

DISERTATIONES GEOLOGICAE UNIVERSITATIS LATVIENSIS NR. 20

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
ĢEOGRAFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE



Oļģerts Aleksāns

Divfāzu šķidrums plūsmas gruntsūdens horizontā

Promocijas darba kopsavilkums

Doktora zinātniskā grāda iegūšanai ģeoloģijā
Apakšnozare: lietišķā ģeoloģija

Rīga, 2011

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē Ģeoloģijas nodaļas Lietišķās ģeoloģijas katedrā no 2006. gada līdz 2011. gadam.

Promocijas darba vadītājs:

Valdis Segliņš, profesors, *Dr. geol.* (Latvijas Universitāte)

Recenzenti:

Uldis Bethers, *Dr. phys.*, Latvijas Universitāte

Aija Dēliņa, docente, *Dr. geol.*, Latvijas Universitāte

Māris Kļaviņš, profesors, *Dr. habil. chem.*, Latvijas Universitāte

Promocijas padomes sastāvs:

Vitālijs Zelčs, profesors, *Dr. geol.* – padomes priekšsēdētājs

Ervīns Lukševičs, profesors, *Dr. geol.* – padomes priekšsēdētāja vietnieks

Aija Dēliņa, docente, *Dr. geol.*

Laimdota Kalniņa, asociētā profesore, *Dr. geogr.*

Valdis Segliņš, profesors, *Dr. geol.*

Ivars Zupiņš, *Dr. geol.*

Padomes sekretārs:

Ģirts Stinkulis, asociētais profesors, *Dr. geol.*

Promocijas darbs pieņemts aizstāvēšanai ar LU Ģeoloģijas promocijas padomes 2011. gada 19. maija sēdes lēmumu Nr. 002/2011.

Promocijas darba atklāta aizstāvēšana notiks LU Ģeoloģijas promocijas padomes sēdē 2011. gada 2. septembrī, Rīgā, Alberta ielā 10, Jāņa un Elfrīdas Rutku auditorijā (313. telpa).

Promocijas darba kopsavilkuma izdošanu ir finansējusi Latvijas Universitāte.

Ar promocijas darbu ir iespējams iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4, un Latvijas Akadēmiskajā bibliotēkā Rīgā, Lielvārdes ielā 4.

Atsauksmes sūtīt: Dr. **Ģirts Stinkulis**, Latvijas Universitātes Ģeoloģijas nodaļa, Raiņa bulvāris 19, LV-1586, Rīga. Fakss: +371 6733 2704, e-pasts: Girts.Stinkulis@lu.lv

© Oļģerts Aleksāns, 2011

© Latvijas Universitāte, 2011

ISBN 978-9984-45-367-5

Satura rādītājs

Anotācija	4
Pētījuma tēmas aktualitāte	5
Pētījuma mērķis un uzdevumi	6
Darbu novitāte	6
Darba aprobācija un rezultātu realizācija	7
1. Pētījuma teritorijas raksturojums	9
1.1. Pētījuma vietas izvēle un pētījuma priekšmeta detalizācija	9
1.2. Ventspils eksperimentālais laukums	9
2. Metodes un materiāli	14
2.1. Eksperimenta realizācijas procedūra	14
2.4. Pētījuma analītiskās metodes	16
3. Datu statistiskā apstrāde	23
4. Rezultāti	27
4.1. Skaitliski noteiktais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums	27
4.2. Empīriski noteiktais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums	28
4.3. Pētījuma datu matemātiskās analīzes rezultāti	30
5. Diskusija	35
Secinājumi	41
Pateicības	42
Literatūra	43
Publicētie materiāli	43
Nepublicētie materiāli	45
Interneta resursi	46
Publikāciju saraksts	47
Raksti starptautiskajos izdevumos un kolektīvajās monogrāfijās	47
Starptautisko konferenču un semināru referātu tēzes	47
Konferenču un semināru referātu tēzes Latvijā	48
Citas publikācijas	49

Anotācija

Promocijas darbs ir veltīts gruntsūdens horizontā pastāvošās divfāzu šķidruma plūsmas hidroģeoloģisko parametru noteikšanas metožu analīzei, šo pētījumu nozīmes izvērtēšanai lietišķajā ģeoloģijā, raksturojot to perspektīvu konkrētu hidroģeoloģisku uzdevumus risināšanā, kā arī šo metožu attīstības tendenču un iespēju pētīšanai.

Pētījumā pierādīts, ka pēc urbumu atsūkņēšanas pārtraukšanas, līmeņu atjaunošanās periodā veicot regulārus brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma un tā saskares virsmas ar ūdeni līmeņa mērījumus atsūkņējamajā urbumā, var iegūt datus, kas ļauj noteikt brīvās fāzes šķidruma slāņa aktuālo biezumu gruntsūdens horizontā.

Veikta gruntsūdens horizontā pastāvošās divfāzu šķidruma plūsmas teorētisko datu sistemātiska analīze, un šie dati pārbaudīti lauka eksperimentos. Šādi iegūtajiem parametriem ir augsta korelācija ar empīriski aprēķinātajiem rādītājiem, kas liecina par šo metožu savstarpējo aizvietojamību lietišķos un zinātniskos pētījumos.

Raksturvārdi: divfāzu šķidrums, brīvā fāze, aktuālais slāņa biezums, gruntsūdens horizonts, naftas produkti, piesārņojums.

Pētījuma tēmas aktualitāte

Pēc Latvijas valstiskuma atjaunošanas XIX gadsimta deviņdesmitajos gados sāka strauji attīstīties dažādas ievirzes vides pētījumi, tajā skaitā augstas detalizācijas hidroģeoloģiskie pētījumi, kas nereti bija saistīti ar vides likumdošanas būtiskām izmaiņām. Atbilstošā normatīvo aktu bāze tika pilnveidota un pakāpeniski saskaņota ar Eiropas Savienības telpā ieviestām normām, un šajā kontekstā kā viena no prioritārajām vides prasībām tika noteikta integrēta rūpnieciskā piesārņojuma kontrole un tā novēršana, piesārņoto vietu apzināšana, izpēte un sanācija.

Visvairāk šīs izmaiņas likumdošanā ietekmēja naftas un naftas produktu pārstrādes, uzglabāšanas un transportēšanas uzņēmumus (LR Ekonomikas ministrija, 15.11.2004.), jo to vēsturiskās darbības rezultātā daudzās vietās Latvijā bija izveidojušies plaši grunts un gruntsūdens piesārņojuma areāli (Baltijas Vides forums, 2006; Gosk et al., 1993; Levin et al., 1994; Aleksāns et al., 1997), bet to atbilstošai izpētei tradicionālās piesārņojuma pētījumu metodes izrādījās nepiemērotas (Levins, Prols, 1997; Loginova, 1997). Gruntī un gruntsūdenī esošo piesārņojošo naftas produktu daudzuma aprēķini bija kļūdaini (API-Publication, 2004), un iegūtie rādītāji visbiežāk vairākas reizes pārsniedza patiesos vidē esošos piesārņojošo naftas produktu apjomus. Rezultātā uzņēmumiem tika piemērotas nepamatoti augstas dabas resursu likmes par faktiski neesošo videi nodarīto kaitējumu (Aleksāns, 2000; Kovaļenko, 1996).

Ik gadu Latvijā notiek desmitiem naftas produktu noplūžu, kuru rezultātā tiek piesārņoti tūkstošiem kvadrātmetru virszemes platību un ūdenstilpju, bet gruntī un gruntsūdenī nonāk simtiem kubikmetru naftas produktu (SIA "VentEko" dati par noplūdēm pēdējo 8–12 gadu laikā). Naftas produktu piesārņojumam gruntsūdens horizontā ir raksturīgs divfāzu šķidrums stāvoklis, un tā ir viena no aktuālākajām vides problēmām, kuras pētīšanai ir vajadzīgas īpašas metodes un speciāla mēraparatūra.

Gruntsūdens horizontā pastāvošā divfāzu šķidrums plūsma kā problēma ir plaši pētīta pasaulē. Īpaši ir atzīmējamas Amerikas Naftas institūta (API) izstrādes (API-No.4711, 2001; API-Publication, 2004), kā arī atsevišķi pētījumi Latvijā (Aleksāns, 2006; Buiķis, 1989; Spalvins, Lace, 1997; Spalvins et al., 1997). Šajos pētījumos tiek akcentēti gruntsūdens horizontā pastāvošās divfāzu šķidrums plūsmas teorētiskie aspekti, tomēr joprojām zinātniskajā literatūrā ir nepietiekami diskutēti par šo teorētisko jautājumu atbilstību dabā novērotajam, par teorētisko modeļu aprobāciju un pārbaudi, ņemot vērā lauka mērījumu rezultātus.

Divfāzu šķidrums nosacījumiem gruntsūdens horizontā nav piemērojami tradicionālie pazemes ūdeņu plūsmas un tās dinamiku aprakstošie vienādojumi.

Šeit darbojas daudzfaktoru vide, kuras izziņāšanai ir vajadzīgas jaunas metodes, bet tās var iegūt vienīgi, veicot mērķtiecīgus pētījumus un eksperimentus. Neskatoties uz minēto, Latvijā šādi pētījumi ir ļoti ierobežoti (Aleksāns, 2000), bet to trūkums liedz vides speciālistiem, hidroģeologiem un inženieriem iegūt nepieciešamos parametrus naftas produktu izraisītā piesārņojuma izplatības ierobežošanai un teritoriju sanācijas projektu izstrādei (Aleksāns, 2002).

Pētījuma mērķis un uzdevumi

Veiktā pētījuma mērķis bija izstrādāt jaunu praktisku metodi gruntsūdens horizontā pastāvošā divfāzu šķidrums slāņa aktuālā biezuma noteikšanai, izpētīt divu šķidrums, kas nesajaucas, plūsmas likumsakarības poraino nogulumu vidē, pārbaudīt jau zināmās teorētiskās metodes, izvērtējot to piemērotību hidroģeoloģisko jautājumu risināšanai Latvijas ģeoloģiskajos apstākļos.

Svarīgākie uzdevumi, lai sasniegtu minēto mērķi, bija savākt, apkopot un izanalizēt apjomīgo faktu materiālu un atrast pareizo aprēķinu algoritmu, kas būtu maksimāli vienkāršs un tajā pašā laikā ļautu iegūt iespējami patiesu rezultātu, balstoties tikai uz urbumu atsūkņēšanas datu apstrādi. Ļoti būtiski bija arī noteikt svarīgākos kritērijus, kas ietekmē brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums gruntsūdens horizontā, kā arī galvenos faktorus, kuru ietekmē veidojas starpība starp urbumā nomērīto šķietamo brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums un šī šķidrums aktuālo (faktisko) biezums gruntsūdens horizontā.

Pētījums nosacījumi tāpat paredzēja analizēt iegūtos datus un atsūkņēšanas eksperimenta mērījums rezultātus, lai pārbaudītu, vai analītisko aprēķinums dati adekvāti raksturo nosakāmā parametra skaitlisko vērtību un šī parametra variāciju. Svarīgi bija izdalīt un raksturot likumsakarības, kas var negatīvi ietekmēt rezultāta ticamību, veikt kļūdaino rezultātu (noraidīto vērtību) analīzi, raksturot to rašanās iemeslus un iespējamos risinājumus kļūdu novēršanai.

Lai izpildītu izvirzīto mērķi, tika izvērtētas visas pieejamās jaunāko teorētisko metožu izstrādes, analizēta publicētā zinātniskā literatūra (Nyer et al., 1996; Aral, Liao, 2000; Lefebvre, 2006; Bondy et al., 2006), pētījums tehniskie ziņojumi (Aleksāns, 2002; Aleksāns, 1998) un internetā pieejamā informācija, kā arī tika pētīti un analizēti dažādu profesionālo organizāciju rīkoto konferenču, semināru un kursu materiāli (Howard, 2005; Merry, 2005).

Darbu novitāte

Pētījums aptver pēdējo desmit gadu laikā autora iegūto lauka novērojums rezultātu apkopojums, to analīzi un salīdzināšanu ar parametriem, kas iegūti ar jaunākajām uz empīriskiem aprēķiniem balstītām teorētiskām metodēm. Tas

ir balstīts uz eksperimentāliem un praktiskiem mērījumiem lauka apstākļos un orientēts uz vietējiem ģeoloģiski hidroģeoloģiskajiem apstākļiem, kas ļauj pilnīgāk apzināt divfāzu šķidrums plūsmas īpatnības naftas produktu piesārņojuma vietās Latvijā. Autora veiktais pētījums ir pirmais šāda veida eksperiments, kur gruntsūdens horizontā pastāvošās brīvās fāzes šķidrums plūsmas teorētiskie aspekti ir pamatoti ar plašu lauka novērojumu datu bāzi.

