

Zinātniskā novitāte

Pilsētas ūdensapgādes attīstība aptver plašu jautājumu loku, no kuriem daļu var atrisināt ar inženierekonomiskām metodēm, tomēr daļai jautājumu ir nepieciešama zinātniskā pieeja. Šajā promocijas darbā sistemātiski apkopoti vairāk nekā desmit gadu pētījumi, kas veikti sadarbībā ar dažādu zinātnes nozaru (bioloģijas, ķīmijas, hidroloģijas) zinātniekiem par jautājumiem, kas ir svarīgi Rīgas ūdensapgādes attīstībai. Katrā no apskatīto jautājumu kopām ir atspoguļotas vairākas zinātniskās novitātes:

- iegūtas jaunas zināšanas par dzelzs atrašanās formām mākslīgi papildinātos pazemes ūdeņos;
- ieteikta konservācijas metodika ūdens paraugiem, kuros nosaka dzelzs saturu;

- noskaidrots režīms, pie kura notiks pazemes ūdeņu ar vidēju dzelzs un mangāna koncentrāciju attīrīšana līdz dzeramā ūdens kvalitātei ar tiešās aerācijas un filtrācijas metodi;
- padziļināti izprasti procesi, kas risinās atdzelžošanas un atmanganizēšanas filtros;
- izstrādāta jauna aku reģenerācijas metodika;
- izstrādāta jauna formula aku īpatnējā debīta aprēķināšanai Baltezera reģionā;
- izstrādāta jaunas konstrukcijas gruntsūdens aka;
- pamatota spiediena sistēmas ar dziļsūkni priekšrocība, salīdzinot to ar vakuumsistēmu.

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA

Pētījumi veikti laika posmā no 2000.-2005.gadam. Par rezultātiem ziņots septiņās Starptautiskajās zinātniskajās konferencēs un vairākos zinātniskajos semināros.

Referāti:

1. IV International conference “Baltic Transit Gateway ’99”. Workshop Research and development in Modern Transportation Technology. V.Juhna Riga water yield sources and their development until 2010. 104-107 pages
2. LLU Science for rural development. International Scientific Conference Proceedings. Jelgava 2001, V.Juhna Results of regeneration of Baltezers bored wells. 215-219 pages.
3. LUA Research for rural development 2002. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2002. V.Juhna, Underground water resources development prospects in Baltezers region. 111-11-115.
4. LUA Research for rural development 2003. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2003. V.Juhna Removal of iron and manganese from groundwater at Baltezers drinking water plant in Riga, Latvia. 114-14-118.
5. Construction ’03 Scientific reports of international conference, Jelgava 2003. V.Juhna, E.Tilgalis Groundwater wells’ construction in Baltezers. 105-108 pages.
6. International conference „ECoBalt 2003”, Riga-2003, V.Juhna Problems related to Riga’s water-supplying., 40-41 pages.

7. LUA Research for rural development 2004. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2004. V.Juhna, Conveyance of water using Vacuum of Pressured system at Baltezers Waterworks.

Dotajā laika posmā publicēti 8 zinātniskie raksti latviešu, angļu, poļu valodās, no kuriem 6 atbilst vispārārtzītiem recenzējamiem zinātniskiem rakstiem.

Publikācijas:

1. International conference „ECoBalt 2003”, Riga-2003, V.Juhna Problems related to Riga’s water-supplying., 40-41 pages.
2. Construction ’03 Scientific reports of international conference, Jelgava 2003. V.Juhna, E.Tilgalis Groundwater wells’ construction in Baltezers. 105-108 pages.
3. LUA Research for rural development 2003. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2003. V.Juhna Removal of iron and manganese from groundwater at Baltezers drinking water plant in Riga, Latvia. 114-14-118.
4. LUA Research for rural development 2002. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2002. V.Juhna, Underground water resources development prospects in Baltezers region. 111-11-115.
5. LLU Science for rural development. International Scientific Conference Proceedings. Jelgava 2001, V.Juhna Results of regeneration of Baltezers bored wells. 215-219 pages.
6. IV International conference “Baltic Transit Gateway ’99”. Workshop Research and development in Modern Transportation Technology. V.Juhna Riga water yield sources and their development until 2010. 104-107 pages
7. LUA Research for rural development 2004. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2004. V.Juhna, Conveyance of water using Vacuum of Pressured system at Baltezers Waterworks.
8. Regeneracja studni wierconych (Renovation of drilled wells), Problemy Inzynierii Rolniczej 2(40), Warszawa 2003, s.53-60; *K. Kuczewski, E. Tilgalis, V. Juhna.*

METODIKA UN MATERIĀLI

Ūdens patēriņa prognoze Rīgas pilsētai

Pētījums par pilsētas dzeramā ūdens patēriņa prognozi bija balstīts uz iepriekšējos pētījumos iegūto datu sistemātisku analīzi un salīdzināšanu ar praksē iegūtiem datiem. Prognozējot ūdens patēriņu, tika ņemtas vērā sociālās un ekonomiskās attīstības tendences Rīgā un tuvumā esošajās apdzīvotajās vietās.

Pazemes avotu izvēle

Lai novērtētu kurus no pazemes ūdens ieguves avotiem var izmantot ūdens apgādē, veikta esošo un potenciālo avotu stāvokļu analīze.

Dzelzs formu analīze

Lai noteiktu dzelzs atrašanās formas, veikts atsūkņēšanas eksperiments lauka apstākļos piecās Rīgas pazemes avotiem raksturīgās akās. Paraugos noteica divvērtīgās un trīsvērtīgās dzelzs koncentrāciju. Dzelzs atrašanās formu daļiņu izmēri pazemes ūdeņos noteikti ar ultrafiltrācijas metodi. Atkarībā no molekulārā izmēra noteiktas trīs formas: suspendētā ($>0.45 \mu\text{m}$), koloīdā (no 0.45 līdz $0.01 \mu\text{m}$) un izšķīduša dzelzs forma ($<0.01 \mu\text{m}$).

Pazemes ūdeņu attīrīšana no dzelzs un mangāna

Pazemes ūdeņu attīrīšana no dzelzs un mangāna ar bioloģisko (tiešās aerācijas un filtrācijas metodi) pētīta uz lielas ražības eksperimentālas iekārtas. Iekārtā bija divas līnijas. Pirmajā līnijā saslēdza divus ātrfiltrus pildītus ar granti vai antracītu (tos varēja darbināt virknē vai paralēli). Otrajā līnijā saslēdza virknē rezervuāru, pildītu ar plastmasas matricām, un lēnfiltru. Uz iekārtas pārbaudīja spiediena ūdeni un mākslīgi papildināto gruntsūdeni ūdensgūtvē "Baltezers" viena gada garumā.

Esošo aku reģenerācija

Reģenerācija pētīta vairākos gruntsūdens urbumos Baltezera ūdensgūtvē. Veikti sekojoši darbi:

- urbumu kolmatācijas slāņa biezuma noteikšana (t.i. kavernometrija) ar radiolokācijas metodi;
- urbumu mehāniskā tīrīšana;
- atkārtota kavernometrija, lai izvērtētu mehāniskās tīrīšanas darbu efektivitāti;
- urbumu reģenerācija, izmantojot sālsskābes un nātrija ditionīta šķīdumus;
- urbumu atsūknēšana, lai noteiktu urbumu īpatnējā debita izmaiņas; atsūknēšanas sākumā un beigās, noņemti paraugi arī ūdens ķīmiskā sastāva noteikšanai;
- iegūtās informācijas apstrāde un reģenerācijas darbu efektivitātes novērtējums.

Reģenerācija veikta reaģentu iesūknējot caur urbumā speciāli aprīkotu caurules galvu. Pēc tam bija noslēgts aizbīdnis un no kompresora padots gaiss, kā rezultātā tiek pazemināts ūdens statiskais līmenis urbumā. Tā kā urbumā ūdens vietā ir reaģents, jauna reaģenta doza nonāk no urbuma iekšpuses aizcauruļu zonā. Tātad tiek apstrādāta ne tikai urbuma stobra iekšējās daļas, bet arī telpa, kas atrodas aiz filtra. Pēc 10-15 minūtēm tiek atvērts aizbīdnis un izlaižot saspiesto gaisu un reakcijas rezultātā radušās gāzes, tiek atjaunots ūdens statiskais līmenis urbumā. Šādā veidā ik pēc 10-15 minūtēm tiek šūpots reaģents urbumā un aizvien jaunas reaģenta dozas nonāk aizfiltra zonā. Pēc iepriekšējās procedūras veikšanas, reaģents tiek atstāts urbumā (sālsskābes 10-15 stundas, bet nātrija ditionīta 6-7 stundas).

REZULTĀTI UN TO ANALĪZE

Ūdens patēriņa prognozes

No 1904.gada līdz 1967.gadam pazemes ūdeņi, kas iegūti Baltezera reģionā, bija vienīgais ūdens apgādes avots Rīgas pilsētai. To īpatsvars pilsētas ūdens apgādē sāka samazināties kopš 1967. gada un, it īpaši, kopš 1978.gada, kad uzsāka ūdens apgādei izmantot Daugavas upes ūdeņus, lai gan kopējais ūdens patēriņš pilsētā minētajā laikā katru gadu palielinājās.

Kopš 1996.gada Rīgā kopējais ūdens patēriņš ir pastāvīgi samazinājies un samazinās vēl straujāk nekā bija prognozēts 1995. gadā. Saskaņā ar prognozēm [2] 2000. gadā, dienās ar vidējo ūdens patēriņu, no ūdensgūtvēm pilsētai bija jāpiegādā $236 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$ dzeramais ūdens. Faktiskais vidējais nepieciešamais ūdens daudzums Rīgai 2000. gadā bija tikai $200 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, tas ir par 18% mazāk kā prognozēts. 1996. gadā ūdens patēriņš bija $360 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, bet 2001. gadā tas bija tikai $175 \text{ m}^3 \text{ dnn}^{-1}$.

Prognozes par ūdens patēriņu Rīgā 2010. gadā saskaņā ar 1997. gada jūnijā sagatavoto darbu [3] ir sekojoša: vidējais patēriņš diennaktī - 328 000 m^3 ; maksimālais patēriņš diennaktī - 370 000 m^3 ; maksimālais diennakts nevienmērības koeficients $K_{d \text{ max}} = 1.13$. Nepieciešamā ūdensgūtvju un ūdens sagatavošanas ierīču kopējā diennakts ražība ir 460000 m^3 . Ūdens ņemšanas un sagatavošanas jaudu rezerves koeficients diennaktij ar vidējo ūdens patēriņu: $460 \text{ 000 m}^3 / 328 \text{ 000 m}^3 \approx 1.40$. Jaudu rezerves koeficients diennaktij ar maksimālo ūdens patēriņu: $480 \text{ 000 m}^3 / 370 \text{ 000 m}^3 \approx 1.24$.

Datu analīze ļāva secināt, ka ūdens patēriņš laika periodā no 2010. līdz 2020. gadam būtiski nemainīsies. Prognozētos patēriņus var uzskatīt par pietiekami drošiem. Ja faktiskais ūdens patēriņš būs lielāks par prognozēto, tad to varēs nodrošināt, izmantojot ūdens ņemšanas un sagatavošanas iekārtu jaudu rezerves, lai gan, kā jau bija minēts iepriekš, pēdējos gados vērojama tendence, ka faktiskais ūdens patēriņš ir par 18 - 22% mazāks kā prognozētais. Jaudu rezerves koeficientam palielinoties, palielinās ūdens apgādes drošums un tādējādi kļūdainā prognoze nevar radīt būtiskas problēmas Rīgas ūdensapgādē.

Dzeramā ūdens sagatavošanas kompleksa "Daugava" paredzētā jauda ir $240 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$. No šī daudzuma 9% nepieciešami paša kompleksa tehnoloģiskajām vajadzībām, galvenokārt filtru skalošanai. Tādēļ kompleksa lietderīgais ražīgums, tas ir dzeramā ūdens piegāde pilsētai, ir $220 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$. Kopējo jaudu $240 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, saskaņā ar Rīgas un apkārtējās vides projektu, attīrīšanas komplekss sasniedza 2001. gadā. Ūdensgūtvē "Baltezers" intensīvi papildināto gruntsūdeņu ieguvu var palielināt vismaz 1,5 reizes un sasniegt ražību 80 līdz 85 $\text{tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$. Ūdensgūtvē "Baltezers-I" ražīguma palielināšana iespējama līdz $27 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$.

Ūdensgūtvēs "Baltezers-II" projektētā ražība bija $30 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$. Ražīguma papildināšanai jāizpēta aku darbības efektivitāte un jāveic nepieciešamie rehabilitācijas pasākumi. Ražīguma palielināšana jāveic tajā ūdensgūtvē, kur tas ir ekonomiskāk izdevīgāk. Ūdensgūtvēs "Zaķumuiža" jaudu arī ir iespējams palielināt līdz aptuveni $48 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$.

Ar dziļsūkņiem aprīkotas un spiedvadiem pieslēgtas spiediena gruntsūdens akas dod iespēju elastīgi palielināt vai samazināt ūdens padevi pilsētai rīta un vakara stundās, kad mainās ūdens patēriņš. Šādu aku skaitu un ražību ir lietderīgi palielināt. Ūdensgūtvju ražīguma rezerves paredzētas, lai nesamazinot ūdens padevi pilsētai, varētu veikt ierīču apkopes un remonta darbus, kā arī kompensēt neparedzēti lielus ūdens patēriņus. Pēc Somijas konsultantu firmas "Soil and Watten" ieteikumiem ražīguma rezerve jāpieņem 45% no vidējā diennakts ūdens patēriņa vai 30% no maksimālā diennakts ūdens patēriņa.

Darbinot ūdens apgādes sistēmu šādā režīmā, ir jāzina, kādas ūdensgūtvēs pilnīgi vai daļēji ir lietderīgi turēt rezervē. Optimāls var būt variants, kad galvenā rezerve ir ūdens attīrīšanas kompleksā Daugava un pats komplekss darbojas ar nepilnu, konstantu ražību.

Daugavas kompleksam ar ražību $128 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$ jāstrādā nepārtraukti, kas ir 50% no pilsētai nepieciešamā dzeramā ūdens daudzuma. Pārējos 50% no pilsētai nepieciešamā dzeramā ūdens daudzuma piegādā pazemes ūdensgūtvēs. Šāda režīma priekšrocība ir tā, ka tas atbilst ūdens patēriņa īpatnībām izejamās dienās. Īpatnība ir tā, ka izejamās dienās, nepalielinoties kopējam ūdens patēriņam pilsētā, patēriņš koncentrējas lielajos dzīvojamo ēku masīvos. Ja Daugavas komplekss pilsētai piegādā tikai $100 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, tad izejamās dienās ne vienmēr ir pietiekams ūdens spiediens Ķengaragā un Pārdaugavas dzīvojamo ēku masīvos. Šī režīma trūkums ir tas, ka Daugavas kompleksā sagatavotā dzeramā ūdens pašizmaksa ir lielāka nekā no pazemes ūdensgūtvēm. Plānotajā 2010.gadā diennaktī ar maksimālo ūdens patēriņu, dzeramā ūdens padeve pilsētai no Daugavas kompleksa nav jāpalielina, salīdzinot ar 2003.gadu.

Lai Daugavas komplekss ekonomiskā režīmā pārsūknētu uz pilsētu 128 tūkst.m^3 ūdens diennaktī, otrā pacēluma sūknētavā ir jāuzstāda papildus divi sūkņi ar ražību $1000 - 1500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ katram no tiem. Ar vienu esošo sūkni $128 \text{ tūkst.m}^3 \text{ dnn}^{-1}$ pārsūknēt nevar,

bet strādājot ar diviem esošajiem sūkņiem darba režīms ir neekonomisks un vēl vairāk sadārdzina ūdens pašizmaksu.

Daugavas kompleksu var darbināt ekonomiskā režīmā ar nemainīgu ražību ap 100 tūkst.m³ dnn⁻¹, ja pazemes ūdensgūtvju ražību palielina vēl par 28 tūkst.m³ dnn⁻¹. Protams, jārisina problēma par spiediena nodrošināšanu dzīvojamo ēku masīvos izejamās dienās.

Darbdienām piemērotais ūdens padeves režīms 1998.gada rudenī izrādījās neatbilstošs ūdens patēriņam izejamās dienās, arī tad, ja kopējais diennaktī pilsētai padotais ūdens daudzums darba un izejamās dienās bija vienāds. Ūdens padeves grafiki pa diennakts stundām arī bija līdzīgi. Ķengaraga un Pārdaugavas lielo dzīvojamo masīvu iedzīvotāji sūdzējās par nepietiekamu ūdens spiedienu izejamās dienās. Jāievēro, ka no pilsētas dienvidaustrumu daļas lielajiem dzīvokļu masīviem - Juglas, Mežciema, Purvciema, Pļavniekiem līdzīgu sūdzību nebija. Izejamo dienu sūdzības sākās pēc tam, kad samazinoties pilsētas kopējam ūdens patēriņam līdz 250 tūkst.m³ dnn⁻¹, samazināja dzeramā ūdens kompleksa Daugava ražīgumu par vairāk kā 35% (no 160 tūkst.m³ dnn⁻¹ uz 100 tūkst.m³ dnn⁻¹) un lielāko daļu pilsētai nepieciešamā dzeramā ūdens (ap 150 tūkst.m³ dnn⁻¹) piegādāja no pazemes ūdensgūtvēm.

Problēmu, jādome, izraisa tas, ka izejamās dienās ūdens patēriņš koncentrējās lielajos, pa pilsētas perifēriju izvietotajos dzīvojamo ēku masīvos, attiecīgi samazinoties ūdens patēriņam uzņēmumos un iestādēs, kas vairāk izvietoti pilsētas centrālajā daļā.

Nepieciešamo ūdens spiedienu dienvidrietumu dzīvojamo ēku masīvos izejamās dienās nodrošina, ar palielinātu ražību darbinot ūdens sagatavošanas kompleksu Daugava. Šis risinājums ir tehnoloģiski neērts un ekonomiski apšaubāms. Lielu ūdens sagatavošanas kompleksu vajadzētu darbināt ar nemainīgu ražību un dzidrīnātā ūdens pašizmaksa ir lielāka kā no pazemes ūdensgūtvēm ņemtajam ūdenim. Ir jāatrisina problēma, kā ar vismazākajiem līdzekļiem, nodrošināt vajadzīgo spiedienu pilsētas dienvidrietumu dzīvojamo ēku masīvos izejamās dienās.

Izejot no augstāk minētā un pamatojoties, ka arī 1999.gadā ūdens patēriņš uz vienu iedzīvotāju pilsētā turpināja samazināties, 2000.gadā tika apstiprināti priekšlikumi par

Rīgas ūdensgūtvju darbināšanu no 2000. - 2005.gadiem (1. tabula). Šajos priekšlikumos balstās uz reālo ūdens patēriņu, kas atšķiras no 1995.gadā prognozētā.

1. tabula

Pilsētai nepieciešamais ūdens daudzums tūkst. m³ dnn⁻¹
dienās ar vidējo ūdens patēriņu

| ŪDENSGŪTVES | GADI | | | | | |
|--|-------|-------|------------|------------|------------|-----------|
| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
| <i>Daugava</i> | 95 | 92 | 115 | 115 | 115 | 100 |
| | R 68 | R 68 | R 105 | R 105 | R 105 | 120 |
| <i>Zaķumuiža</i> | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 43/25 |
| <i>Baltezers</i> | 45 | 45 | 25 R 20 | 25 R 20 | 25 R 20 | 25 R20 |
| <i>Baltezers-II</i> | 18 | 18 | R 18 | R 18 | R 18 | R18 |
| <i>Baltezers-I</i> | 9 R 9 | 9R 9 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| <i>Remberģi</i> | R 14 | R 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| <i>Gauja-I</i> | R 37 | R 37 | S | S | S | S |
| <i>Gauja-eksp.</i> | S 8 | S | S | S | S | S |
| <i>Katlakalns</i> | 8 | 8 | S | S | S | S |
| <i>Kopējais piegādājams ūdens daudzums un ražīguma rezerve</i> | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| | RV 68 | RV 68 | RV 105 | RV 105 | RV 105 | RV 120 |
| | RP 60 | RP 60 | RP 38 | RP 38 | RP 38 | RP 43 |
| | R 128 | R 128 | R 143 | R 143 | R 143 | R 163 |

Apzīmējumi: RV - virszemes ūdensgūtvju ražīguma rezerve;
RP - pazemes ūdensgūtvju ražīguma rezerve;
R - kopējā ūdensgūtvju ražīguma rezerve;
S – ūdensgūtve slēgta.

Rīgas pazemes ūdensgūtvju attīstības perspektīvas

Izskatot jautājumu par pazemes ūdens avotu attīstību, izmantoti darbā [3,4] izteiktie secinājumi un piedāvājumi. Vienīgā principiālā atšķirība ir tā, ka nākotnē ūdensgūtvēs tiek piedāvāta prioritāte devona ūdens horizontiem. Tādējādi ievērojami samazināsies risks, ko nosaka ūdens kvalitātes izmaiņas un urbumu kolmatācija. Balstoties uz šo, kā arī ņemot vērā vidējo un maksimālo ūdens patēriņu diennaktī (attiecīgi 200 un 225 tūkst. m³ dnn⁻¹), esošo ūdensvadu infrastruktūru un ūdens krājumus un to kvalitāti konkrētās ūdensgūtvēs ir izstrādāts priekšlikums pazemes ūdensgūtvju attīstībai laika posmā līdz 2010.gadam. RŪAVP pētījumu rezultātā iegūtā informācija ļauj piedāvāt būtisku pazemes ūdens avotu lomas palielināšanu Rīgas ūdensapgādē jau tuvākajos gados, lai uzturētu vēlamo darbības režīmu, kur 50% ūdens nāk no pazemes avotiem un

50% no ūdens attīrīšanas stacijas "Daugava" – kā galveno laika posmā līdz 2010. gadam [4]. Ūdens patēriņš 2010.gadā, salīdzinot ar 2005.gadu, būtiski nemainīsies.