Ir vispārzināms (API-Bulleten-No.18, 2003), ka gruntsūdens horizontā pastāvošā brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums ir cieši saistīts ar piesātināto horizontu veidojošo iežu filtrējošajām īpašībām, brīvās fāzes šķidrums fizikāli ķīmiskajiem rādītājiem un vairākiem citiem faktoriem. Šo faktoru mijiedarbība nosaka brīvās fāzes šķidrums slāņa plūsmas īpatnības un šī slāņa aktuālā biezuma izmaiņu likumsakarības gruntsūdens horizontā (Aleksāns, 2006), un šie rādītāji būtiski atšķiras no tīra ūdens filtrācijas rakstura poraino iežu vidē (API-No.4760, 2007).

Promocijas darbā, kā liecina arī tā nosaukums, ir akcentēta divfāzu pazemes plūsmas gruntsūdens horizontā. Šāds uzsvars uz divfāzu šķidrums plūsmu ir izdarīts ar nolūku pierādīt, ka, atšķirībā no parastas gruntsūdens plūsmas horizontā, divfāzu piesātinājuma apstākļos darbojas pilnīgi citas likumsakarības, kuru izziņai ir vajadzīgi speciāli pētījumi. Divfāzu plūsmas likumsakarības ir intensīvs zinātnisko pētījumu priekšmets visā pasaulē (API-Bulleten-No.18, 2003), un tas nosaka pētījuma aktualitāti un mūsdienīgumu.

Darba aprobācija un rezultātu realizācija

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, līdz 2011. gadam sagatavots vairāk nekā 30 zinātnisku publikāciju par atsevišķām pētījuma sadaļām un darbu kopumā, no tām 9 raksti publicēti starptautiskos izdevumos un kolektīvās monogrāfijās, 7 publikācijas satur starptautisko konferenču un semināru tēzes, 9 – Latvijā nolasīto referātu publicētās tēzes, kā arī ir bijušas vairākas publikācijas dažādu valstu ģeoloģisko institūciju un iestāžu izdevumos. Starptautiskos zinātniskos kongresos, konferencēs un semināros ir nolasīti 13 referāti, kā arī 10 ziņojumi sniegti zinātniskās konferencēs un semināros Latvijā. Kopumā publicētie materiāli pilnībā atspoguļo disertācijas rezultātus un izriet no promocijas darbam izvirzītajiem uzdevumiem.

Laika apstākļos iegūtā un statistiski pamatotā gruntsūdens horizontā pastāvošās divfāzu šķidrums plūsmas aktuālā biezuma noteikšanas metode paver jaunu iespēju dažādu hidroģeoloģisko uzdevumu risināšanai tehniski sarežģītās teritorijās: naftas terminālos, ostās, vietās, kur konstatēta naftas produktu noplūde no cauruļvadiem, pilsētu rūpnieciskajās zonās u. c. Šādas metodikas trūkums Latvijā līdz šim liedza vides speciālistiem, hidroģeologiem un inženieriem iegūt

nepieciešamos parametrus naftas produktu izraisīta piesārņojuma izplatības ierobežošanai un teritoriju sanācijai. Tāpēc autora pētījumā aprobētā un zinātniski pamatotā brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālā biezuma noteikšanas metode var kļūt par noderīgu instrumentu dažādu hidroģeoloģisko aprēķinu veikšanai vides sanācijas projektu izstrādē.

Protams, iegūtie rezultāti ir tikai neliela daļa no tās informācijas, kas vēl apgūstama gruntsūdens horizontā pastāvošās divfāzu šķidrums plūsmas veidošanās mehānisma izziņāšanas jomā. Tomēr tā ir laba pieredze, kas paver plašas iespējas šos rezultātus praktiski izmantot, lai nākotnē noteiktu gruntsūdens horizontā notiekošās divfāzu šķidrums plūsmas hidroģeoloģiskos aprēķinus.

1. Pētījuma teritorijas raksturojums

1.1. Pētījuma vietas izvēle un pētījuma priekšmeta detalizācija

Promocijas darba realizācijai tika izvēlēta pētījuma vieta, kurā ir Latvijas teritorijai raksturīgi ģeoloģiskie un hidroģeoloģiskie apstākļi un kurā veidojas pētītā divfāzu šķidrums plūsma. Pētījumu vietas kritēriju noteikšanai tika izmantots Piesārņoto un potenciāli piesārņoto vietu reģistrs (LVĢMC, 2006), kas satur 3567 ierakstus, no kuriem 243 ir potenciāli piesārņotas vietas. No šīm 243 piesārņotajām vietām 192 gadījumos (78%) gruntī vai gruntsūdenī esošajā piesārņojumā ir konstatēta naftas produktu klātbūtne. 49 ar naftas produktiem piesārņotajās vietās (26%) virs gruntsūdens ir brīvās fāzes šķidrums slānis, bet 143 vietās (74%) šāds slānis var potenciāli veidoties.

Pētījuma vietas izvēlē kā papildu kritērijs tika izvirzīta prasība, lai brīvās fāzes šķidrums slānis atrastos gruntsūdens horizontā, kurā Latvijas ģeoloģiski hidroģeoloģiskajos apstākļos visbiežāk ir sastopama divfāzu plūsma, jo tieši gruntsūdens ir vismazāk dabiski aizsargāts no naftas produktu piesārņojuma. Dziļāk esošo ūdens horizontu piesārņošanās ar naftas produktiem Latvijas ģeoloģiskajos apstākļos caurmērā nepārsniedz 5–6% no kopējā šī piesārņojuma objektu skaita.

Svarīga nozīme ir to nogulumu litoloģiskajam sastāvam, kas satur brīvās fāzes šķidrums slāni un ūdeni. Piesārņoto un potenciāli piesārņoto vietu datu bāzē esošās informācijas analīzes rezultāti rāda, ka virs gruntsūdens peldošs brīvās fāzes šķidrums slānis 94% gadījumos veidojas smilšainos nogulumos.

Pētījuma vajadzībām bija svarīgi izvēlēties tādu objektu, kurā brīvās fāzes šķidrums slāni veido kāda no naftas produktu tipa piesārņotājielām, kura sastopama visbiežāk. 191 ar naftas produktiem piesārņotās vietas analīze parādīja, ka visbiežāk (57%) sastopamais piesārņojuma cēlonis ir benzīns un/vai dīzeļdegviela.

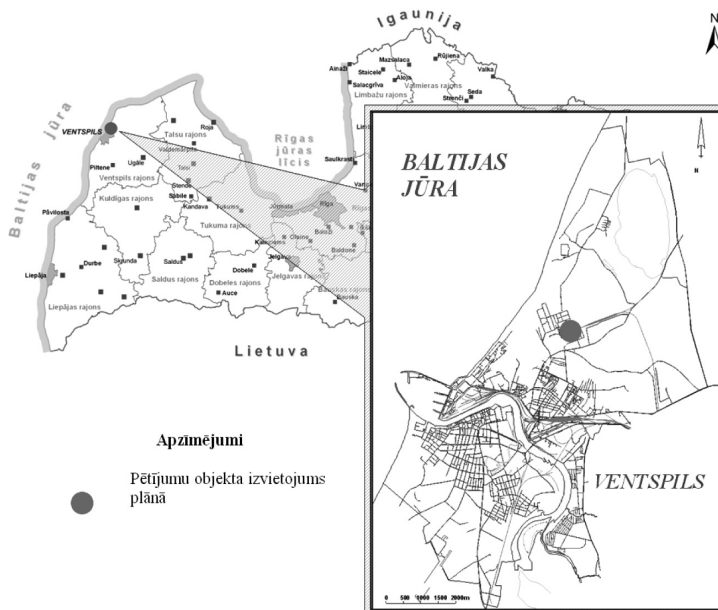
Sistemātiski izvērtējot visu datu bāzē esošo teritoriju atbilstību iepriekš noteiktajiem kritērijiem, kā viena no perspektīvākajām vietām pētījumam tika izvēlēts naftas produktu piesārņojuma objekts Ventspils pilsētas rūpnieciskajā zonā, kas Piesārņoto un potenciāli piesārņoto vietu reģistrā atrodams ar numuru 27004/2055 (LVĢMC, 2006).

1.2. Ventspils eksperimentālais laukums

Administratīvi pētījuma objekts atrodas Baltijas jūras piekrastes zonā (1.1. att.), Ventspils pilsētas industriālajā zonā, naftas produktu pārkraušanas ceļa teritorijā. Uzņēmums darbojas kopš pagājušā gadsimta 60. gadiem, tā

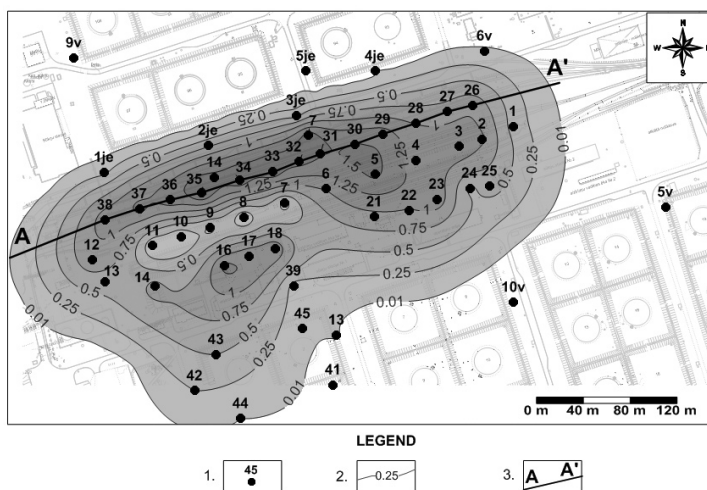
kopējā teritorijā ir 81 ha, un tajā ir izvietoti trīs rezervuāru parki, četras dzelzceļa estakādes naftas produktu noliešanai, sūkņu stacijas un citas tehnoloģiskās būves (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998). Lielāko daļu pārkraujamo produktu apjoma veido jēlnafta un dīzeļdegviela, tiek pārkrauts arī benzīns un reaktīvā degviela.

Pirmos pazemes ūdeņu pētījumus šajā teritorijā 1990.–1992. gadā uzsāka Latvijas Ģeoloģijas pārvalde (Levins, Krutofal, 1992), vēlāk – 1995. un 1996. gadā – tos turpināja SIA Balt-Ost-Geo. Šajā pētījumā tika veikta augsnes, grunts aerācijas zonas un gruntsūdeņu piesārņojuma inventarizācija (Kovaļenko, 1996). SIA Balt-Ost-Geo 1996. gadā uzsāka un 1997. gadā turpināja grunts un gruntsūdens piesārņojuma likvidēšanu pārkraušanas ceha estakādes rajonā. SIA “VentEko” 1997. gadā veica atkārtotu grunts un gruntsūdens piesārņojuma inventarizāciju visā naftas produktu pārkraušanas ceha teritorijā (Aleksāns, 1998).



1.1. attēls. Pētījumu objekta izvietojuma shēma

Eksperimentālā laukuma platība pētījumu teritorijā aizņem aptuveni 6 ha, un tā aptver trīs no četrām naftas produktu pārkraušanas dzelzceļa estakādēm, kuru ekspluatācijas rezultātā smilšaino nogulumu masīva virsējā daļā bija izveidojies ievērojams grunts un gruntsūdens piesārņojuma areāls (1.2. att.).



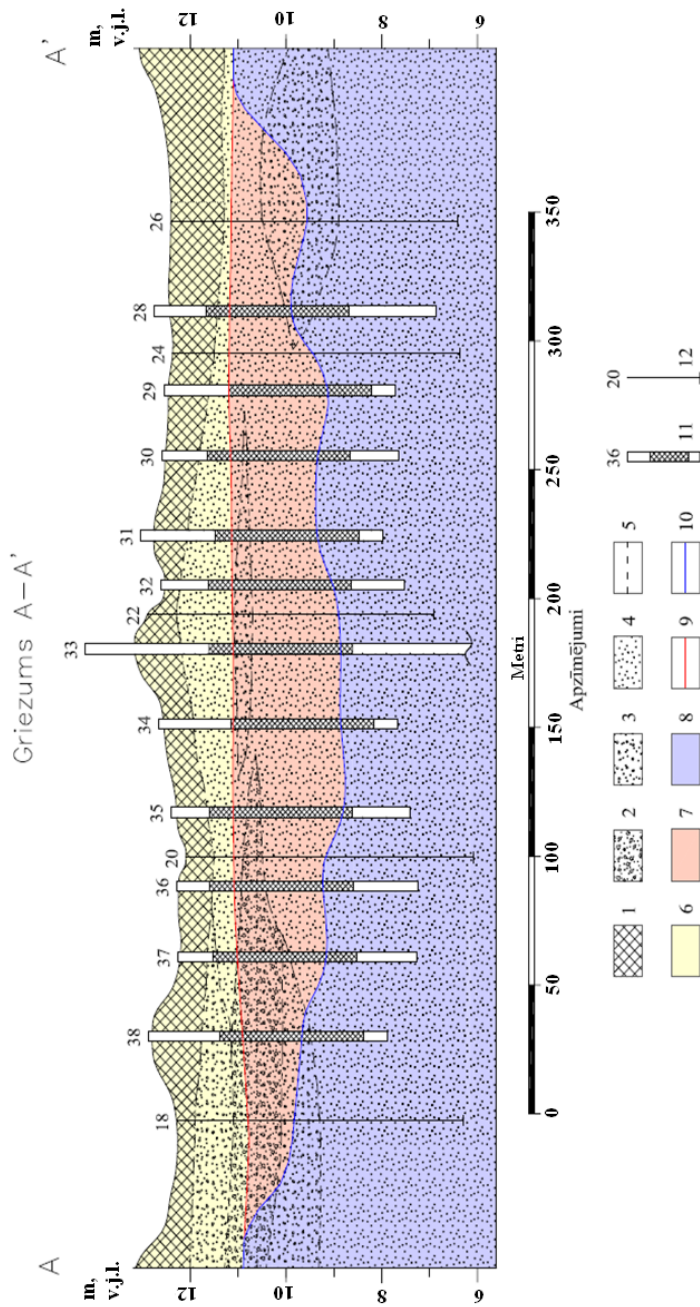
1.2. attēls. Brīvās fāzes šķidrums slāņa izplatības karte un urbumu izvietojums pētījumu objektā (Aleksāns, 1999)

APZĪMĒJUMI. 1 – urbums un tā numurs; 2 – brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma izolīnija metros; 3 – hidroģeoloģiskā griezumamā līnija.

Veiktie naftas produktu daudzuma aprēķini liecināja, ka intensīvi piesārņotas grunts apjoms ($>5000 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$) dzelzceļa estakādes rajonā 5,7 ha platībā sasniedz aptuveni $40\,000 \text{ m}^3$, bet virs gruntsūdens līmeņa līdz pat 3 m bieza peldoša brīvās fāzes slāņa veidā atrodas vismaz 3000 m^3 naftas produktu (Aleksāns, 1998; Aleksāns, 1999).

Ģeoloģiski brīvās fāzes šķidrums slāņa areāls eksperimentālajā laukumā izvietots plakanā līdzenumā bijušās Litorīnas lagūnas ziemeļu daļā. Kvartāra nogulumu segas apakšējā slāņkopa, kas tieši pārklāj devona iežus, sastāv no Latvijas un Kurzemes ledus laikmeta morēnas nogulumiem. Savukārt augšējās slāņkopas lielāko daļu veido māls ar aleirīta starpkārtām, ko zemes virspusē pārklāj dažādgraudaina smiltis. Kvartāra nogulumu kopējais biezums pētījumu objektā un tam piegulošajā teritorijā mainās no 20 līdz 60 metriem (Juškevičs et al., 1998; Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al., 1969). Pētījumu teritorijas hidroģeoloģiskais griezumamā skatāms 1.3. attēlā.

Devona ieži lielajā teritorijas daļā atrodas dziļāk par 15–20 m z.j.l. un ir pārstāvēti ar Narvas svītas iežiem. Tas ir līdz 100 m biezs, ūdeni vāji vai ļoti vāji caurlaidīgu iežu komplekss, kuru veido zaļganpelēks un pelēks māls, dolomītisks māls un dolomītmērgēlis ar mālaina dolomīta starpkārtām. Svītas apakšējā daļā sastopamas arī ģipša starpkārtas. Narvas svītas ieži atdala kvartāra nogulumus



I.3. attēls. Pētījumu objekta hidroģeoloģiskais griezumš

APZĪMĒJUMI. 1 – uzberums; 2 – grantaina smilts; 3 – vidēji rupja smilts; 4 – smalka smilts; 5 – litoloģiskā robeža; 6 – aerācijas (ūdens nepiesātinātā) zona; 7 – brīvās fāzes šķidrums slānis; 8 – gruntsūdens; 9 – brīvās fāzes šķidrums slāņa virsma; 10 – gruntsūdens un brīvās fāzes šķidrums slāņa saskares virsma; 11 – atsūkšanās urbums un tā numurs; 12 – izpētes urbums un tā numurs.

no dziļāk gulošajiem vidusdevona Pērnavas un apakšdevona Ķemeru svītas un Gargždu sērijas smilšakmeņiem.

Pētījumu teritorijas un tās apkārtnes hidroģeoloģiskie apstākļi ir cieši saistīti ar ģeoloģiskās uzbūves īpatnībām un nogulumu sastāva izmaiņām, daļēji tos ietekmē arī notiekošā saimnieciskā darbība. Pirmais pazemes ūdeņu horizonts ir saistīts ar zemes virspusē gulošajiem dažāda vecuma, ģenēzes un sastāva smilšainajiem nogulumiem. Gruntsūdens līmeņa dziļums pētījumu objektā caurmērā konstatēts no 1,2 m līdz 3,5 m no zemes virsas (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998; Ludāns, 2009), un tas ir atkarīgs no mūsdienās vērojamā reljefa rakstura un ūdeni saturošo nogulumu biezuma, kā arī no nokrišņu daudzuma un tā sadalījuma gada griezumā. Piekrastes kāpu joslā gruntsūdens līmenis var atrasties arī dziļāk – nereti 3–5 metrus no zemes virsas vai pat vairāk (Juškevičs, 1999; Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al., 1969).

Gruntsūdens plūsmai ir sarežģīts raksturs, kam par pamatu ir blīvais pazemes komunikāciju tīkls un teritorijas intensīvais industriālais noslogojums. Kopumā pētījumu teritorijā pazemes ūdeņu plūsma ir vērsta Baltijas jūras un Ventas upes virzienā. Daudz vājāka šī plūsma ir uz ziemeļaustrumiem, kur starppauguru ieplakā izvietojas Zemstila purvs (Ališauskas, 1997). Lielu ietekmi uz pazemes plūsmu atstāj arī drenāžas sistēmas darbība (Aleksāns, 2002).

Gruntsūdens horizonts ir labi apūdeņots un urbumu atsūkņēšanas debīts (ražība) atkarībā no filtra diametra, tā garuma un izvietojuma dziļuma svārstās no 0,03 līdz 0,67 $\ell \times s^{-1}$ (Aleksāns, 1998; Aleksāns, 2001; Spalviņš et al., 2009). Atkarībā no gruntsūdeni saturošo nogulumu granulometriskā sastāva, iežu filtrācijas koeficients mainās no 1,5 līdz 8,5 $m \times dnn^{-1}$ (Aleksāns, 2002).

2. Metodes un materiāli

2.1. Eksperimenta realizācijas procedūra

Eksperimenta realizācijas procedūrā izdalāmi trīs posmi:

- 1) pētījuma plānojums;
- 2) eksperimenta realizācija;
- 3) analītiskās darbības.

Kvalitatīvu un reprezentatīvu datu iegūšanai, kā arī dažādu blakus faktoru ietekmes mazināšanai uz eksperimenta gaitu pētījumu bija nepieciešams plānot tā, lai tiktu ievēroti vairāki svarīgi nosacījumi: ģeoloģiskie un hidroģeoloģiskie apstākļi, brīvās fāzes šķidrums slāņa klātbūtne gruntsūdens horizontā, tehniskās un tehnoloģiskās prasības, nepieciešamie instrumenti un aprīkojums, kā arī citi agrāk veikto eksperimentu aprakstu literatūrā uzskaitītie nosacījumi (Gruszczenski, 1987; Testa, Winegardner, 1991; Hughes et al., 1998; Beckett, Lyverse, 2002).

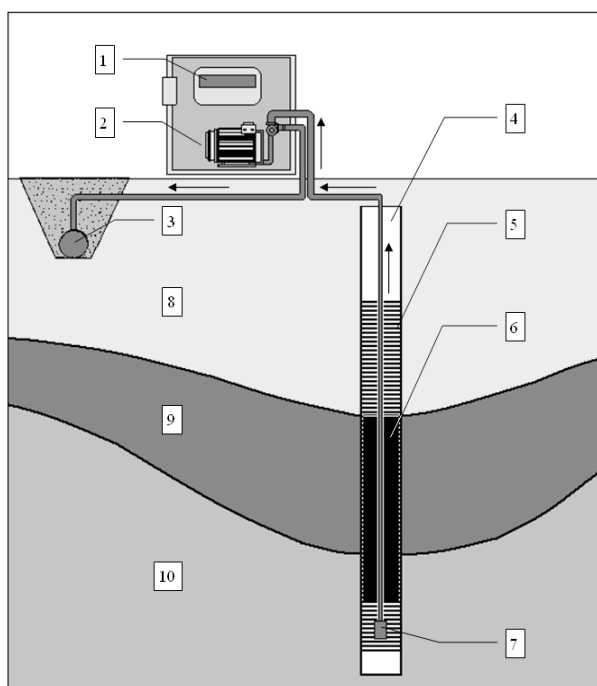
Atbilstoši eksperimenta prasībām pētījuma laukuma ietvaros tika pārbaudīti 46 novērošanas urbumi, no kuriem 31 tika atzīts par atbilstošu izvirzītajiem kritērijiem. Urbumu dziļums caurmērā sasniedza 5–6 metrus, filtra kolonnas diametrs izvēlētiem urbumiem bija atšķirīgs: 89, 108 vai 127 mm. Visi urbumi bija aprīkoti ar 2,5–3,0 metrus garu misiņa sieta filtru, kas izvietots 2–5 metru dziļumā no zemes virsmas (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998). Brīvās fāzes šķidrums (naftas produktu) slāņa biezums pārbaudītajos urbumos variēja robežās no 0,13 m līdz 2,70 m. Urbumi, kuros naftas produktu slānis bija mazāks par 0,10 m, eksperimentā netika iekļauti. Šķidrums atsūkņēšanai no urbuma tika izmantots virszemes centrālās sūkņa. Brīvās fāzes šķidrums atsūkņēšanai no urbuma tika izmantots virszemes centrālās sūkņa (skat. 2.1. att.) ar sūkņēšanas jaudu $0,3\text{--}0,5 \text{ l} \times \text{s}^{-1}$. Atsūkņēšanas sistēmas principiālā shēma vienam urbumam skatāma 2.1. attēlā.

Pētījuma eksperiments realizēts, veicot sanācijas darbus, kuru laikā tika veikta naftas produktu brīvās fāzes šķidrums atsūkņēšana no gruntsūdens horizonta. Urbumu sūkņēšanas ilgums atkarībā no brīvās fāzes šķidrums apjoma un ūdens pieplūdes intensitātes atšķirīgiem urbumiem svārstījās no dažām dienām līdz pat vienam mēnesim un ilgāk. Kopējais pētījuma periods bija četri mēneši, kuru laikā urbumos tika mērīti naftas produktu brīvās fāzes šķidrums slāņa parametri (Aleksāns, 2007).

Atsūkņēšanas posmā filtra intervālā parasti tika sasniegts tāds limeņa pazeminājums, kas nodrošināja pakāpenisku brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma samazināšanos un tā pilnīgu izzušanu urbumā (Gruszczenski, 1987; Hughes et al., 1998). Tajos gadījumos, kad brīvās fāzes šķidrums pieplūde

urbumā bija tik intensīva, ka nebija iespējams sasniegt peldošā slāņa pilnīgu izžušanu, atsūknēšanu turpināja, līdz urbumā mērāmās brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums stabilizējās.

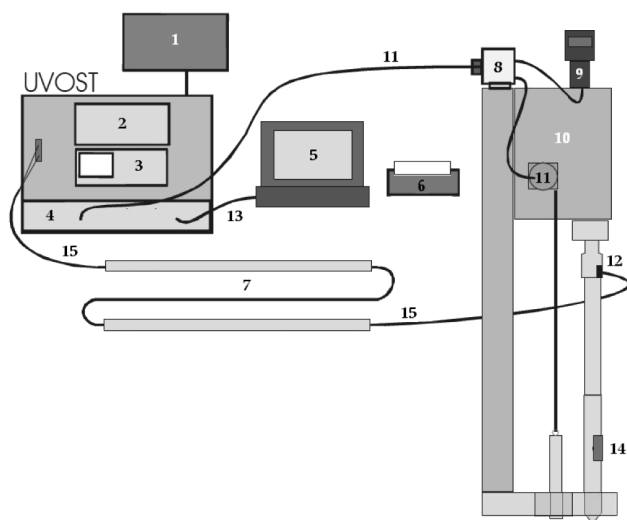
Līmeņu mērīšanai urbumos tika izmantots SOLINST divu šķidrumu, kas nesajaucas, saskares virsmas detektors (*interface probe*), kas nodrošina gan pašas brīvās fāzes šķidruma vai ūdens virsmas mērīšanu, gan arī šo šķidrumu saskares virsmas dziļuma noteikšanu urbumā ar precizitāti līdz 1 centimetram (SOLINST, 2009). Paralēli SOLINST detektora izmantošanai pētījumā tika paredzēts pārbaudīt arī oriģinālu, autora izstrādātu (Aleksāns, 2008) metodi brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma noteikšanai ar trīs miniatūriem DIVER tipa sensoriem.