Dzelzs formu analīze

Neskatoties uz ļoti līdzīgu jonu sastāvu – visos urbumos pazemes ūdeņiem ir hidroģēnkarbonātu magnija – kalcija sastāvs, kas ir visbiežāk sastopams saldūdeņos, pētītie pazemes ūdeņi krasi atšķiras pēc pH - redoks apstākļiem, kā arī pēc humusvielu satura, kas nosaka lielas dzelzs koncentrācijas svārstības ūdenī – no 0.02 līdz 2.1 mg/l. Bezskābekļa pazemes ūdeņos ar zemu redoks potenciālu 81-100% no kopēja dzelzs atradās divvērtīgajā formā. Trīsvērtīgais dzelzs dominēja tikai paraugā ar anomāli augstu skābekļa saturu. Divvērtīgo un trīsvērtīgo dzelzs formu attiecības, pētītos pazemes ūdeņos, atbilst teorētiskajiem pie konkrētiem pH un redoks apstākļiem. Iegūto datu ticamību apstiprina arī novērota trīsvērtīgā dzelzs koncentrācija – 0.02 mg l⁻¹, kas atbilst maksimālai trīsvērtīgā dzelzs savienojumu šķīdībai vāji sārmainā ūdenī.

Paraugu ultrafiltrēšana parādīja, ka visos pētītos pazemes ūdeņu paraugos gan divvērtīgā, gan trīsvērtīgā dzelzs atrodas jonu vai zemmolekulāru dzelzs humusvielu kompleksu formā. Pētījumos izmantotā ultrafiltrācijas metodika neļauj atšķirt dzelzs jonus no dzelzs-humusvielu kompleksiem. Iepriekšējos pētījumos, Baltezera gruntsūdenī [5] konstatēja, ka apmēram puse no dzelzs-humusvielu kompleksiem ir zemmolekulāri (<10kDa). Tāpēc, var pieņemt, ka mūsu pētījumā gruntsūdenī ar augsto organisko vielu koncentrāciju daļa no dzelzs atrodas izšķīdušo kompleksu veidā (neaiztur 0.01 μm filtrs). To apstiprina ūdens krāsainības mērījumi – izfiltrējot šo parauga caur 0.01 μm filtru ūdens krāsainība samazinājās no 80 līdz 30 platīna - kobalta vienībām. Par cik ūdens krāsainība pazemes ūdeņos ir proporcionāla humusvielu koncentrācijai, ūdens paraugs, kas ir izgājis caur 0.01 μm filtram satur gan dzelzi gan humusvielas.

Nevienā paraugā netika novērota dzelzs koncentrācijas samazināšanas tendence filtrātos, pazeminoties filtru poru izmēriem. Šis rezultāts bija gaidāms spiediena gruntsūdeņos ar zemu organisko vielu saturu. Tomēr gruntsūdeņiem ar augstu humusvielu koncentrāciju šis novērojums ir negaidīts. Tradicionāli tiek uzskatīts, ka ar humusvielām bagātos pazemes ūdeņos, līdzīgi kā virszemes ūdeņos, dzelzs pārsvarā

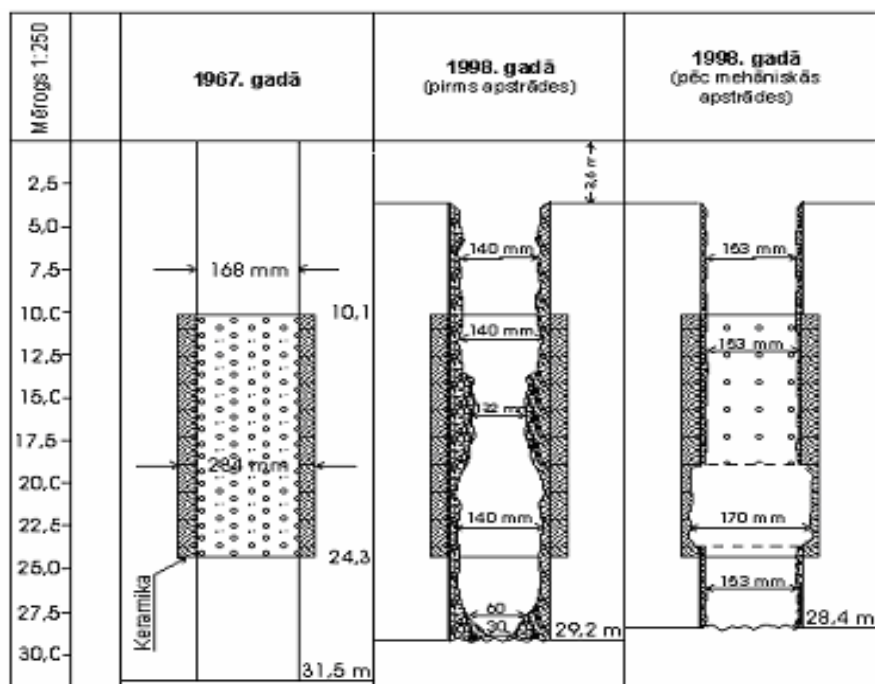
atrodas kompleksā ar augstmolekulārām humīnskābēm veidojot koloīdus (0.01-0.45 μm). Mūsu pētījums parādīja, ka pazemes ūdeņos dzelzs atrodas, galvenokārt, izšķīdušā formā un veido kompleksus ar mazmolekulārām humīnvielām (piem. fulvoskābēm).

Pazemes ūdeņu attīrīšana no dzelzs un mangāna

Pētījuma mērķis bija izpētīt vai tiešās aerācijas-filtrācijas metodes var efektīvi izmantot (1) pazemes ūdeņu ar vidēju dzelzs un (2) pazemes ūdeņu ar zemu dzelzs un vidēju mangāna koncentrāciju attīrīšanai. Pētījumi veikti viena gada periodā ūdensgūtvē "Baltezers" izmantojot lielas ražības eksperimentālu iekārtu. Iekārtai bija divas paralēlas līnijas. Pirmā līnija (dominējoši bioloģiskie procesi) sastāvēja no reaktora (piepildīts ar plastmasas matricām) kam sekoja smilšu lēnfiltr. Otrā līnija (dominējoši virsmas katalītiskie procesi) sastāvēja no ātrfiltriem (pildīts ar granti vai antracītu). Vienīgā ūdens apstrāde pirms filtrācijas bija dabiskā aerācija ūdenim izlīstot uz filtra vai reaktora virsmas. Iekārtu baroja (1) ar pazemes ūdeni no spiediena gruntsūdens akas, kas satur vidēju dzelzs (ap 0.8 mg l⁻¹) un zemu mangāna (ap 0.1 mg l⁻¹) koncentrāciju un (2) ar mākslīgi papildinātu gruntsūdeni (no Baltezera sifona krājakas), kas satur zemu (ap 0.3 mg l⁻¹) dzelzs un vidēju (ap 0.25 mg l⁻¹) mangāna koncentrāciju. Pirmā līnija, kurā dominēja bioloģiskās atdzelžošanas procesi, sasniedza maksimālo artēziskā ūdens attīrīšanas efektivitāti >95% pēc apmēram mēneša. Otrā līnija, kurā dominēja virsmas katalītiskie procesi, sasniedz līdzīgu efektivitāti daudz agrāk, tomēr process bija nestabils apmēram 20 dienas. Mākslīgi papildinātais ūdens saturēja tikai nelielu daļu divvērtīgā dzelzs. Dzelzs izdalījās ļoti efektīvi abās līnijās. Mangāna samazināšanās sākās tūlīt pēc pilota iekārtas iedarbināšanas un bija ļoti efektīva abās līnijās.

Aku reģenerācijas rezultāti

Mehāniskā aku tīrīšana ievērojami samazināja kolmatācijas slāņa biezumu (2.attēls). Kolmatants uz caurules sienām bija palicis fragmentāri 2 – 3 mm plānā slānī.



2.att. Baltezera ūdensgūtvēs urbums (43.aka) pēc mehāniskās tīrīšanas

Attīrījās arī perforētās caurules pamatdaļa. Intervālā no 19 – 23.6 m perforētā caurule bija tik sarūsējusi, ka tā tika izņemta. Tādējādi var apgalvot, ka šajā intervālā ir palikusi tikai daļa no perforētās caurules keramiskā seguma. Daļa kolmatantu un smilšu ir nosēdušies urbuma pamatā, un tā dziļums ir samazinājies par 3.6 m. Atsūknēšana pēc mehāniskās apstrādes parādīja, ka urbuma debīts palielinājies no 7.1 līdz 10 l s⁻¹ (1.4 reizes), bet īpatnējais debīts – no 1.25 līdz 1.39 l s⁻¹ m⁻¹ (1.1 reizes). Tā ir salīdzinoši liela efektivitāte, tomēr jāņem vērā, ka mehāniska tīrīšana neatbrīvo no kolmatanta filtra iekšējo daļu (2. tabula).