2.1. attēls. Urbuma atsūknēšanas eksperimentālās sistēmas principiālā shēma

APZĪMĒJUMI. 1 – vadības panelis; 2 – virszemes centrālās sūkņa; 3 – rūpnieciskā kanalizācija; 4 – atsūknējamo urbums; 5 – urbuma filtrs; 6 – brīvās fāzes šķidruma slānis urbumā; 7 – pretvārsts; 8 – ūdens nepiesātinātā (aerācijas) zona; 9 – brīvās fāzes šķidruma slānis gruntsūdens horizontā; 10 – gruntsūdens.

Brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālā biezuma mērījumu verificēšanai uz vietas šajā pētījumā tika izmantota inovatīva lāzera izraisītās fluorescences (LIF) zondēšanas metode (Aleksāns, Dimitrijevs, 2009, 2011). Šī metode ļauj iegūt eksperimenta rezultātu verificēšanai nepieciešamos datus ar daudz augstāku precizitāti un ticamības pakāpi salīdzinājumā ar agrāk izmantotajiem paņēmieniem (Aleksāns, 2009). Iekārtas uzbūves un tās darbības principiālā shēma skatāma 2.2. attēlā.



2.2. attēls. Lāzera izraisītās fluorescences (LIF) zondēšanas iekārtas principiālā shēma

APZĪMĒJUMI. UVOST – ultravioletā starojuma reģistrēšanas iekārta; 1 – ģenerators; 2 – lāzers; 3 – osciloskops; 4 – e-panelis; 5 – personālais dators; 6 – printeris; 7 – zondēšanas stieņi; 8 – komunikators; 9 – pārnēsājamais displejs; 10 – statiskās zondēšanas iekārta; 11 – datu pārraides kabelis; 12 – sadales vāciņš; 13 – lokālā tīkla kabelis; 14 – lodziņš grunts apstarošanai ar lāzeru un emitētās gaismas saņemšanai; 15 – optiskais kabelis.

2.4. Pētījuma analītiskās metodes

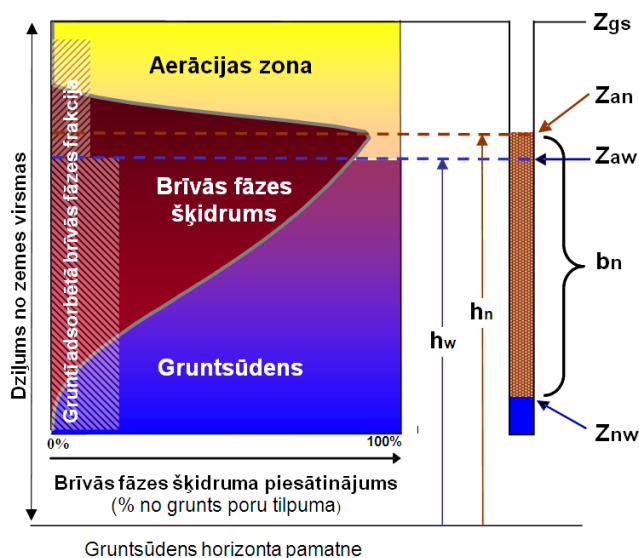
Iepriekš zināmu likumsakarību un teorētisku pieņēmumu salīdzināšanai ar autora realizēto oriģinālo lauka eksperimentu rezultātiem tika izmantotas vairākas metodes. No tām izdalāmas divas galvenās:

- 1) gruntsūdens horizontālā pastāvošā divfāzu šķidrums vertikālā sadalījuma galveno raksturlielumu noteikšana ar skaitliskās analīzes metodi;

- 2) gruntsūdens horizontā esošā brīvās fāzes šķidruma slāņa aktuālā biezuma noteikšana, izmantojot lauka eksperimentu vērojumu datus (empīriskā metode).

Pētījuma skaitliskais eksperiments tika balstīts uz gruntsūdens horizontā pastāvošās divfāzu šķidruma sistēmas fizikālo modeli, kas atspoguļots 2.3. attēlā. Šiem aprēķiniem kā viena no galvenajām tika izmantota Amerikas Naftas institūta mājaslapā pieejamā programma, kas balstās uz Van Genuhtena–Burdīna (*Van Genuchten–Burdine*) gruntsūdens horizontā pastāvošās divfāzu šķidruma sistēmas fizikālo modeli un kas ļauj analizēt naftas produktu piesārņojuma izplatību porainā vidē vienam vai diviem savstarpēji izolētiem pazemes ūdeņu horizontiem (Burdine, 1953; Genuchten, 1980).

Attēlā redzamais fizikālais modelis raksturo divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma apstākļus homogēnai, neierobežotai platībā un griezumā poraino nogulumu videi gruntsūdens horizontā un šo šķidrumu atbilstošu vertikālo sadalījumu novērošanas urbumā.



2.3. attēls. Gruntsūdens horizonta divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma fizikālais modelis

APZĪMĒJUMI. Z_{gs} – atskaites punkts (zemes virsma); Z_{an} – gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsma; Z_{aw} – hipotētiskais (piezometriskais) gruntsūdens līmenis; b_n – monitoringa urbumā novērojamais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums; Z_{nw} – brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsma; h_w – ūdens kāpuma augstums gruntsūdens horizontā; h_n – brīvās fāzes šķidruma kāpuma augstums gruntsūdens horizontā.

Divu šķidrumu, kas nesajaucas, vertikālā sadalījuma raksturu gruntsūdens horizonta porainajos nogulumos nosaka šiem nogulumiem piemītošās kapilārās īpašības un to porās esošā šķidruma izraisītais kapilārais spiediens, kuru var aprēķināt, izmantojot Van Genuhtena kapilārā spiediena modeli, un tas ir balstīts uz šādu algoritmu:

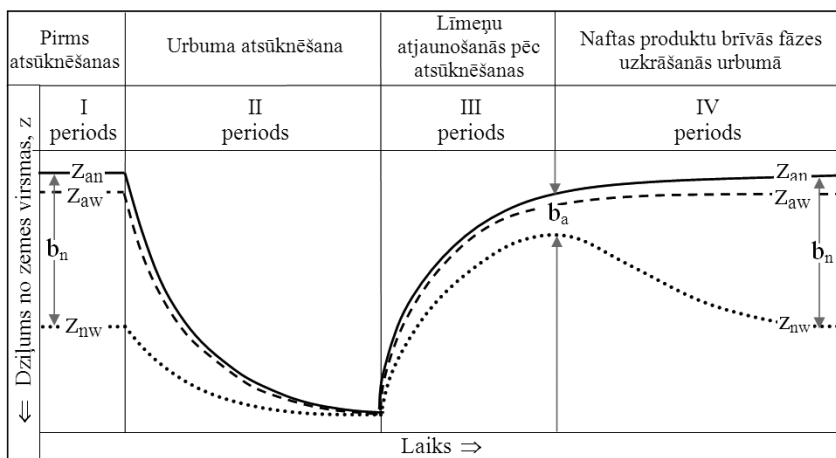
- 1) kapilārā pacēluma zonas augstuma aprēķināšana maksimālajam urbumā novērotajam brīvās fāzes šķidruma slānim (z_{\max});
- 2) brīvās fāzes šķidruma sākotnējā (maksimālā) vertikālā sadalījuma noteikšana gruntsūdens horizontā (S_{n_i});
- 3) brīvās fāzes šķidruma neatgriežamā (grunti aizturētā, adsorbētā) apjoma vertikālā sadalījuma noteikšana;
- 4) brīvās fāzes šķidruma un ūdens vertikālā sadalījuma aprēķināšana gruntsūdens horizontam pēc urbumā piemēritā brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma.

Skaitliskajiem aprēķiniem izmantotais fizikālais modelis atbilst tipiskam gruntsūdens piesārņojumam ar naftas produktiem smilšaino nogulumu horizontā (Mandeika, Vircavs, 2008) un tiem ģeoloģiskajiem un hidroģeoloģiskajiem apstākļiem, kādi reāli eksistē veikto lauka pētījumu objektā (Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al., 1969; Juškevičs, 1999)

Promocijas darba pētījuma empīriskās metodes piemērošanas pamatā ir urbumu atsūknēšanas eksperimentos novērotā ūdens līmeņa atjaunošanās parādība (fenomens) divfāzu šķidruma plūsmas apstākļos gruntsūdens horizontā (skat. 2.4. att.).

Saskaņā ar šiem novērojumiem pēc atsūknēšanas eksperimenta pārtraukšanas līmeņa atjaunošanās stadijā urbumā vienmērīgi paaugstinās gan brīvās fāzes augšējais līmenis, gan arī brīvās fāzes un ūdens saskares virsma. Tomēr pēc kāda noteikta laika brīvās fāzes un ūdens saskares virsma novērojumu urbumā sāk pakāpeniski pazemināties (iegrimt), bet brīvās fāzes šķidruma slāņa augšējais līmenis vairs nemainās vai pat nedaudz turpina celties. Šo procesu raksturo brīvās fāzes šķidruma un ūdens līmeņa izmaiņu gaita urbumā eksperimenta laikā, un to nosacīti var iedalīt četros laika posmos:

- 1) divfāzu šķidruma līmeņu stāvoklis urbumā pirms atsūknēšanas sākšanas;
- 2) līmeņu izmaiņu dinamika urbumā atsūknēšanas laikā;
- 3) līmeņu atjaunošanās dinamika urbumā pēc sūknēšanas pārtraukšanas līdz brīdim, kad brīvās fāzes un ūdens saskares virsma vairs nepaaugstinās;
- 4) līmeņu izmaiņu dinamika pēc tam, kad brīvās fāzes un ūdens saskares virsma urbumā sāk pakāpeniski pazemināties līdz pilnai abu līmeņu stabilizācijai urbumā.



Apzīmējumi

1. — Z_{an} — 2. - - Z_{aw} - - 3. Z_{nw}

2.4. attēls. Urbumā novērojamā brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma izmaiņu grafiks atsūknēšanas eksperimenta gaitā

APZĪMĒJUMI. 1 – gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsma; 2 – hipotētiskais (pjezometriskais) gruntsūdens līmenis; 3 – brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsma; b_a – aktuālais (faktiskais) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums nogulumu horizontā; b_n – monitoringa urbumā novērojamais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums.

Šis parādības (fenomena) pamatā ir divfāzu šķidruma spiediena spēku līdzsvara stāvoklis, kas veidojas gaisa, brīvās fāzes un ūdens mijiedarbības rezultātā (Lefebvre, 2006). Zinātniskajā literatūrā publicēto pētnieku darbi (Lefebvre, 2006; Aral, Liao, 2000; Gruszczenski, 1987; Aleksāns, Klimovičs, 2006), kā arī promocijas darba novērojumu rezultāti ļauj konstatēt, ka brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas izmaiņu grafika liknes augšējais lūzuma punkts līmeņu atjaunošanās periodā raksturo nosacījumus, pie kuriem brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums urbumā ir vienāds ar šī slāņa aktuālo biezumu gruntsūdens horizontā.

Saskaņā ar Gibena-Hercberga teoriju (Chidley, Lloyd, 1977) var konstatēt, ka $h_w = z_{nw}$, bet $h_n = z_{an} + z_{nw}$, kur $z_{an} = z_{an} - z_{aw}$ un $z_{nw} = z_{aw} - z_{nw}$, tas ir – divu šķidrumu, kas nesajaucas, saskares punktā brīvās fāzes šķidruma un ūdens spiedienu ir vienādi:

$$P_n = P_w \quad (2.1)$$

Zinot ūdens blīvumu (ρ_w) un brīvās fāzes šķidrums blīvumu (ρ_n), vienādojumu (2.2) var pārrakstīt šādi:

$$h_n \times \rho_n \times G = h_w \times \rho_w \times G, \quad (2.2)$$

kur:

G – gravitācijas konstante ($G = 6,67259 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2 \times \text{kg}^{-2}$);

ρ_n – brīvās fāzes šķidrums blīvums;

ρ_w – ūdens blīvums gruntsūdens horizontātā;

visi pārējie apzīmējumi – iepriekšējie.