2. tabula

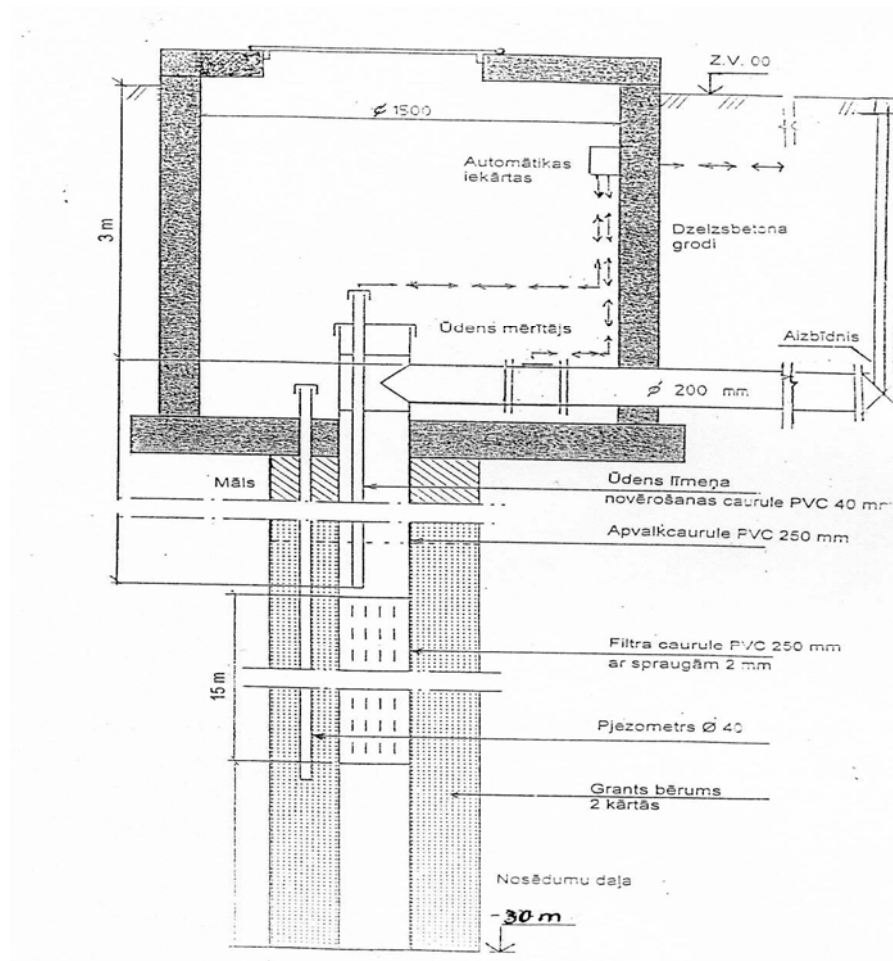
Urbuma (43.aka) atsūknēšanas rezultāti

| <i>Atsūknēšanas rādītāji</i> | <i>Atsūknēšana 1962.gadā</i> | <i>Pārbaudes atsūknēšana pirms urbuma apstrādes</i> | <i>Atsūknēšana pēc mehāniskās apstrādes</i> | <i>Atsūknēšana pēc apstrādes ar HCl</i> | <i>Efektivitātes koeficients</i> |
|---|------------------------------|---|---|---|----------------------------------|
| <i>Debīts, l s⁻¹</i> | 8.8 | 7.1 | 10.0 | 10.77 | 1.5 |
| <i>Ūdens statiskais līmenis, m</i> | 5.7 | 4.76 | 4.76 | 4.76 | - |
| <i>Ūdens dinamiskais līmenis, m</i> | 7.95 | 10.42 | 11.97 | 8.56 | - |
| <i>Līmeņa pazeminājums, m</i> | 2.25 | 5.66 | 7.21 | 3.8 | - |
| <i>Īpatnējais debīts, l s⁻¹ m⁻¹</i> | 3.9 | 1.25 | 1.39 | 2.83 | 2.26 |

Veiktā urbuma ķīmiskā apstrāde ar 5 % HCl šķīdumu ievērojami palielināja kopējo urbumā veikto darbu efektivitāti. Debits, tiesa gan, palielinājās neievērojami, salīdzinot ar mehānisko tīrīšanu (līdz 10.77 l s^{-1}), toties strauji palielinājās pamatrādītājs – īpatnējais debits (līdz $2.83 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$). Kopumā rezultātu var novērtēt apmierinoši (pat salīdzinājumā ar 1967. gadu). Ūdens ķīmiskais sastāvs urbumā kopumā ir palicis neizmainīts. Attiecībā uz dzelzs saturu ūdenī, - pēc mehāniskās tīrīšanas tas bija 0.83 mg l^{-1} , bet tūlīt pēc ķīmiskās apstrādes – 1.04 mg l^{-1} . Pēc tam, atsūknēšanas laikā, kas ilga 3 diennaktis, dzelzs saturs ļoti strauji samazinājās un svārstījās robežās no $0.26 - 0.38 \text{ mg l}^{-1}$. Iegūtie rezultāti parādīja, ka bez apbēruma konstrukcijas akas ar dzelzs apvalkcauruli ļoti piesērē ar dzelzs un kalcija nosēdumiem. Dažās akās kolmatanta slānis sasniedza līdz 80 mm (2.att.) vai pat pilnīgi to nosprostoja. Pētījumu rezultātā tika izstrādāta tehnoloģija aku mehāniski-ķīmiskai reģenerācijai ar 8% nātrija ditionītu ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$). Tomēr daudzas akas, kuru vecums lielāks par 15 gadiem, atjaunot nevarēja, jo tās bija izrūsējušas un lētāk urbt jaunas akas.

Jaunas gruntsūdens akas konstrukcijas izstrādāšana

Jaunās akas izbūvētas no materiāliem, kuru elektrostatisks potenciāls neveicina elektroķīmiskos procesus un kolmatanta veidošanos un kuri noturīgi pret koroziju. Izvēlētas polivinilhlorīda (PVC) caurules, jo tās neizraisa elektroķīmiskos procesus un ap to veidots sijātas grants apbēruma. Aka kopā ar apbērumu ir ar diametru 1000 mm. Akas konstruktīvais izveidojums parādīts 3.attēlā.



3.att. Baltezera urbtās akas konstrukcija (vakuumakas variants)

Filtrā caurules diametrs 250 mm. Lai palielinātu aku debitu filtra cauruli jāveido pēc iespējas garāku. Aka var būt pilndziļuma vai nepilndziļuma. Filtrā caurules garums aprēķināts pēc S.Abramova dotās izteiksmes [6]:

$$l_f \geq \frac{Q}{\pi \cdot D \cdot V_p \cdot Z} \geq 11.4m,$$

kur: Q – plānotais akas debits ($0.04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$);
 D – filtra diametrs, ievērojot apbērumu (1 m);
 V_p - pieļaujamais filtrācijas ātrums ūdenim
ieplūstot filtros.

$$V_p = 19.6\sqrt{K} \cdot \frac{1}{86400} = 0.00124m \cdot s^{-1};$$

K – filtrācijas koeficients apbērumu (30.24 m dnn^{-1});
 Z – koeficients atkarībā no maksimālā plūsmas ātruma, pieņemts 0.9 [7]
Pieņemts garums 15 m.

Ūdens līmeņa pazeminājums akā aprēķināts pēc V.Theisa izteiksmes [8]:

$$S = \frac{Q \cdot w}{4\pi \cdot K \cdot M} = 3.42m,$$

kur: Q – akas debits ($0.04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$);
 K – filtrācijas koeficients (0.00035 m s^{-1});
 M – ūdens slāņa biezums (pieņemts 15 m);
 T – gruntsūdens horizonta ūdensvadāmība (0.00525)
 W_u – akas funkcija (well function) 5.64 pēc [7,9]

Akas īpatnējo debītu noteica izmantojot V.Juhnas izstrādāto empīrisko formulu:

$$Q = \pi \cdot K \cdot D \cdot l = 0.01422 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 14.2 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1},$$

kur Q – akas īpatnējais debīts, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;
 K – filtrācijas koeficients, m s^{-1} ;
 D – filtra diametrs ar apbērumu, m;
 l – filtra caurules garums.

Ņemot vērā aku savstarpējo ietekmi, noteicām, ka aku debīti samazināsies par 19 % [9]:

$$Q_{\text{fakt.}} = 11.6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

Salīdzinot akas debītu, kuru noteica pēc V.Juhnas formulas ar 142 akā faktiski novēroto īpatnējo debītu $11.9 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, redzam, ka formula dod ticamus rezultātus, jo $11.6 \approx 11.9 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Aku ierīkošanu 2001.gadā izdarīja SIA „Urbšanas centrs”. Līdz 2003.gadam izveidotas 23 akas. Urbumu izveidoja ar rotācijas urbšanu un atgriezenisko skalošanu. Izmantoja URB agregātu ar pilnveidotu urbi, jo tāda diametra urbji nebija pieejami. Urbumu skaloja ar tīru ūdeni. Akas iebūvētas Ø 250 mm PVC apvalkcaurules, kurām galā piemetinātas tāda paša izmēra filtra caurules ar perforāciju $1 \div 2 \times 20 \text{ mm}$. Perforācija sastāda 70 % no filtra caurules virsmas. Perforācija sāka ne tuvāk kā 12 m no zemes virsas. Filtra apbēruma tika veidots no diviem slāņiem, izmantojot sijātu un kalibrētu granti. Grants vidējais daļiņu lielums (d_{50}) pielāgots ūdensnesošā horizonta smilts vidējo daļiņu izmēriem, piemēram, 142.akai apbēruma ārējam slānim $d_{50} = 0.63 \text{ mm}$ pret ūdensnesošā slāņa smilts vidējo daļiņu izmēru $d_{50} = 0.25 \text{ mm}$. Tas ir mazāk, kā iesaka zinātnieki $1 : 5$ [9], bet ņemām vērā, ka saglabājot šo attiecību, apbēruma frakcija būtu ļoti rupja $1.5 : 2.0 \text{ mm}$, kas nenovērstu smalko smilšu un trīsvertīgās dzelzs oksīdu pārslu ieplūšanu urbumā. Grants apbēruma 1.slāni veidoja $250 \div 300 \text{ mm}$ biezu, 2.slāni

100 ÷ 150 mm biezu ar daļiņu izmēru $d = 50 = 1.7 \div 2.0$ mm. Cilindrisko apbēruma formu izveidoja ar iegremdētām caurulēm, kuras pēc tam izvilka no urbuma.

Optimālas konstrukcijas akas noskaidrošanai izveidojām vakuumakai alternatīvu aku ar dziļsūkni, kuras priekšrocība ir tā, ka varam palielināt aku debītu līdz maksimāli iespējamam, ko nevar sasniegt ar vakuumsistēmu, jo praktiski sifonvadā vakuums ir tikai ($-0.04 \div 0.06$) MPa. Tādejādi iespējams samazināt nepieciešamo aku skaitu.

Akas apakšējās daļas un virsējās daļas (galvas) konstrukcija ir līdzīga kā 3.attēlā. Atšķirīga ir akas armatūra. Akā jāuzstāda dziļsūknis ar ražību ap $30 \div 40$ l s⁻¹ un celšanas augstumu 15 m. Ø 150 mm spiedvadā jāiebūvē vienvirziena vārsts, aizbīdnis un ūdens mērītājs. Akas galvā jāmontē elektrosadales un kontroles iekārtas.

Īpatnējais elektroenerģijas patēriņš 1 m³ ūdens sūkņēšanai no akas līdz 2. pakāpes sūkņu rezervuāriem. Alternatīvai ūdens atsūkņēšanas sistēmai ar dziļsūkņiem ir ievērojami mazāks īpatnējais elektroenerģijas patēriņš:

$$0.0470 < 0.1465 \text{ kWh m}^{-3}$$

Izbūvējot alternatīvo sistēmu, SIA "Rīgas ūdens" gadā varētu ietaupīt

$$P = (0.1465 - 0.0470) \cdot 9570125 = 952227 \text{ kWh gadā}^{-1} .$$

SECINĀJUMI

1. Pēc prognozēm, vidējais diennakts ūdens patēriņš Rīgas pilsētā 2010. gadā būs 200 tūkst.m³, maksimālais – 225 tūkst.m³. Nepieciešamās ūdens ņemšanas un sagatavošanas jaudas 280 – 300 tūkst.m³ dnn⁻¹. Tuvākajos 10-20 gados netiek prognozēts būtisks ūdens patēriņa pieaugums.

Rīgas pilsētas ūdens apgāde ilgtermiņa perspektīvā, vai arī virszemes ūdens attīrīšanas stacijā "Daugava" kritisku situāciju gadījumos, pilnībā var tikt nodrošināta izmantojot pazemes ūdeņus. Ir iespējams palielināt pazemes ūdeņu īpatsvaru Rīgas pilsētas ūdens apgādē.

Jāveic ūdens sūkņu stacijas „Zaķumuiža” rekonstrukcija.

Papildus jāizpēta pazemes ūdeņu krājumi un tā kvalitāte potenciālajos ūdens ieguves iecirkņos Baltezera reģionā.

Jāturpina M.Baltezera ūdens pašattīrīšanās pētījumi posmā no infiltrācijas baseiniem uz ekspluatācijas urbumiem. Tā nodrošināšanai jāierīko atbilstošs novērošanas urbumu tīkls. Jāizveido piesārņojuma migrācijas modelis, lai varētu kontrolēt un prognozēt ūdens kvalitātes ūdensgūtvju "Baltezers" un "Baltezers-II" iecirkņos.

Tuvākajā perspektīvā līdz 2010. gadam vēlmais Rīgas ūdensapgādes sistēmas darbības režīms, kur 50% piegādāts no pazemes ūdensgūtvēm un 50% no dzeramā ūdens sagatavošanas stacijas "Daugava".

2. Baltezera gruntsūdeņi satur paaugstinātu dzelzs koncentrāciju, vidēji 0.4 mg l^{-1} un mangāna koncentrāciju, vidēji 0.25 mg l^{-1} . Šie ūdeņi ir jāatdzelžo un jāatmanganizē. Baltezera gruntsūdeņos ar augstu organisko vielu koncentrāciju, dzelzs bieži atrodas kompleksā ar organiskām vielām (humusvielām). Baltezera sifona vadā lielākā daļa no divvērtīgā dzelzs oksidējās, veidojot koloīdus. Šāda ūdens attīrīšana ar tradicionālajām metodēm ir sarežģīta. Bioloģiskās metodes var tikt efektīvi izmantotas pazemes ūdeņu ar vidēju dzelzs (ap 1 mg l^{-1}) un pazemes ūdeņu ar zemu dzelzs un vidēju mangāna (ap 0.25 mg l^{-1}) koncentrāciju attīrīšanai.
3. Esošo gruntsūdeņu aku reģenerāciju var veikt ar mehāniski-ķīmisko metodi izmantojot drāšu sukas un 8% nātrija ditionītu ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$). Tādā veidā iespējams aku debitu palielināt 1 – 5 reizes.
4. Ūdensgūtvē "Baltezers" lietderīgi būvēt jaunās konstrukcijas akas no nekorodējoša materiāla PVC caurulēm ar lielu debitu ($60 - 90 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$). Aku debita noteikšanai iesaku izmantot izteiksmi $Q = \pi \kappa D I$.
5. Ūdensgūtvē "Baltezers" alternatīvā sistēma ar dziļsūkņiem ir lētāka par eksistējošo vakuumsistēmu. Aprēķini rāda, ka ūdens ieguves un transportēšanas izmaksas spiediena sistēmai līdz 2. pakāpes rezervuāriem ir 0.0018 Ls m^{-3} , bet vakuumsistēmai - 0.0056 Ls m^{-3} un ir lietderīgi pāriet uz ūdens sūkņēšanu no akām ar dziļsūkņiem.

PATEICĪBAS

Promocijas darbs tika veikts pateicoties vairāku cilvēku un organizāciju atbalstam.

Izsaku dziļu pateicību visiem, kuri man palīdzējuši, bet, jo īpaši:

Darba vadītājam profesoram Ērikam Tilgalim;

SIA "Rīgas ūdens" par iespēju izmantot materiālus par uzņēmumā veiktajiem pētījumiem, un darbiniekiem, kuri ņēma aktīvu dalību šī darba izstrādē;

Latvijas Lauksaimniecības universitātes Lauku inženieru fakultātes kolektīvam;

Latvijas Lauksaimniecības universitātes Doktorantūras daļai;

Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātes speciālistiem;

Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes speciālistiem;

Valsts Ģeoloģijas dienesta speciālistiem;

SIA "Urbšanas centrs" speciālistiem;

SIA „GEO Consultants” speciālistiem;

Arhitektūras un būvniecības katedras kolektīvam par morālo atbalstu promocijas darba nobeiguma posmā un tehnisko atbalstu noformēšanas laikā.

Paldies manai ģimenei par sapratni un atbalstu disertācijas tapšanas laikā.

LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE
Faculty of Rural Engineering
Department of Architecture and Civil Engineering

Mgr.sc.ing.
Viktors Juhna

Development of Riga Groundwater Resources

Resume

**of academic thesis for doctor`s degree
in Water Resource Engineering Science,
subbranch of Water Management Science**

JELGAVA 2005

CONTENTS

| | |
|---|----|
| General description of the work | 29 |
| Relevance of thesis work | 29 |
| Objectives and scope | 31 |
| Discription of study site | 32 |
| Scientific novelty | 33 |
| The scientific work approbation | 33 |
| Methods and materials | 35 |
| Results and discussions | 36 |
| Water consumption forecasts | 36 |
| Plants development prospects for Riga groundwater | 40 |
| Iron species in groundwater | 41 |
| Iron and manganese removal from groundwater | 42 |
| Regeneration of wells | 42 |
| Development of a new well construction | 44 |
| Conclusions | 48 |
| Acknowledgments | 49 |
| References used in summary | 50 |

GENERAL DESCRIPTION OF THE WORK

Relevance of the thesis work

A reliable supply of good safe drinking water is fundamental to a healthy community and to its economic development. The selection of the water source depends on several factors including accessibility and quality of raw water, type (surface or underground), treatment and transportation costs. Due to higher safety ground water sources are most frequently used in drinking water production.

At the beginning of the last century, the city of Riga supplied with drinking water from the underground resources located in the Baltezers region, which is located in vicinity. During the next eight decades, due to increasing urban water consumption the ground water resources become scarce. Therefore they had to be recharged artificially. Later, surface waters were also started to be used for drinking water production. In the nineties of the last century water consumption decreased considerably creating a necessity to estimate the usage of groundwater and surface water resources for producing drinking water in the city.

In the paper, aspects related to possibilities of increasing the amount of groundwater for Riga were studied. The thesis was mainly focused on the following topics:

- Forecast of water consumption (Chapter of Thesis 1);
- Development of Baltezers underground resources (Chapter 2);
- Alternatives for groundwater treatment (Chapter 3);
- Usage of accessible water resources (Chapter 4);
- Increase of water abstraction efficiency (Chapter 5, 6, 7, 8).

For predicting the development of water supply, it is necessary to forecast water consumption changes during the next ten years. According to earlier estimates the present trend of water consumption decrease will continue [1]. However, the records from the last years contradict this since a water consumption has stabilized.

In the future water consumption in the city is expected to increase as a result of extension of water supply networks, connecting more costumers living in areas located in the vicinity of Riga, and increasing stability and safety of water supply by providing high storage capacity though building new drinking water reservoirs and water towers, At present, the total storage capacity of underground reservoirs is 98100 m³ including 90600 m³ in underground reservoirs and 7500 m³ in fours water towers. This amount is only to 31% of the produced water per day, which is too low to supply enough water in

cases of peak consumption, emergency or pump testing. In comparison, in Stockholm the storage is 277, in Copenhagen - 440, in Amsterdam – 130 and in Antwerp – 155 % of the daily consumption. By the year 2010 the total storage capacity in Riga should be increased to a minimum to 50-60% of the daily supply.

To design water supply for Riga the available groundwater resource has to be evaluated. The groundwater and surface water sources are located in different parts of the network, therefore historically the optimum hydraulic regime in the network was ensured by using both types of raw water resources. Many ground waterworks in Riga are out of date and their technical condition is not sufficient to provide qualitative drinking water. Therefore, it is necessary to evaluate which waterworks should be renovated and which ones should be abandoned.

Most of the groundwater wells have been used for more than 20 years. Because of this and because some wells are receiving artificially recharged groundwater with relatively high amount of organic matter there is in extensive clogging of some of wells. The clogging has decreased yield of wells and increased maintenance costs. Often the regeneration costs are higher than costs for construction of new wells. The previous experience shows that hydrochloric acid and sodium dithionite can effectively be used as reagents for regenerating well with recent clogging problem. However to date there is no effective method to treat well that are older than 10 years.

Well clogging causes considerable economic losses including electrical power consumption for water pumping and regeneration costs. Clogging is most pronounced in steel pipes with metal winding where favorable conditions are created for electrochemical and physical processes to begin especially in waters containing high concentrations of iron, calcium, manganese, magnesium and organic substances. As a result, metal parts corrode and clogging material formations appear in well filter and around it. This results in the decrease of well yield and deterioration of produced water quality. Therefore, it is necessary to develop a new bored well construction that is less prone to clogging.

The equations currently used for estimation of yield of the wells at Baltezers region are not accurate. Therefore there is a necessity to develop new equations which could be used for construction of wells in the study area.

Groundwater quality in the Riga waterworks, as in many places in Latvia, is good with exception of iron and manganese concentrations. The traditional iron removal method is not always efficient and it produces a large quantity of sludge. Chemical methods are

usually used for water purification from manganese. During the latest years, direct aeration and filtration methods which incorporate biological and surface catalytic processes, are being used more and more for drinking water production. Experience shows that, using this method, iron and manganese can be effectively removed from water without using chemical reagents, and less sludge is produced. The potential of using this method for treatment of Riga groundwater has not been evaluated up to date. The efficiency of iron removal from water is dependent on iron speciation forms. In the study area, groundwater contains a high concentration of natural organic substances. Therefore, iron may exist in water in the form of colloid or in complexes with humic substances rather as ferrous ion species. Depending of the iron species, different water treatment methods are applicable. Therefore there is a need to determine the distribution of iron species in groundwater at Baltezers.

Objectives and scope

The overall objective of the thesis was to evaluate the conditions of the existing groundwater resources in Riga City and possibilities of the further development for drinking water supply until 2010.

Specific objectives were:

- to forecast drinking water consumption in Riga;
- to determine the optimal percentage of surface water and groundwater to be used for drinking water production;
- to determine iron species in groundwater in the at Baltezers region;
- to evaluate the efficiency of aeration and filtration method for removal of iron and manganese from groundwater in the Baltezers region;
- to improve the technology for restoration of efficiency of the existing wells;
- to develop a new construction of a well, which is less prone to clogging and inexpensive in usage;
- to improve mathematical methods for estimation of specific yield for wells located in the study area;
- to compare vacuum and submerged pump well pumping systems from the engineering and economic point of views.

Description of study site

The drinking water supply system of Riga is supplied both from surface and groundwater sources (Figure 1.). In 2001, reconstruction of the Daugava surface water treatment plant was completed. The treatment process at the plant was enhanced by two stage ozonation and biologically active carbon filtration. As a result of these improvements drinking water now meets European Drinking Water Directives.

Most of the ground water resources used for the Riga supply are located in the area near Lake Mazais Baltezers (M. Baltezers). A vacuum system is used for water abstraction at the plants Baltezers, Baltezers I and Baltezers II. At the other plants, Rembergi, Zakumuiza and Katlakalns, submerged pumps are employed for water abstraction. In 2002, reconstruction of groundwater plants was completed: 40 new wells were installed at the Baltezers-II plant and several old wells were replaced with new ones at the Rembergi plant.