Brīvās fāzes šķidrums slāņa pacēluma augstumu no tā saskares virsmas ar ūdeni (h_n) jeb urbumā vērojamo šī slāņa biezumu (h_n) var izteikt ar vienādojumu:

$$(\Delta z_{an} + h_w) \times \rho_n = h_w \times \rho_w \quad (2.3)$$

Pārveidojot izteiksmi (2.3), iegūstam sakarību, kas pēc savas izteiksmes formas pilnībā atbilst Gībena–Hercberga vienādojumam (Chidley, Lloyd, 1977).

$$\Delta z_{an} \times \rho_n = (\rho_w - \rho_n) \times h_w = (\rho_w - \rho_n) \times \Delta z_{nw} \quad (2.4)$$

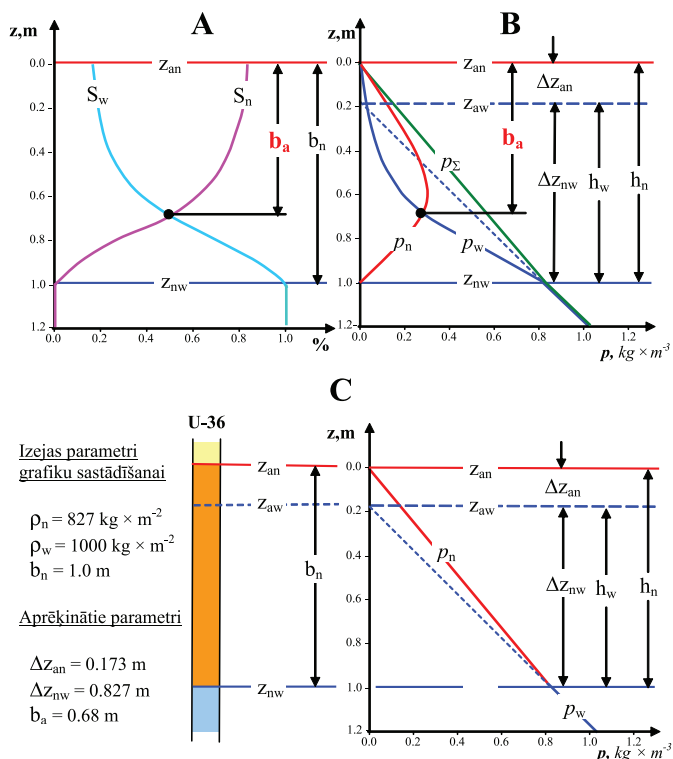
$$\Delta z_{nw} = \Delta z_{an} \times \frac{\rho_n}{(\rho_w - \rho_n)} \quad (2.5)$$

No sacītā izriet, ka brīvās fāzes šķidrums slāņa augstums urbumā ir vienāds ar $h_n = h_w + \Delta z_{an}$, bet tajā pašā laikā tas ir vienāds arī ar $h_n = \Delta z_{nw} + \Delta z_{an}$, kas ļauj vienādojumu pierakstīt šādi (Lefebvre, 2006):

$$h_n = \Delta z_{an} \times \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_w - \rho_n} \right) \quad (2.6)$$

$$h_n = \Delta z_{an} \times \frac{\rho_n}{\rho_w - \rho_n} \quad (2.7)$$

Tādējādi vienādojums (2.7) ir izmantojams divfāzu šķidrums sistēmas līmeņu augstuma aprēķināšanai novērošanas urbumā. Tomēr, kā norāda iepriekš veiktie pētījumi (Lefebvre, 2006), tas nav piemērojams šo līmeņu noteikšanai ģeoloģisko nogulumu horizontātā, kur kapilāro spēku ietekmē veidojas pilnīgi atšķirīgs divu šķidrums, kas nesajaucas, vertikālais sadalījums, un tas labi redzams 2.5. attēlā.



2.5. attēls. Divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma galveno parametru salīdzinājums gruntsūdens horizonta nogulumu slānim (A, B grafiki) un novērošanas urbumam (C grafiks)

APZĪMĒJUMI. 1 – urbuma filtra intervāls; 2 – ūdens nepiesātinātā (aerācijas) zona; 3 – brīvās fāzes šķidruma slānis un tā līmenis urbumā; 4 – gruntsūdens līmenis urbumā (ar punktēto līniju – hipotētiskais); U-1 un U-2 – attiecīgi pirmais un otrais urbums; h_w – ūdens kāpuma (spiediena) augstums virs tā saskares virsmas ar brīvās fāzes šķidrumu; h_n – brīvās fāzes šķidruma kāpuma (spiediena) augstums no tā saskares virsmas ar gruntsūdeni (arī – brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums: $h_n = b_n$); Δz_{an} – brīvās fāzes šķidruma augstums virs gruntsūdens hipotētiskā līmeņa ($\Delta z_{an} = h_n - h_w$); Δz_{nw} – gruntsūdens hipotētiskā līmeņa augstums virs tā saskares virsmas ar brīvās fāzes šķidrumu ($\Delta z_{nw} = h_w$); z_{an} – gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsma; z_{aw} – hipotētiskais (pjezometriskais) gruntsūdens līmenis; z_{nw} – brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsma; p_a – atmosfēras spiediens; p_w – ūdens spiediens; p_n – brīvās fāzes šķidruma spiediens; p_Σ – summārais spiediens; S_w , S_n – ūdens un brīvās fāzes šķidruma, attiecīgi, vertikālais piesātinājuma sadalījums gruntsūdens horizonta apūdeņotajai zonai (z) līmenī; A – brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares punkts.

Divu šķidrumu, kas nesajaucas, vertikālo sadalījumu gruntsūdens horizonta nogulumos galvenokārt ietekmē ūdens un brīvās fāzes šķidrums piesātinājuma pakāpes procentuālā attiecība, kuru nosaka ar skaitlisko metodi. No 2.3. attēla redzams, ka divfāzu šķidrums slāņa augšējā daļā līdz pat 80% dominē brīvās fāzes šķidrums, bet līdz ar dziļumu tā saturs samazinās līdz nullei. Savukārt ūdens piesātinājums vislielākais ir šī slāņa apakšā, bet virzienā uz augšu ūdens saturs samazinās. Atzīmējams, ka ūdens piesātinājums pat divfāzu šķidrums slāņa augšējā daļā nekad nav vienāds ar nulli, kur tā lielāku vai mazāku klātbūtni vienmēr nodrošina ūdens kapilārās zonas iespiešanās brīvās fāzes šķidrums slāni (Lefebvre, 2006).

Atkarībā no ūdens un brīvās fāzes šķidrums piesātinājuma pakāpes procentuālās attiecības izmaiņām vertikālā virzienā mainās arī ūdens (p_w) un brīvās fāzes šķidrums (p_n) spiediens gruntsūdens horizontā. No 2.5. attēla (B) grafika redzams, ka spiediena izmaiņu liknēm ir sarežģīts raksturs – slāņa augšējā daļā dominē brīvās fāzes šķidrums spiediens, bet apakšā – ūdens spiediens. Tomēr, neskatoties uz šo likņu sarežģīto raksturu, to summārais spiediens p_Σ ($p_\Sigma = p_n + p_w$) gruntsūdens horizontā (2.5. att. (B) grafiks) ir ekvivalents p_n un p_w spiedienam novērošanas urbumā (2.5. att. (C) grafiks), kas faktiski arī pierāda to, ka visa divfāzu šķidrums sistēma – gan urbumā, gan arī horizontā – atrodas līdzsvarā (Lefebvre, 2006).

3. Datu statistiskā apstrāde

Veiktā pētījuma datu statistiskās apstrādes galvenie uzdevumi bija pārbaudīt atsūknēšanas eksperimenta gaitā empīriski iegūtā (pētāmā) lieluma vērtību kopas patiesumu un salīdzināt to ar skaitlisko (modelēto) aprēķinu ceļā teorētiski noteikto (zināmo) datu kopu, kā arī noteikt regresijas funkcijas veidu, t.i., atkarības matemātisko formu starp atsūknēšanas eksperimentā empīriski iegūtajām un urbumā nomēritajām pētāmā parametra lieluma vērtībām, kas turpmāk ļautu prognozēt viena gadījuma lieluma vērtības saistībā ar konkrētām otra gadījuma lieluma vērtībām (Aleksāns, 2009).

Datu statistiskai apstrādei tika izvēlēts šāds algoritms:

- 1) pētījuma hipotēzes izvirzīšana;
- 2) nozīmības līmeņa (α) pieņemšana;
- 3) datu korelācijas analīze;
- 4) regresijas vienādojuma izvēle;
- 5) lineārās regresijas koeficientu noteikšana;
- 6) regresijas būtiskuma analīze izvirzītās hipotēzes pārbaudei.

Lai pārbaudītu pētījumā iegūto datu ticamību un to izmantošanas iespēju, tika izvirzītas divas nulles hipotēzes.

Pirmā nulles hipotēze H_{0_1} . Starp urbumā noteiktajiem (nomēritajiem) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtību gadījuma lielumiem X_i un skaitliski noteiktajiem (modelētajiem) Y_i eksistē sakarība – pieaugot neatkarīgā mainīgā lieluma X_i vērtībām, lineāri pieaug atkarīgā mainīgā lieluma Y_i vidējās vērtības, un šīs sakarības regresijas liknei ir lineāra funkcija:

$$Y_i = b_{0_1} + b_{1_1} X_i, \quad (3.1)$$

kur:

- X_i – urbumā nomēritā parametra vērtība;
- Y_i – skaitliski aprēķinātā (modelētā) parametra vērtība;
- b_{0_1} – pirmās hipotēzes regresijas liknes brīvais loceklis;
- b_{1_1} – pirmās hipotēzes regresijas koeficients.

Pirmo nulles hipotēzi H_{0_1} apraksta izteiksme:

$$H_{0_1} : b_{1_1} = 0, \quad (3.2)$$

Ja izvirzītā nulles hipotēze $H_{0_1} : b_{1_1} = 0$ ir spēkā, tad regresijas koeficients $b_{1_1} = 0$ un pazīmju variēšana ir pilnīgi neatkarīga. Tas nozīmē, ka starp regresoru un regesentu nav būtiskas korelācijas un lineārās atkarības. Savukārt, ja izvirzītā

nulles hipotēze $H_{0_1} : b_{1_1} \neq 0$ nav spēkā, tad regresijas koeficients $b_{1_1} \neq 0$ un pazīmju variēšana ir atkarīga, un tas nozīmē, ka starp regresoru un regresentu ir korelācijas un lineārās atkarības.

Otrā nulles hipotēze H_{0_2} . Starp brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālā biežuma gadījuma lielumiem X_2 un atsūknēšanas eksperimentā empīriski noteiktajiem brīvās fāzes šķidrums slāņa biežuma gadījuma lielumiem Y_2 , kas noteikti ar divām atšķirīgām metodēm (skaitlisko un empīrisko), eksistē sakarība – pieaugot neatkarīgā mainīgā lieluma X_2 vērtībām, lineāri pieaug atkarīgā mainīgā lieluma Y_2 vidējās vērtības, un šīs sakarības regresijas liknei ir lineāra funkcija:

$$Y_2 = b_{0_2} + b_{1_2}X_2, \quad (3.3)$$

kur:

X_2 – skaitliski aprēķinātā parametra vērtība;

Y_2 – empīriski noteiktā (eksperimentā) parametra vērtība;

b_{0_2} – otrās hipotēzes regresijas liknes brīvais loceklis;

b_{1_2} – otrās hipotēzes regresijas koeficients.

Otro nulles hipotēzi H_{0_2} apraksta izteiksme:

$$H_{0_2} : b_{1_2} = 0 \quad (3.4)$$

Ja izvirzītā nulles hipotēze $H_{0_2} : b_{1_2} = 0$ ir spēkā, tad regresijas koeficients $b_{1_2} = 0$ un pazīmju variēšana ir pilnīgi neatkarīga, un tas nozīmē, ka starp regresoru un regresentu nav būtiskas korelācijas un lineārās atkarības. Savukārt, ja izvirzītā nulles hipotēze $H_{0_2} : b_{1_2} \neq 0$ nav spēkā, tad regresijas koeficients $b_{1_2} \neq 0$ un pazīmju variēšana ir atkarīga, un tas nozīmē, ka starp regresoru un regresentu ir korelācijas un lineārās atkarības.

Statistiski apstrādājot un analizējot datus, pētījumā izdarītajiem secinājumiem vienmēr piemīt varbūtības raksturs (Geske, 2001). Eksperimenta rezultāts nav pretrunā ar izvirzīto hipotēzi, un novērotajām novirzēm ir gadījuma raksturs, ja veikto mērījumu kļūdas varbūtība nepārsniedz nozīmības (būtiskuma) līmeni α (Carkova, 1979). Svarīgi, ka nozīmības līmeni α neizvēlas no statistikas apsvērumiem, bet gan vadoties no pētījumu uzdevumiem (Geske, 2001).