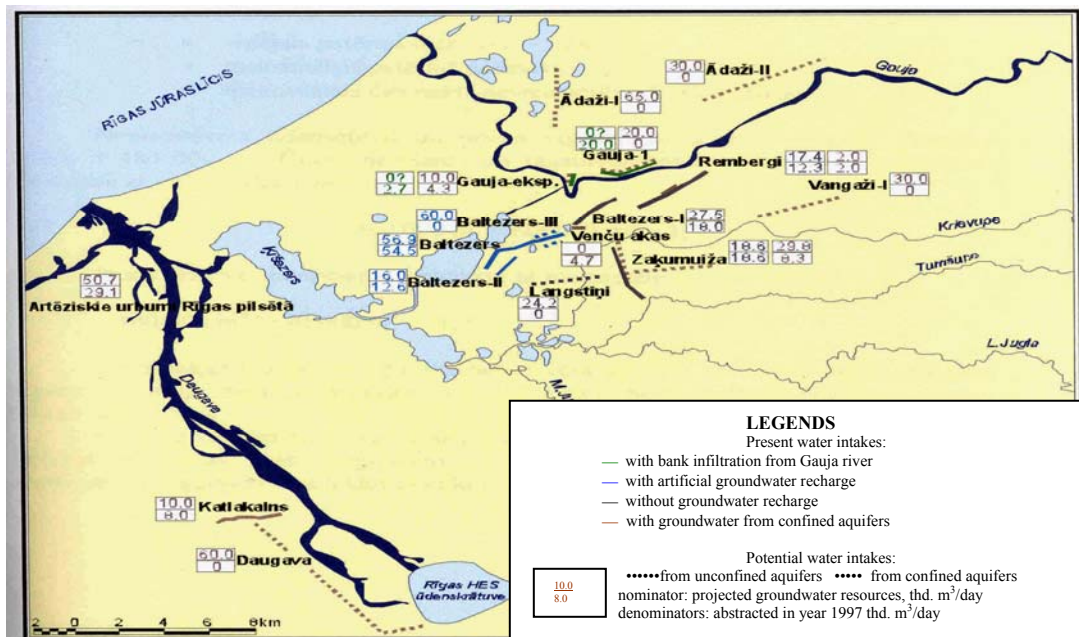


Figure 1. Existing and potential ground abstraction plants used for drinking water supply in Riga

There is no individual water supply system for technical needs in Riga. There are more than 400 individual artesian wells located within the city, of which 220 are used for drinking water supply.

Scientific novelty

Development of water supply for the city includes a wide range of issues, a part of which could be solved by engineering and economic methods, while for some problems scientific approach is required. This thesis is based on studies carried out over the period of ten years in co-operation with scientists from various scientific fields including biology, chemistry, and hydrology. The most important scientific novelties in this thesis are the following:

- knowledge about iron forms in artificially recharged groundwater;
- a new method for conservation of water samples for iron analyses;
- knowledge about removal of iron and manganese from groundwater using aeration and filtration methods;
- a new mathematical method for calculation of well yield;
- a new method for chemical regeneration of clogged wells.

The scientific work approbation

The thesis work has been carried out during the period from year 2000. till 2005. The research results have been reported at seven International scientific conferences of LUA.

Conferences and number of scientific meetings: Research for Rural Development 2001.-2005., International Scientific conference Civil Engineering ' 03, Jelgava, 2003, International conference Eco Balt ' 2003, Rīga, IV International conference Baltic Transit Gateway ' 99, 1999., Rīga.

List of the major conferences :

1. IV International conference "Baltic Transit Gateway '99". Workshop Research and development in Modern Transportation Technology. V.Juhna Riga water yield sources and their development until 2010. 104-107 pages
2. LLU Science for rural development. International Scientific Conference Proceedings. Jelgava 2001, V.Juhna Results of regeneration of Baltezers bored wells. 215-219 pages.

3. LUA Research for rural development 2002. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2002. V.Juhna, Underground water resources development prospects in Baltezers region. 111-11-115.
4. LUA Research for rural development 2003. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2003. V.Juhna Removal of iron and manganese from groundwater at Baltezers drinking water plant in Riga, Latvia. 114-14-118.
5. Construction '03 Scientific reports of international conference, Jelgava 2003. V.Juhna, E.Tilgalis Groundwater wells' construction in Baltezers. 105-108 pages.
6. International conference „ECoBalt 2003”, Riga-2003, V.Juhna Problems related to Riga's water-supplying., 40-41 pages.
7. LUA Research for rural development 2004. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2004. V.Juhna, Conveyance of water using Vacuum of Pressured system at Baltezers Waterworks.

During the doctoral studies, eight scientific papers have been published in the Latvian, English and Polish languages, five of them conform to generally approved reviewable scientific issues.

1. International conference „ECoBalt 2003”, Riga-2003, V.Juhna Problems related to Riga's water-supplying., 40-41 pages.
2. Construction '03 Scientific reports of international conference, Jelgava 2003. V.Juhna, E.Tilgalis Groundwater wells' construction in Baltezers. 105-108 pages.
3. LUA Research for rural development 2003. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2003. V.Juhna Removal of iron and manganese from groundwater at Baltezers drinking water plant in Riga, Latvia. 114-14-118.
4. LUA Research for rural development 2002. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2002. V.Juhna, Underground water resources development prospects in Baltezers region. 111-11-115.
5. LLU Science for rural development. International Scientific Conference Proceedings. Jelgava 2001, V.Juhna Results of regeneration of Baltezers bored wells. 215-219 pages.
6. IV International conference “Baltic Transit Gateway '99”. Workshop Research and development in Modern Transportation Technology. V.Juhna Riga water yield sources and their development until 2010. 104-107 pages

7. LUA Research for rural development 2004. International Scientific Conference Proceedings, Jelgava 2004. V.Juhna, Conveyance of water using Vacuum of Pressured system at Baltezers Waterworks.
8. Regeneracja studni wierconych (Renovation of drilled wells), Problemy Inzynierii Rolniczej 2(40), Warszawa 2003, s.53-60; K. Kuczewski, E. Tilgalis, V. Juhna.

METHODS AND MATERIALS

Forecast of water consumption for Riga

The forecasting of water consumption was based on systematic analysis of theoretical data acquired in previous studies and from data acquired in practice. In forecasting water consumption, social and economic development tendencies in Latvia were taken into account.

Selection of ground water resource

To evaluate which of groundwater sources could be used for water supply, the condition of existing and potential resources were studied.

Analysis of Iron Species

Determination of the iron species were carried out *in situ* during field sampling of groundwater from Baltezers region. Both ferrous and ferric iron was analyzed. Size of iron particles were determined using ultra-filtration method. Depending on size, three forms were distinguished: suspended ($>0.45 \mu\text{m}$), colloid (from 0.45 to $0.01 \mu\text{m}$) and soluble iron form ($<0.01 \mu\text{m}$).

Removal of iron and manganese from groundwater

Iron and manganese removal with aeration and filtration method were studied at the high yield pilot plant installed at Baltezers plant. The pilot plant consisted of two process lines. One line contained two filters filled with sand or anthracite; the second line consisted of a reservoir, filled with plastic matrices and a slow sand filter. The pilot experiment was carried out during one year using artificially recharged or deep groundwater.

Regeneration of existing wells

The regeneration of clogged wells was studied at the Baltezers plant. The study involved the following aspects:

- determination of the thickness of the clogging layer (thereafter, cavernometry) using radiolocation method;
- mechanical cleaning of wells;
- repeated cavernometry to estimate efficiency of mechanical cleaning;
- chemical regeneration of the wells using hydrochloric or sodium dithionite solutions;
- pumping test to determine changes of specific yield;
- chemical analyses of water;
- processing of the acquired information and evaluation of efficiency of regeneration.

Regeneration reagents were introduced through the special head pipe into the well. Then, the slide-valve was closed and air was supplied from the compressor resulting in lowering of the static water level in the well. As a result, the part of the reagents entered the outer zone of the well screen. Hence, not only inner part of the well was cleaned, but also external surfaces. After 10-15 minutes, the slide-valve was opened and, air and produced gases were released, resulting in recovery of the water static level in the well. By repeating this procedure, continuously fresh portions of the reagents came into contact with the outer media of the well filter. After completing this procedure, the reagent was left in the well for some time (hydrochloric acid 10-15 hours, but sodium dithionite 6-7 hours). Before the cleaned well was put again into operation it was water rinsed by abstraction of groundwater for three days.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Water consumption forecasts

From 1904 until 1967 groundwater from Baltezers region was the only drinking water source for Riga. Later, surface waters started to be used, resulting in a decrease of the percentage of groundwater as a drinking water source for the city. In 1978, the largest surface water treatment plant for abstraction water from the Daugava River began

operation. Since 1996, the total water consumption in Riga has been constantly decreasing. The declining trend was more rapid than it was forecasted in 1995. According to the forecasts [2], total consumption in Riga by the year 2000 would be about 236 thousand $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$, whereas the actual amount was 200 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, which was 18% less than forecast. In 1996, water consumption was 360 thousands $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, but in 2001 it was only 175 $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$.

According to the forecast [2], in Riga by 2010 the average daily water consumption will be 328 000 m^3 , maximum daily consumption - 370 000 m^3 with an maximum daily inhomogeneity ratio - $K_{d \max} = 1.13$. The total amount of water (including reserves and water for technical needs) required for the city is 460 000 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$. Thus, the provision rate is ≈ 1.40 ($460\,000 \text{ m}^3 / 328\,000 \text{ m}^3$) and reserve rate ≈ 1.24 ($480\,000 \text{ m}^3 / 370\,000 \text{ m}^3$).

Data analysis shows that water consumption in the period between 2010 and 2020 will not change considerably. This forecast of consumption can be considered as adequately reliable. If the actual water consumption will be more than forecast, it could be provided using the water reserves. Within the latest years, a tendency is observed that the actual water consumption is by 18-22% less than forecast. By increasing of water reserves, the reliability of water supply will be increased and, therefore, a mistaken forecast cannot cause essential problems for the water supply of Riga.

The expected yield of the Daugava surface water treatment plant is 240 thousand $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$, from which 9% are required for technological needs, mainly for backwashing of filters. At Baltezers the plant capacity of artificially recharged groundwater can be increased 1.5 times to reach yield between 80 to 85 thd. $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$. The yield of Baltezers-I groundwater plant could be increased up to 27 thd. $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$.

The design yield of the Baltezers-II groundwater plant was 30 thd $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$. To reach this capacity the efficiency of well production should be increased. This could be achieved after cleaning and reconstruction of some wells. The yield of the Zakumuiza groundwater plant can be increased up to about 48 thd $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$.

Pressured groundwater wells equipped with submerged pumps and connected with pressured pipes make it possible to increase or decrease flexibly the water supply for the city during morning or evening hours when water consumption increases. It is

expedient to increase the number and productivity of these wells. The plant productivity reserves are should be enable to carry out equipment maintenance and repairing work as well as to compensate unexpectedly high water consumption, without decreasing water supply for the city. According to recommendations (Finnish consultation office Soil and Watten), productivity reserve attributes 45% of the average daily water consumption or 30% of the maximum daily water consumption.