Parasti praksē nozīmības līmeni pieņem vienādu ar vienu no skaitļiem – 0,05; 0,01; 0,001, kas ir visu atzīti, un tāpēc ir sastādītas atbilstošas statistiskas tabulas (Carkova, 1979), kuras norāda vispārēju likumsakarību: jo nozīmības līmenis lielāks, jo pētījumu precizitāte ir zemāka. Uz fiziskiem mērījumu rezultātiem balstītos (analītiskos) pētījumos visbiežāk lieto nozīmības līmeni $\alpha = 0,05$, kas atbilst varbūtībai 95% (Geske, 2001). Šajā gadījumā, noraidot nulles hipotēzi, pastāv 5% varbūtība, ka hipotēze noraidīta nepamatoti.

Korelācijas analīze tika veikta trijām savstarpēji saistītām un ar dažādām metodēm iegūtām brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma skaitliskajām vērtībām:

- 1) skaitliski aprēķinātajām (modelētajām);
- 2) empīriski noteiktajām (eksperimentālajām);
- 3) urbumā novērotajām (nomērītajām).

Veiktās korelācijas analīzes mērķis bija noteikt sakarību ciešumu starp faktoriālajām un rezultatīvajām virsgruntsūdens peldošā brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtībām. Lai vizuāli noteiktu sakarības veidu un ciešumu starp faktoriālajām un rezultatīvajām brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtībām, tika izmantota korelācijas jeb izkliedes diagrammas. Iegūto punktu izklīde ap iedomāto sakarības likni raksturo korelācijas ciešumu (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004), bet iedomātās līknes forma – regresijas sakarības veidu.

Korelācijas koeficienta interpretācija ir korekta tikai tad, ja pārbaudāmās paraugkopas atbilst normālajam sadalījumam. Pieņemot iespēju, ka veikta pētījuma eksperimentos kāda no mērījumu grupām varētu neatbilst normālajam sadalījumam vai arī tā satur kļūdaini noteiktas vērtības, papildus korelācijas analīzei tika veikta arī regresijas analīze, ko šādos gadījumos uzstājīgi rekomendē pastāvošā datu statistiskās apstrādes prakse (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004).

Lai pārbaudītu, vai pāru regresija ir lineāra, tika salīdzināts determinācijas koeficients R ar korelācijas koeficientu r , kuru kvadrātiem lineārās regresijas gadījumā ir jāsakrīt: $R^2 = r^2$ (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004). Papildus lineārai regresijai tika pārbaudīta arī citu zināmo pāru regresiju pastāvēšanas iespējamība.

Pamatojoties uz empīriskās regresijas diagrammu, kā arī uz determinācijas un korelācijas koeficientu kvadrātu analīzes rezultātu, tika noteikts, ka ar atšķirīgām mērījumu metodēm noteiktā brīvās fāzes šķidruma slāņa aktuālā biezuma gadījuma lielumiem eksistē lineāra sakarība – pieaugot neatkarīgo mainīgo lielumu X_i (regresoru) vērtībām, lineāri pieaug arī atkarīgā mainīgā lieluma Y (regresenta) vidējās vērtības, un regresijas liknei ir lineāra funkcija:

$$Y = b_0 + b_1X, \quad (3.5)$$

kur:

X – nomērītā urbumā (1. hipotēzei) vai analītiski aprēķinātā (2. hipotēzei) parametra vērtība;

Y – eksperimentā noteiktā (empīriskā) parametra vērtība;

b_0 – regresijas līknes brīvais loceklis, kas raksturo ordinātu ass nogriežņa lielumu no koordinātu sistēmas sākuma līdz punktam, kurā regresijas taisne krusto ordinātu asi (Carkova, 1979; Krumbein, Graybill, 1965);

b_1 – regresijas koeficients jeb šīs taisnes virziena koeficients, t.i., tā leņķa tangenss, ko regresijas taisne veido ar x asi (Carkova, 1979).

Lineārās regresijas koeficientus b_0 (brīvais loceklis) un b_1 (regresijas koeficients) aprēķina pēc formulām (3.6) un (3.7):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \cdot \bar{y} \cdot n}{(n-1) \cdot s_x^2} \quad (3.6)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}, \quad (3.7)$$

kur:

s_x – regresora (x paraugkopas) standartnovirze;

visi pārējie apzīmējumi – iepriekšējie.

Datu statistiskās apstrādes noslēgumā tika veikta regresijas būtiskuma pārbaude pēc Stjudenta kritērija, kuru lineārai atkarībai nosaka koeficienta b_1 reprezentācijas radītājs s_{b_1} . Ja koeficients $b_1 = 0$, tad pazīmju variēšana ir pilnīgi neatkarīga, starp regresoru un regresentu nav būtiskas korelācijas un lineārās atkarības. Šajā gadījumā regresijas taisne ir paralēla abscisu asij un regresija nav būtiska.

Nulles hipotēzi $H_0 : b_1 = 0$, kad b_1 koeficients būtiski neatšķiras no nulles, pārbauda ar Stjudenta kritēriju pēc sakarības (3.8).

$$|t| = \frac{b_1}{s_{b_1}} \quad (3.8)$$

Nulles hipotēze $H_0 : b_1 = 0$ ir spēkā un regresija nav būtiska, ja $t < t_{\alpha, v}$. $t_{\alpha, v}$ – Stjudenta kritērija teorētiskā vērtība, bet $v = n - k$, kur k – regresijas vienādojuma koeficientu skaits, α – būtiskuma limenis.

4. Rezultāti

4.1. Skaitliski noteiktais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums

Pētījuma skaitliskais eksperiments tika balstīts uz Amerikas Naftas institūtā izstrādāto Van Genuhtena–Burdīna (API-No. 4729, 2003; API-No. 4760, 2007) fizikālo modeli divfāzu šķidruma sistēmai gruntsūdens horizontā (skat. 2.3. att.). Pētījumā, kas tika veikts, izmantojot šo modeli, veikto aprēķinu rezultātā 30 eksperimentā izmantotajos urbumos tika skaitliski noteikts (modelēts) brīvās fāzes šķidruma aktuālais biezums gan pirms atsūkņēšanas uzsākšanas, gan arī pēc tās pabeigšanas, kad urbumā pilnībā atjaunojās brīvās fāzes šķidruma un gruntsūdens līmenis. Ar modelēšanas (skaitlisko) metodi iegūtās un urbumā nomērītās brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtības apkopotas 4.1. tabulā.

4.1. tabula

Urbumos nomērītās un skaitliski aprēķinātās (modelētās) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtības

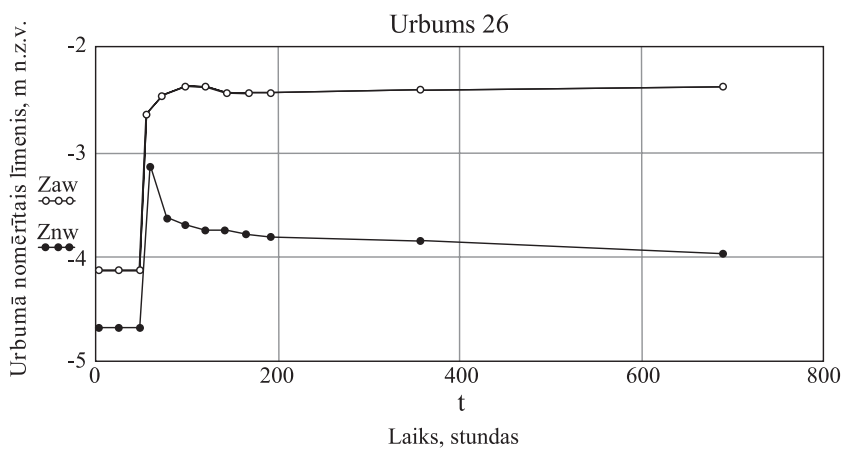
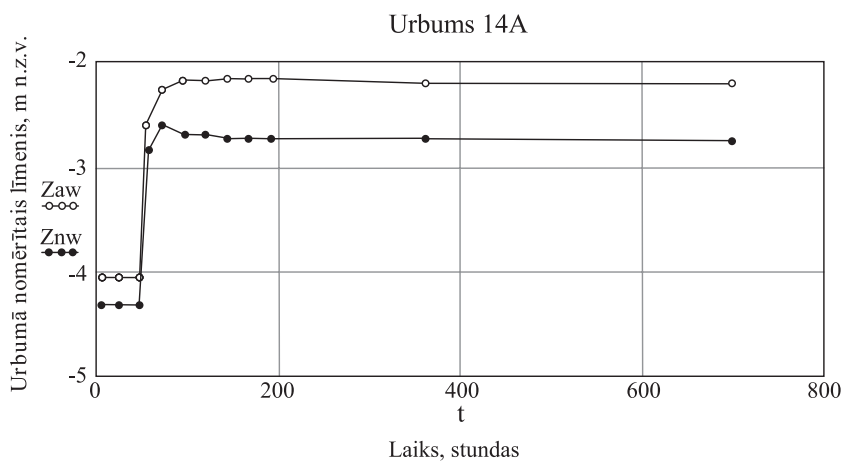
Nr. p.k.	Urbuma Nr.	Brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums, m			
		Nomērītais urbumā – b_n		Skaitliski noteiktais – b_a	
		Pirms atsūkņēšanas	Pēc atsūkņēšanas	Pirms atsūkņēšanas	Pēc atsūkņēšanas
1	7A	0,98	1,23	0,678	0,896
2	12	0,48	0,58	0,257	0,338
3	14	1,18	0,58	0,852	0,338
4	14A	2,12	1,40	1,683	1,045
5	15	1,23	1,11	0,896	0,791
6	16	1,29	1,30	0,949	0,957
7	17	1,74	1,20	1,346	0,87
8	21	1,78	1,30	1,381	0,957
9	22	1,24	1,12	0,905	0,799
10	23	1,06	0,68	0,747	0,421
11	24	0,57	0,29	0,330	0,117
12	25	0,94	0,63	0,643	0,379
13	26	1,38	1,00	1,028	0,695
14	27	1,44	1,19	1,081	0,861
15	28	1,57	1,56	1,195	1,187
16	29	1,73	1,58	1,337	1,204
17	30	1,86	1,66	1,452	1,275
18	31	2,02	1,46	1,594	1,098

Nr. p.k.	Urbuma Nr.	Brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums, m			
		Nomērītais urbumā – b_n		Skaitliski noteiktais – b_a	
		Pirms atsūkšanās	Pēc atsūkšanās	Pirms atsūkšanās	Pēc atsūkšanās
19	32	2,38	1,68	1,914	1,293
20	33	2,43	1,73	1,959	1,337
21	34	2,42	1,59	1,950	1,213
22	35	2,38	1,59	1,914	1,213
23	36	1,97	1,06	1,550	0,747
24	37	1,68	0,79	1,293	0,514
25	38	1,18	0,61	0,852	0,363
26	40	1,17	0,03	0,843	0,007
27	41	0,43	0,15	0,218	0,039
28	42	0,45	0,50	0,234	0,273
29	43	0,49	0,25	0,265	0,091
30	44	0,01	0,05	0,004	0,011

4.2. Empīriski noteiktais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums

Pamatojoties uz atsūkšanās gaitā iegūtajiem datiem, katram no 30 pētāmajiem urbumiem tika sastādīts līmeņa atjaunošanās grafiks (skat. grafiku piemērus 4.1. att.).

Analizējot iegūtos grafikus saskaņā ar jau aprakstīto un zinātniskajā literatūrā publicēto empīrisko metodi (Aleksāns, Klimovičs, 2006; Lefebvre, 2006; Gruszczenski, 1987), visiem 30 pētītajiem urbumiem tika novērtēts brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālais biezums. Iegūto datu precizēšanai papildus minētajam novērtējumam 28 urbumiem (no 30 pētītajiem) brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālais biezums vēl tika arī koriģēts. Korekcija bija nepieciešama tāpēc, ka urbumā fiksētais brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmas līmeņa izmaiņu augšējais lūzuma punkts grafikā var teorētiski būt novirzīts pa laika asi un atrasties starp diviem mērījumiem. Tāpēc faktiskais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums vairumā gadījumu nedaudz atšķiras no tā, kas noteikts pēc grafika. Autora lietotā korekcija iespējamajai saskares virsmas līmeņa lūzuma punkta novirzei laika grafikā šo neprecizitāti novērš.



4.1. attēls. Urbumos Nr. 14A un Nr. 26 novērotās brīvās fāzes šķidrums slāņa un gruntsūdens līmeņa atjaunošanās piemēri

Empīriski noteiktās un koriģētās brīvās fāzes šķidruma vērtības apkopotas 4.2. tabulā.