Operating the water supply system in this regime, it should be taken into account which plant is expedient to keep in reserve. The optimum option may be taking the main reserve from Daugava surface water treatment plant and operating at lower than maximum capacity. In 2005, ground water plant the total productivity will be $401 - 220 = 181$ thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$. In that year, daily with maximum water consumption 309 thousand m^3 , the Daugava plant should pump to the city $309 - 181 = 128$ thousands $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$. The Daugava plant should operate non-stop with a capacity 128 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$. The advantage of this regime is that it fits to water consumption on weekends, while if not increasing total water consumption in the city, consumption is concentrated in large residential districts. In the case that the Daugava plant supplies for the city only 100 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, there is not always adequate water pressure in some of Riga districts at weekends. The drawback of this regime is that prime cost of drinking water produced by Daugava plant is more than that of groundwater plants. Drinking water supply from Daugava plant, as projected for 2010 with maximum daily water consumption, will probably not be increased if compared with 2003.

Operating the Daugava plant in economic regime, to pump to the city 128 thousand m^3 daily, two additional pumps with productivity $1500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ each should be installed additionally in the booster pumping station. It is not possible to pump 128 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, using the one existing pump, but if working with the two existing pumps, the working regime is not economical and makes water cost more expensive.

The Daugava plant can be operated in economical regime with a constant productivity of about 100 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, if the groundwater capacity is increased by 28 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$. This would eliminate the problem of providing residential districts with pressure on weekends. Zoning of consumers and decreasing pressure losses in

transit pipes from eastern part waterworks to consumers can be a solution to the problem.

The water supply regime in autumn of 1988 for working days could not be applied for weekends, even if the total daily water supply to the city was equal for workdays and weekends. Schedules for water supply according to hours of the day were the same. Citizens of big residential districts of Kengarags and Pardaugava complained of inadequate water pressure during weekends. It should be taken into account that citizens of the south-eastern big residential districts - Jugla, Mezciems, Purvciems, Plavnieki had no such complaints. Weekend complaints started the total water consumption in the city was decreased to 250 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$, the drinking water Daugava plant yield was decreased by more than 35% (from 160 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$ to 100 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$) and drinking water (about 150 thousand $\text{m}^3 \text{ dnn}^{-1}$) necessary for the larger part of the city was supplied from north-eastern waterworks.

The problem was probably caused by the fact that on weekends, water consumption was concentrated in large residential areas located in the city's outlying districts, while water consumption by enterprises and institutions, which are basically located in the central part of the city decreased.

The necessary water pressure in south-western residential districts at weekends is ensured if Daugava plant is operated with increased capacity. This solution is technologically not convenient and doubtful from the economic point of view. The Daugava plant should be operated with constant capacity and the treatment water cost is higher than that of water obtained from groundwater resources. The cheapest way of maintaining the required pressure in south-western residential districts on weekends still to needs to be studied.

On the basis of the above and taking into account that in 1999 water consumption per one citizen of the city decreased, in 2000, proposals on Riga water resources operation from 2000 – 2005 (Table 1) were approved.

Plants development prospects for Riga groundwater

In this thesis the development prospects of groundwater for Riga water supply are based on earlier studies about available groundwater resources for the city [3,4]. In the future for Riga water supply the confined aquifers (Devonian water horizons) should be preferred to unconfined ones because they can provide better quality and higher safety of water. Taking into account the forecasted water consumption (maximum daily consumption - 225 000 m³) and hydraulics of the existing water distribution network in the city it is proposed that 50% of drinking water is supplied from groundwater sources and 50% from surface water sources.

Table 1

Water quantity necessary for Riga (in thousand m³ day⁻¹)
at days with medium water consumption

| Name of the plants | YEAR | | | | | |
|---|-------|-------|------------|------------|------------|-----------|
| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
| <i>Daugava</i> | 95 | 92 | 115 | 115 | 115 | 100 |
| | R 68 | R 68 | R 105 | R 105 | R 105 | 120 |
| <i>Zaķumuiža</i> | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 43/25 |
| <i>Baltezers</i> | 45 | 45 | 25 R 20 | 25 R 20 | 25 R 20 | 25 R20 |
| <i>Baltezers-II</i> | 18 | 18 | R 18 | R 18 | R 18 | R18 |
| <i>Baltezers-I</i> | 9 R 9 | 9R 9 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| <i>Remberģi</i> | R 14 | R 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| <i>Gauja-I</i> | R 37 | R 37 | S | S | S | S |
| <i>Gauja-eksp.</i> | S 8 | S | S | S | S | S |
| <i>Katlakalns</i> | 8 | 8 | S | S | S | S |
| Total amount of water supplied and production reserve | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| | RV 68 | RV 68 | RV 105 | RV 105 | RV 105 | RV 120 |
| | RP 60 | RP 60 | RP 38 | RP 38 | RP 38 | RP 43 |
| | R 128 | R 128 | R 143 | R 143 | R 143 | R 163 |

Legend:

RV – surface water plant productivity reserve;

RP – groundwater plant productivity reserve;

R – total capacity reserve for all plant;

S – plant closed.

Iron species in groundwater

Groundwater samples were taken from different locations in the Baltezers region. All water samples were similar in respect to general chemical composition – dominated by magnesium and calcium as cations and carbonate as anions. The concentration of iron was in the range of 0.02 - 2.1 mg/l depending on the amount of humic substances and pH-redox conditions in the groundwater. In anoxic groundwater with a low redox potential, 81-100% of the total iron was in the form of ferrous species. Ferric iron dominated only in samples with a high oxygen content. The ratio between ferrous and ferric iron corresponded to the theoretical ratios at given pH and redox conditions. The suitability of the data acquired is proved also by the observed ferric iron concentration – 0.02 mg l⁻¹, which corresponds to the maximum three-valent iron compound solubility in slightly alkaline water.

Ultrafiltration of water samples showed that in all water samples, both ferrous and ferric iron was in the dissolved form. Unfortunately, this speciation method did not distinguish between dissolved free iron species (iron, hydroxyl complexes etc.) and humic-iron complex. In previous studies where different speciation methods were used, it was found that in Baltezers groundwater [5] about half of the iron was bound to humic substances forming low-molecular humic-iron complexes (<10kDa). Therefore, it could be assumed that in the studied groundwater, due to a high amount of humic substances, a part of iron existed as low-molecular iron-humic complexes (passed 0.01 µm pore filter). This assumption was also confirmed by colour (absorbance at visible light) measurement. After filtration of sample through a 0.01 µm pore the filter colour decreased from 80 to 30 degrees (platinum – cobalt units). As there is linear correlation between colour and humic concentration it could be reasonable to assume that the filtrate contained humic substances which are forming complexes with iron.

There was no significant decrease of iron concentration with a decrease of filter pore size. A lack of such a is usual observed in pristine groundwater from deep anaerobic aquifers; however it was somewhat unexpected for shallow groundwater with high amount of humic substances. Conventionally it is assumed that groundwater contains iron complexes with high molecular weight humic substances, mainly in the form of colloids (0.01-0.45 µm). Our results showed in contrary showed that the iron-humic complexes have a low molecular weight, and most likely are dominated by fulvic acids.

Iron and manganese removal from groundwater

The aim of this study was to evaluate the efficiency of direct aeration-filtration methods for removal of iron from groundwater with a medium iron content and removal of iron and manganese from groundwater with a low iron and medium manganese concentration. For this purpose a scale pilot plant study was carried out during one year at the Baltezers plant. The pilot plant consisted of two parallel lines. The first line in which biological processes were dominating, consisted of a reactor filled with plastic matrix followed by a slow sand filter. The second line (assumed that surface catalytic processes are dominating) consisted of filters (filled with sand or anthracite). Only aeration was used before water was treated at the plant. The plant was installed at two sites. At the first site water was abstracted from a deep aquifer which contained groundwater with medium iron (about 0.8 mg l^{-1}) and low manganese (about 0.1 mg l^{-1}) concentration. At the second site artificially recharged groundwater from stock well at the siphon system at Baltezers plant was used. This water contained low (about 0.3 mg l^{-1}) iron and medium (about 0.25 mg l^{-1}) manganese concentration. Artificially recharged groundwater contained only little amounts of ferrous iron due to its oxidation to ferric form during water transport in a vacuum line.

In the first line, in which biological iron removal processes were dominating, maximal treatment efficiency of $>95\%$ was reached after about one month. In the second line, in which surface catalytic processes dominated, maximal removal efficiency was reached more rapidly, but the removal process was less stable in respect to produced water quality. Effective removal of manganese in both lines was observed soon after startup of the pilot plants.

Regeneration of wells

According to the developed technology in this study the regeneration of the wells was carried out in two stages- mechanical cleaning and chemical cleaning. In this study iron brushes used for mechanical cleaning were supplemented with cutting devices which improved removal of solid deposits from the well casing and screen. This approach considerably decreased the thickness of the clogging layer in the casing part of the well (Figure 2) leaving intact only 2-3 mm.

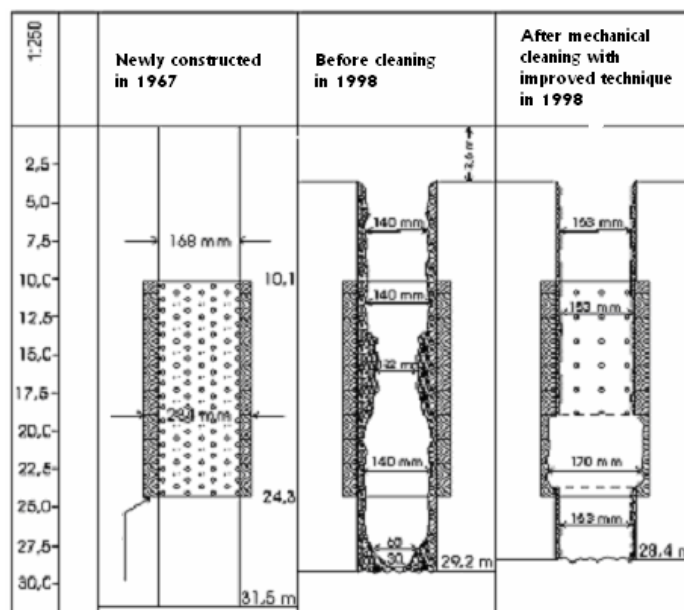


Figure 2. One of the wells (no. 43) after mechanical cleaning at Baltezers groundwater

The deposits from the largest parts of the well screen were also removed. Some of them accumulated in the bottom of the well. The section of the screen between 19 – 23.6 m was severely corroded and was therefore it collapsed during the cleaning. Only the ceramic filter remained in this section. Pumping after mechanical cleaning showed that the total well yield increased from 7.1 to 10 l s⁻¹ (1.4 times). Given that the clogging layer was not removed completely this was considered as a significant increase in well efficiency (Table 2).

Table 2

Results from pumping tests for a well (no 43) at the Baltezers plant

| Parameters | Results in 1962 | Before cleaning | After mechanical cleaning | After cleaning with HCl | Efficiency |
|--|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|------------|
| Well yield, l s ⁻¹ | 8.8 | 7.1 | 10.0 | 10.77 | 1.5 |
| Groundwater static level, m | 5.7 | 4.76 | 4.76 | 4.76 | - |
| Groundwater dynamic level, m | 7.95 | 10.42 | 11.97 | 8.56 | - |
| Well drawdown, m | 2.25 | 5.66 | 7.21 | 3.8 | - |
| Specific well yield, l s ⁻¹ m ⁻¹ | 3.9 | 1.25 | 1.39 | 2.83 | 2.26 |

Chemical treatment with a 5% HCl solution increased the total efficiency of the well production. The chemical composition of produced water was not affected significantly by the cleaning procedure. Iron content after mechanical cleaning was 0.83 mg l^{-1} , but immediately after chemical treatment – 1.04 mg l^{-1} . During next three days of pumping, the iron content decreased very rapidly and remained in the range of $0.26 - 0.38 \text{ mg l}^{-1}$. The results showed that, without gravel packing around the well filter, the well was rapidly polluted with iron and calcium deposits. In some wells clogging layer reached up to 80 mm thickness (Figure 2) or completely blocked it. As a result of the study a new cleaning technology with mechanical and chemical regeneration with 8% sodium dithionite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) was developed. However, it was not possible to recover efficiency of wells with an age of more than 15 years. For these wells it appears that drilling of new wells is a cheaper option rather than their regeneration.

Development of a new well construction

In this study a new design well was developed with a lower potential of clogging. It was assumed that the wells should be built of materials with electrostatic potential that do not stimulate electrochemical corrosion processes and are resistant to formation of a clogging layer. Polyvinylchloride (PVC) pipes were selected as the best material for the pipe of wells. The screen of the well was coated with gravel packing of diameter 1000 mm. The design of the new well is presented in Figure 3.

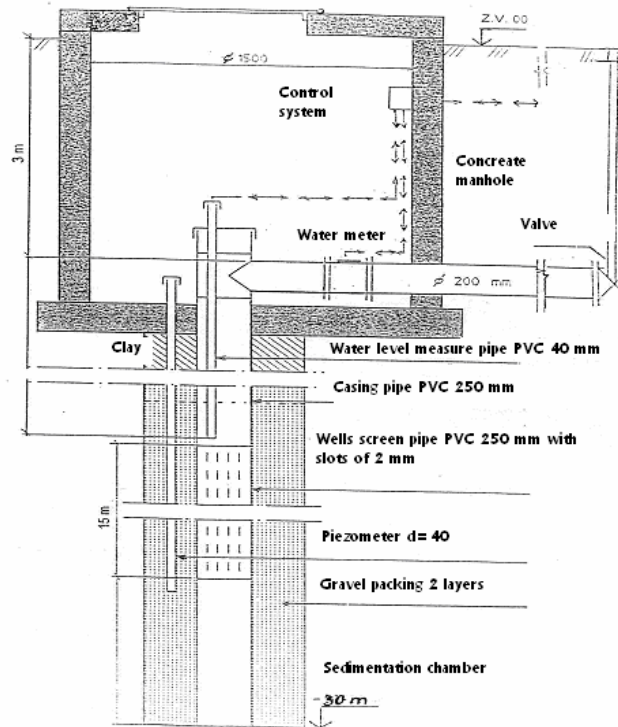


Figure 3. The design of a new type of well at the Baltezers groundwater plant connected to a vacuumed water collector

Diameter of filter pipe is 250 mm. To increase well yield, the screen should be constructed as long as possible. The screen length is calculated according to the formula developed by S. Abramov [6]:

$$l_f \geq \frac{Q}{\pi \cdot D \cdot V_p \cdot Z} \geq 11.4m,$$

where: Q – design yield of the well ($0.04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$);

D – filter diameter, taking into account gravel packing (1 m);

V_p - water flow rate at the inflow to the well filter .

$$V_p = 19.6\sqrt{K} \cdot \frac{1}{86400} = 0.00124ms^{-1};$$

K – permeability (30.24 m dnn^{-1});

Z – ratio depending on maximum flow speed, assumed as 0.9 [7];

Water drawdown in well (S) was calculated according to the V. Theis formula [8]

$$S = \frac{Q \cdot W(u)}{4\pi \cdot T} = 3.42m,$$

where: Q – yield of well ($0.04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$);

$T = KM$ - transmissivity

K – permability (0.00035 m s^{-1});

M – aquifer bed thickness (assumed 15 m);
 $W(u)$ – the well function - 5.64 according to [7, 9]

Specific yield of the well was determined using V. Juhna empirical formula:

$$Q = \pi \cdot K \cdot D \cdot l = 0.01422 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 14.2 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1},$$

where Q – well specific water yield, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$;
 K – permeability, m s^{-1} ;
 D – filter diameter with gravel packing, m;
 l – screen length.

It was assumed that due to mutual influence from other wells, water yield decreases by 19% [9]

$$Q_{\text{fakt.}} = 11.6 \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}.$$

Comparing well yield determined according to the V. Juhna formula with that measured in the field, the results were significantly similar: $11.6 \approx 11.9 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

In 2001, the first new construction well was installed at the Baltezers groundwater plant. There were 23 wells built by the year 2003. Drilling was conducted using rotary boring and the reverse rinsing technique. Wells were rinsed using clayed and clean water. PVC pipe of diameter 250 mm was built into wells to which a screen with perforation $1 \div 2 \times 20$ mm was welded. Perforation occupied 40% of the screen surface. Perforation started at a depth of 12 m from the earth surface. Filter packing material consisted of two layers of selected sizes gravel. Medium particle size (d50) of the gravel was chosen depending on the particle size of the aquifer material. e.g. in well no. 142 the outer layer consisted of gravel with $d_{50} = 0.63$ mm whereas the d_{50} of aquifer material was 0.25 mm. This ratio was less than recommended by other researchers (1 : 5) [9], but we found that a smaller ratio allowed to keep ferric oxides from entering the well filter and clogging it. The thickness of the outer layer was $250 \div 300$ mm. The inner layer of packing material consisted a gravel of particle size (d50) from $1.7 \div 2.0$ mm and thickness $100 \div 150$ mm. Packing was conducted using sinking pipes, which after introducing gravel around the filter were taken from the well.

The well construction was adopted for use not only for a vacuum (siphon) system but also for wells with a submerged pump. The latter has several advantages compared to a vacuum system. Most important, it allows to increase the yield to maximum which is not the case for a vacuum system, the yield of which is limited by a negative pressure of

-0.04 ÷ 0.06 MPa. By using submerged pumps it is possible to decrease the number of wells.

The well designs for vacuum and submerged pump wells are similar except for some details (Figure 3). In the latter the submerged pump with capacity about $30 \div 40 \text{ l s}^{-1}$ and actual pumping head of 15 m should be installed in the well. One direction valve, slide-valve and metering device should be built in a 150 mm diameter pressure pipe. The electrical system and control equipment should be mounted in the well head.

Calculation showed that the specific electrical power consumption for pumping 1 m^3 of water from well to booster station using a submerged pump system is cheaper than using a vacuum system:

$$0.0470 < 0.1465 \text{ kWh m}^{-3}$$

According to calculation, replacing the existing vacuum system with a submerged pump system would allow to save about 950 thd. kWh per year:

$$P = (0.1465 - 0.0470) \cdot 9570125 = 952227 \text{ kWh per year}^{-1} .$$

CONCLUSIONS

1. The average daily water consumption in Riga City in 2010 will be 200 thd m³, maximum – 225 thd m³, with a total yield of 280-300 thd m³ day⁻¹. In the nearest 10-20 years, a significant increase of water consumption is not likely. In case of an emergency at the surface water treatment plant Daugava, the required water amount for Riga could be provided using only groundwater resources. It is possible to increase the rate of groundwater usage for the drinking water supply of Riga. It is necessary to carry out reconstruction of the Zakumuiza groundwater plant. There is a need for further research about groundwater resources and they quality in the Baltezers district. More research is also need on treatment process taking place in the course of artificial recharge of groundwater. For this, the network of control wells in the area should be extended. A pollution migration model should be developed to make it possible to control and forecast water quality in the areas of the Baltezers and Baltezers-II plants. Until 2010, the optimal ratio of surface water and groundwater for the water supply of Riga city should be 50/50.
2. Groundwater in the Batezers region contains on average 0.4 mg l⁻¹ of iron and 0.25 mg l⁻¹ of manganese. If used for drinking water production groundwater should be treated to remove iron and manganese. In the study area groundwater contained organic substances in concentrations which sequestered some of iron into dissolved form (as complexes with humic substances), even in aerobic conditions. A large portion of ferrous iron is oxidized, forming colloids, during groundwater transport in the Baltezers vacuum pipe. Direct aeration and filtration methods can be effectively used for producing good quality drinking water from groundwater with medium iron and from groundwater with low iron and medium manganese concentrations.
3. Regeneration of existing wells could be effectively carried out by mechanical and chemical method using wire brushes and 8% sodium dithionite (Na₂S₂O₄). With this approach it is possible to increase the yield of wells for 1-5 times.
4. It is recommended to expand the Baltezers groundwater plant by building new wells using PVC pipes with a large water yield (60 – 90 m³ h⁻¹). For determination of yield of well, I recommend to use formula the $Q = \pi \kappa D I$.

5. At the Baltezers plant, alternative system with submerged pumps is cheaper than the existing vacuum system. Calculations showed that the cost for abstracting and transporting groundwater to a second boost station are 0.0018 Ls m^{-3} , and 0.0056 Ls m^{-3} for submerged pump and vacuum system, respectively.

Acknowledgments

The work conducted during on the thesis was supported by many people and organizations. I express a deep gratitude to all of them, with special thank to:

My supervisor – Professor Eriks Tilgals;

SIA Rigas Udens – for the opportunity to use the large amount of data and to employees actively participated in the work development.

Latvian University of Agriculture Agricultural Engineer Faculty team;

Latvian University of Agriculture Doctorate Section;

Colleagues at the Faculty of Building and Civil Engineering, Riga Technical University;

Colleagues at the Faculty of Geography and Land Science, University of Latvia;

State Geology Service specialists;

SIA Urbsanas Centrs specialists;

SIA GEO Consultant specialists;

Architecture and Construction Chair team for moral support at the final stage of promotion work and technical support during the period of its execution.

Thanks to my family for understanding and support while developing the thesis.

KOPSAVILKUMA NORĀDĒS IZMANTOTĀ LITERATŪRA

References used in summary

1. Baltic Sea Environment Programme. Latvia: Riga Environment Project. Feasibility study. Final Report. Stockholm, RUST VA-Project AB, 1995.
2. Municipal enterprise *Rigas Udens*. Forecasts on water consumption in Riga during the period until 2010. Riga, 1997.
3. I. Levins et al. Underground Water Stocks for Centralized Water-Supply in Riga. Riga, VGD, 1997.
4. M. Grase, V. Juhna, J.Prols et al. Research material evaluation. About Riga underground water sources and their development until 2010.. RPPU Rigas Udens, Riga, 1997.
5. T. Juhna, B. Gulbe and M. Klavins. Speciation of iron in groundwater from areas of humic waters by ion-exchange method. *Vatten.*, 58, 2002.
6. S.K. Abramov, V.S. Aleksejev Taking of water from underground source. Moscow. Kolos, 1980.
7. T. Gabryszewski, A. Wierzystry. *Ujecia wod pogriemnych*. Warszawa, 1995.
8. H.Bouwer. *Groundwater hydrology*. Me Graw-Hill, New York. 1980.
9. М.Е.Альтовский. *Методические руководство расчету взаимодействующих артезианских и грунтовых водозаборов*. Москва. 1947.