4.2. tabula

Empīriski noteiktās brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtības

Nr. p.k.	Urbuma Nr.	Bez novirzes korekcijas	Ar novirzes korekciju	Nr. p.k.	Urbuma Nr.	Bez novirzes korekcijas	Ar novirzes korekciju
1	7A	0,44	0,429	16	29	0,38	0,749
2	12	0,36	0,400	17	30	0,85	0,989
3	14	0,36	0,361	18	31	1,12	1,237
4	14A	0,29	0,484	19	32	0,40	0,872
5	15	0,66	0,651	20	33	1,50	1,525
6	16	0,90	n.n.	21	34	0,23	0,713
7	17	1,15	0,871	22	35	1,23	1,213
8	21	0,95	n.n.	23	36	0,72	0,741
9	22	1,16	1,130	24	37	0,44	0,579
10	23	0,46	0,237	25	38	0,19	0,114
11	24	0,09	0,119	26	40	0,01	0,007
12	25	0,38	0,343	27	41	0,12	0,101
13	26	0,81	0,598	28	42	0,05	0,057
14	27	0,66	0,859	29	43	0,15	0,167
15	28	1,12	1,049	30	44	0,01	0,009

* n.n. – novirzi nevarēja noteikt

4.3. Pētījuma datu matemātiskās analīzes rezultāti

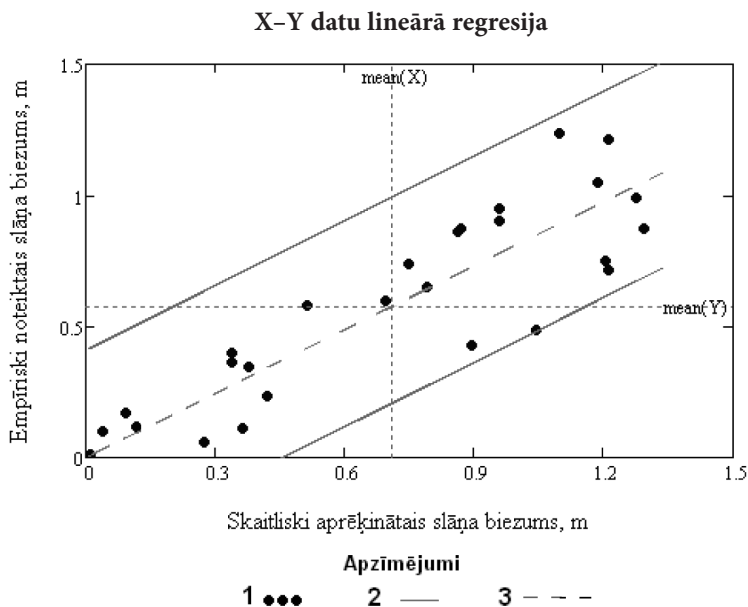
Sākumā tika pārbaudīta izvirzītā pirmā nulles hipotēze H_{01} – starp urbumā noteiktajiem (nomērītajiem) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtību gadījuma lielumiem X_1 un skaitliski noteiktajiem (modelētajiem) Y_1 eksistē sakarība. Pēc tam veikti statistiskie aprēķini, lai pārbaudītu otro izvirzīto nulles hipotēzi H_{02} – starp skaitliski aprēķinātajiem (modelētajiem) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtību gadījuma lielumiem un empīriski noteiktajiem (eksperimentā noteiktajām vērtībām) eksistē sakarība.

Pētījuma dati tika analizēti, izmantojot regresijas būtiskuma pārbaudi pēc Stjūdenta kritērija. Pārbaudes gaitā tika noteikts lineārās sakarības vienādojuma koeficienta b_1 reprezentācijas rādītājs, kurš raksturo regresijas līnijas stāvokli ģenerālkopā. Pamatojoties uz reprezentācijas koeficientu, tika veikta regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude.

Veikto aprēķinu ceļā tika noteikts, ka pirmā nulles hipotēze $H_{0_1} : b_1 = 0$ ir noraidīta. No tā izriet, ka regresijas koeficients ir būtisks, kas savukārt nozīmē, ka starp urbumā noteiktajiem (nomērītajiem) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtību gadījuma lielumiem X_1 un skaitliski noteiktajām (modelētajām) Y_1 vērtībām eksistē likumsakarība un noteiktais vienādojums ir reprezentabls.

Savukārt otrās nulles hipotēzes $H_{0_2} : b_1 = 0$ regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude pirms kritisko datu kopas vērtību atlasē uzrādīja, ka regresijas koeficients nav būtisks un otrā hipotēze ir spēkā. Tas savukārt nozīmē, ka noteiktais regresijas vienādojums nav reprezentabls un to šādā veidā nevar izmantot brīvās fāzes šķidruma aktuālā biezuma noteikšanai (prognozēšanai) gruntsūdens horizontā pēc urbumu atsūkņēšanas datiem.

Otrās nulles hipotēzes H_{0_2} skaitliski aprēķināto un empīriski noteikto brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtību lineārās regresijas taisne, kā arī ticamības intervāla robežas pie varbūtības 95% attēlotas 4.2. attēlā.



4.2. attēls. Skaitliski aprēķināto un empīriski noteikto
(pirms datu kopas kritisko vērtību atlasē)

brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtību lineārās regresijas taisne

APZĪMĒJUMI. 1 – X-Y vērtības; 2 – kreisā un labā kritisko vērtību robeža; 3 – trenda linija.

Lai panāktu otrās nulles hipotēzes $H_{0_2} : b_1 = 0$ regresijas koeficienta būtiskuma nosacījuma izpildi, no pētījuma gaitā iegūtās brīvās fāzes šķidrums slāņa biežuma mērījumu kopas tika izvērtētas un izņemtas tās kritiskās vērtības, kuras atradās ārpus regresijas ticamības intervāla vai tuvu tā robežām. Kopumā šādā veidā tika atsijāti 12 mērījumi, kuri dažādu iemeslu dēļ izrādījās nerepresentabli. Detalizēti visi iemesli, kāpēc šie dati tika noraidīti, ir aprakstīti sadaļā “Diskusija”.

Pēc kritisko vērtību izņemšanas no datu kopas un pēc atkārtota otrās izvirzītās nulles hipotēzes H_{0_2} statistisko parametru aprēķina tika iegūta jauna regresijas taisne. Uz tās pamata tika veikta atkārtota regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude.

No jauna iegūtie rezultāti parādīja, ka pēc datu kopas kritisko vērtību atlases otrās nulles hipotēze $H_{0_2} : b_1 = 0$ ir noraidīta. No tā izriet, ka tagad regresijas koeficients ir būtisks, bet noteiktais vienādojums ir reprezentabls un izmantojams pētījuma aprēķinos, kas arī bija jāpierāda.

Kopsavilkums par regresijas koeficienta būtiskuma pārbaudi pirmajai un otrajai nulles hipotēzei apkopots 4.3. tabulā.

4.3. tabula

Regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude

Izvirzītā hipotēze	Regresijas koeficienta b_1 reprezentācijas rādītājs, s_{b_1}	Stjudenta kritērija teorētiskā vērtība, $t_{\alpha, v}$	Stjudenta kritērijs, $ t $	Nulles hipotēzes $H_0 : b_1 = 0$ statuss nosacījumam $t, t_{\alpha, v}$
Pirmā nulles hipotēze H_{0_1}	0,006423	2,001717	19,68387	$t > t_{\alpha, v}$ Noraidīta
Otrā nulles hipotēze H_{0_2} (pirms datu kopas kritisko vērtību atlases)	0,083113	2,05183	0,176607	$t < t_{\alpha, v}$ Nav noraidīta
Otrā nulles hipotēze H_{0_2} (pēc datu kopas kritisko vērtību atlases)	0,08303	2,13145	2,239287	$t > t_{\alpha, v}$ Noraidīta

Balstoties uz šiem datiem, abām izvirzītajām hipotēzēm tika noteikts korelācijas koeficienta būtiskums, un aprēķinātais lielums tika salīdzināts ar kritisko vērtību, kas atkarībā no paraugkopas apjoma n un α noteikta pēc tabulas (Liepa I., 1974).

Korelācijas koeficienta kritisko vērtību salīdzināšanas rezultāti skatāmi 4.4. tabulā.

4.4. tabula

Korelācijas koeficienta būtiskuma pārbaude

Izvirzītā hipotēze	Mērījumu skaits, n	Būtiskuma līmenis, α	Aprēķinātais korelācijas koeficients, r	Korelācijas koeficienta kritiskā vērtība, $r_{\alpha,n}$
Pirmā nulles hipotēze H_{01}	60	0,05	0,998	0,253
Otrā nulles hipotēze H_{02} (pirms datu kopas kritisko vērtību atlasē)	29	0,05	0,889	0,367
Otrā nulles hipotēze H_{02} (pēc datu kopas kritisko vērtību atlasē)	17	0,05	0,839	0,482

Aprēķināto korelācijas koeficientu vērtību un tām atbilstošo sakarību ciešuma raksturojumam tika izmantoti tabulas dati (Arhipova, Bāliņa, 2000). Saskaņā ar šiem datiem visos jau aprakstītajos gadījumos aprēķinātās korelācijas koeficienta vērtības raksturojamas kā funkcionāli pozitīvas, kas vēlreiz apliecina to, ka pēc datu statistiskās apstrādes ir pierādīts, ka starp regresijas datu kopām eksistē cieša lineāra sakarība un iegūtos datus var izmantot turpmākajiem aprēķiniem.

Apkopojot visus iegūtos datus, atbilstoši pirmajai un otrajai izvirzītajai hipotēzei var uzrakstīt divus regresijas vienādojumus:

$$Y_1 = 0,0147 + 0,8231 X_1, \quad (4.1)$$

kur:

Y_1 – skaitliski aprēķinātais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums – b_a ;

X_1 – urbumā nomērītais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums – b_n ;

$$Y_2 = 0,2575 + 0,5358 X_2, \quad (4.2)$$

kur:

Y_2 – empīriski noteiktais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums – b_o ;

X_2 – skaitliski noteiktais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums – b_a .

Aizstājot Y_1 , X_1 , Y_2 un X_2 attiecīgi ar b_a , b_n , b_o un b_a , iegūstam:

$$b_a = 0,0147 + 0,8231 b_n \quad (4.3)$$

$$b_o = 0,2575 + 0,5358 b_a \quad (4.4)$$

Saskaņā ar izvairīto pētījuma hipotēzi pētījuma gaitā ir noteikts, ka starp modelētajām un urbumā nomērītajām brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtībām eksistē cieša ($r = 0,998$) korelācija un datu izkliede ap regresijas taisni ir minimāla. Iegūtie datu statistiskās apstrādes rezultāti ļauj pieņemt, ka skaitliski noteiktās (modelētās) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtības ir patiesas, un tāpēc tām var pielīdzināt citas šī parametra vērtības, kas iegūtas ar atšķirīgām metodēm, tajā skaitā arī empīriski.

Empīriski noteiktais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums atšķiras gan no urbumā nomērītā, gan arī no skaitliski noteiktā lieluma. Autora pētījuma gaitā pierādīts, ka starp empīriski noteiktajām un skaitliski aprēķinātajām (modelētajām) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtībām tāpat eksistē korelācija, un tas nozīmē, ka empīriski noteiktās vērtības ir iespējams pielīdzināt modelētajām. Lai to izdarītu, regresijas vienādojums (4.4) jāpārraksta šādi:

$$b_a = \frac{b_o - 0,2575}{0,5358} \quad (4.5)$$

Tādējādi iegūtais (4.5) vienādojums ļauj noteikt brīvās fāzes šķidruma aktuālo biezumu gruntsūdens horizontā empīriski, balstoties tikai uz urbumu atsūkņēšanas datu apstrādi. Tam nav nepieciešams veikt sarežģītus matemātiskos aprēķinus ar daudzu nezināmu parametru izmantošanu, uz kuriem šādi aprēķini ir balstīti saskaņā ar pastāvošo metodiku (API-No. 4729, 2003; API-No. 4760, 2007).

5. Diskusija

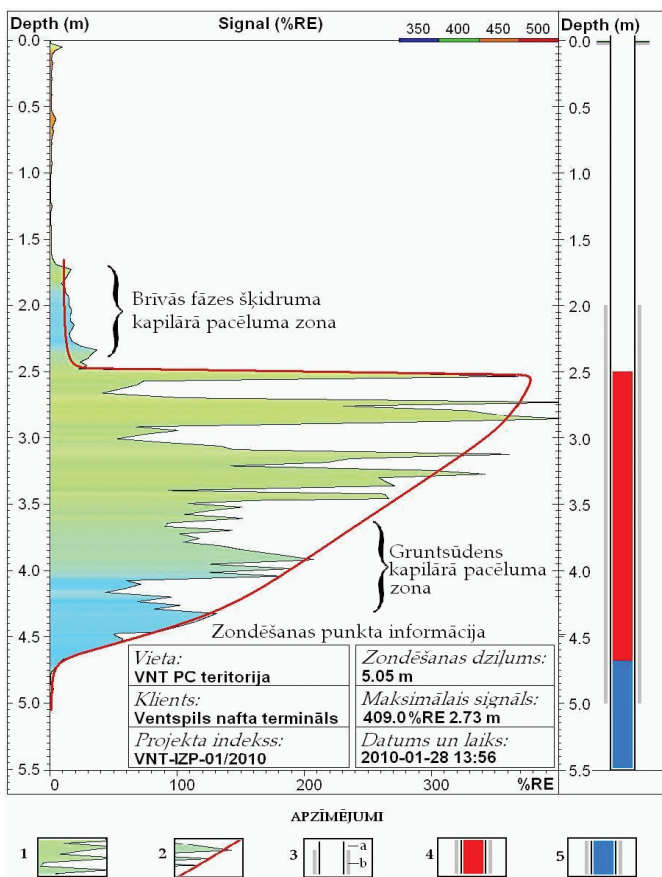
Gruntsūdens horizontā pastāvošā divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma koncepcija laika gaitā ir vairakkārt mainījusies, un līdz ar to ir mainījusies arī hidroģeoloģisko aprēķinu metodika. Vēl pagājušā gadsimta 50.–60. gados tā tika balstīta uz vispārpieņemtu (API-Publication, 2004), tomēr kļūdainu priekšstatu (API-Bulleten-No. 18, 2003), ka brīvās fāzes šķidruma slānis gruntsūdens horizontā veido no ūdens stingri nodalītu, virs tā peldošu lēcu, kuras ietvaros 100% poru tilpumu aizpilda brīvās fāzes šķidrums.

Sākot ar pagājušā gadsimta 70. gadiem (Lefebvre, 2006), turpmākie pētījumi (Brook, Corey, 1964; Genuchten, 1980) pierādīja, ka gruntsūdens horizontā pastāvošo kapilāro spēku ietekmē brīvās fāzes šķidruma slāņa iegulas intervālā veidojas sarežģīta daudzfāzu sistēma, kurā brīvās fāzes šķidruma piesātinājums grunts porās mainās no tā maksimālā procentuālā satura slāņa augšā līdz minimālām slāņa apakšā. Lauka pētījumi ir pierādījuši (API-Publication, 2004), ka šī daudzfāzu koncepcija ir piemērojama gan rupji graudainām, gan arī smalkām smiltīm. Tomēr smilts graudiņu izmēram šajā koncepcijā ir būtiska nozīme, jo atkarībā no tā, vai smilts ir rupjāka vai smalkāka, mainās arī starpība starp urbumā novēroto (šķietamo) un gruntsūdens horizonta piesātinātajā daļā reāli esošo (faktisko) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezumu (Abdul et al., 1989). Iežu heterogenitātes ietekmi uz divu šķidrumu, kas nesajaucas, vertikālo sadalījumu gruntsūdens horizontā labi ilustrē 5.1. attēls.

Galvenais faktors, kā rezultātā veidojas starpība starp urbumā novēroto (šķietamo) un gruntsūdens horizonta piesātinātajā daļā reāli esošo (faktisko) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezumu, ir kapilārie spēki horizontā, brīvās fāzes šķidruma blīvums un tā saistības pakāpe ar minerālo grunti (Blake, Hall, 1984). Jo smalkāka ir grunts un jo lielāki kapilārie spēki tajā darbojas, jo lielāka ir starpība starp urbumā novēroto un gruntsūdens horizonta piesātinātajā daļā reāli esošo brīvās fāzes šķidruma slāņa biezumu (Mercer, Cohen, 1990). Ņemot vērā to, ka urbumā kapilāro spēku praktiski nav, ūdens līmenis tajā vienmēr būs zemāks par gruntsūdens kapilārā pacēluma zonu. Rezultātā brīvās fāzes šķidrums no gruntsūdens kapilārā pacēluma ietekmes zonas, kur uz to caur porām iedarbojas ūdens spiediens no apakšas, pārvietosies uz urbumu, kur šāda kapilārā ūdens spiediena nav, un tāpēc tas aizpildīs šo urbuma telpu, sākot no zemākā līmeņa, kas atbilst gruntsūdens kapilārās zonas apakšai horizontā.

Tomēr aprakstītā koncepcija ir spēkā ierobežotam brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtību intervālam. Ir konstatēts, ja brīvās fāzes šķidruma slānis gruntsūdens horizontā palielinās un sasniedz kādu noteiktu biezumu (Lefebvre, 2006), šī slāņa masas spiediens sāk nomākt zem tā esošā ūdens kapilāro celšanos, un tāpēc starpība starp urbumā novēroto un horizontā esošo brīvās fāzes

šķidruma slāņa biezumu mazināsies (Aleksans, Gavena, 2008; Testa, Paczkowsk, 1989). Un otrādi – ja brīvās fāzes šķidruma slānis gruntsūdens horizontā samazinās, aizvien lielāka tā daļa tiek mehāniski saistīta ar grunti, un tāpēc šis šķidrums zaudē savu mobilitāti un urbumā vairs neuzkrājas. Šajā gadījumā urbumā novērotais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums ir mazāks par to, kādam tam šeit vajadzētu būt saskaņā ar pētījuma koncepciju.

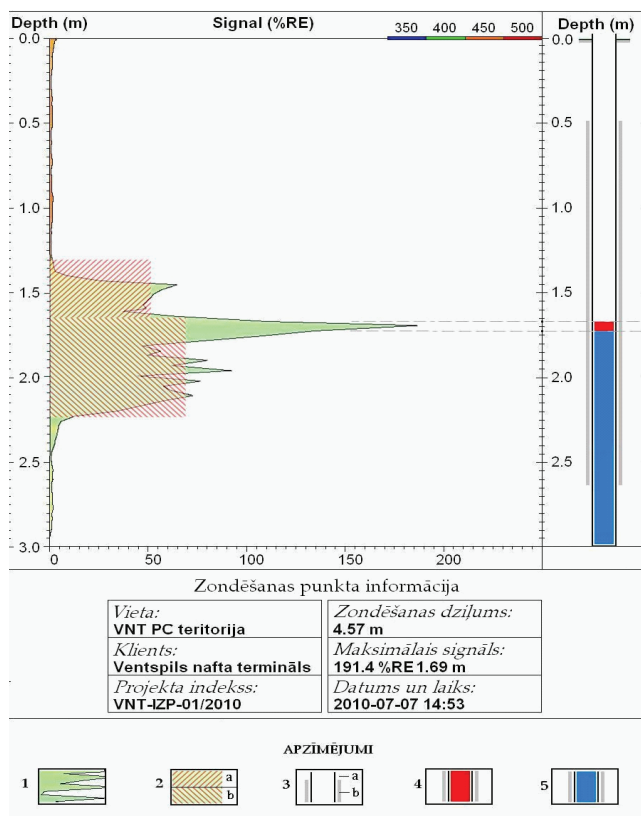


5.1. attēls. Divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma profils heterogēnai gruntsūdens horizonta smilšaino nogulumu videi

APZĪMĒJUMI. 1 – lāzera izraisītās fluorescences profils; 2 – modelētais (sarkanā linija) un ar LIF metodi noteiktais (zaļais tonējums) brīvās fāzes šķidruma piesātinājums grunti; 3 – urbums: a) apvalkcaurule, b) filtrs; 4 – brīvās fāzes šķidrums urbumā; 5 – ūdens urbumā.

Kā svarīgs papildu faktors mobilā šķidrums apjoma zudumiem tā adsorbēšanās ceļā ir jāmin arī tas apstāklis, ka visu šo procesu rezultātā būtiski mainās arī pašu iežu filtrācijas īpašības, kas vēl vairāk samazina brīvās fāzes šķidrums mobilitāti gruntī un līdz ar to – arī varbūtību, ka šāds slānis vispār veidosies (Burdine, 1953; API_No. 4711, 2001).

Ar Van Genuhtena–Burdīna modeli skaitliski noteikto neatgriežamā (adsorbētā) un mobilā brīvās fāzes šķidrums proporcionālo attiecību gruntsūdens horizontā netieši apstiprina arī lāzera izraisītās fluorescences zondēšanas rezultāti, ko labi ilustrē 5.2. attēls (Kalpišs, 2010).



5.2. attēls. Neatgriežamais un mobilais brīvās fāzes šķidrums piesātinājuma sadalījums 44. urbuma laukumam, noteikts lauka apstākļos ar LIF metodi

APZĪMĒJUMI. 1 – lāzera izraisītās fluorescences profils; 2 – neatgriezeniskais brīvās fāzes šķidrums piesātinājums: a) aerācijas zonā, b) piesātinātajā zonā; 3 – urbums: a) apvalkcaurule, b) filtrs; 4 – brīvās fāzes šķidrums urbumā; 5 – ūdens urbumā.

Visi minētie faktori ir ļoti būtiski pētījumā iegūto datu apstrādei un rezultātu interpretācijai. It sevišķi tas attiecas uz gadījumu, kad brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums ir tik liels, ka tā saskares vietā ar gruntsūdeni rodas spiediens, kas neļauj ūdenim pa kapilāriem pārvietoties uz augšu un iespieties brīvās fāzes šķidrums piesātinājuma zonā. Tas nozīmē, ka brīvās fāzes šķidrums slāņa biezumam pārsniedzot kaut kādu noteiktu lielumu, tā faktiskā vērtība gruntsūdens horizontā pakāpeniski tuvinās šī slāņa novērotajai biezuma vērtībai urbumā (Testa, Paczkowski, 1989). Šo faktu arī apstiprina veiktā pētījuma datu statistiskās apstrādes rezultāti.

Sākotnēji datu statistiskās apstrādes rezultātā noraidīto empīrisko brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību raksturs rāda, ka šo vērtību grafikā ir izdalāmi divi apgabali – pa kreisi (A) un pa labi vērstais (B) apgabals (skat. 5.3. att.). Katram no šiem apgabaliem ir sava izcelsme un skaidrojums.

Pa labi vērstais apgabals (B), kā jau tas tika skaidrots iepriekš, ir saistīts ar empīriski noteiktajām brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtībām, kuras pārsniedz 1 metra atzīmi. Savukārt kreisais apgabals (A) ir saistīts ar brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtībām, kuras ir mazākas par 0,4 metriem.

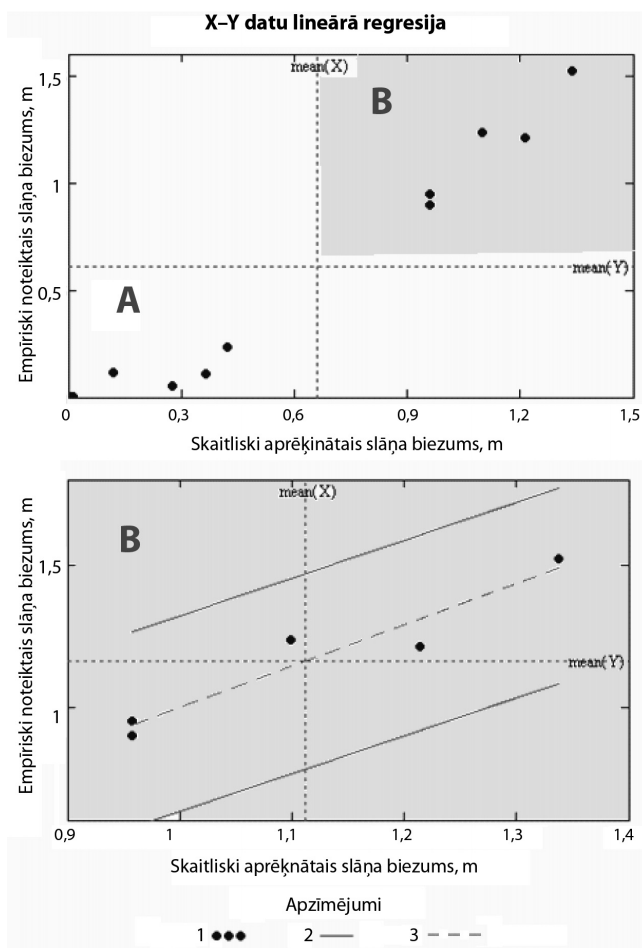
Kreisā apgabala empīrisko vērtību noraidīšanas iemesls (atšķirībā no labās puses apgabala vērtībām), visticamāk, saistīts ar brīvās fāzes šķidrums adsorbēšanos gruntsūdens horizonta iežu minerālajā frakcijā, un tā rezultātā veidojas neatgriežamais brīvās fāzes šķidrums piesātinājums S_{nr} un S_{nrs} . Šis parametrs norāda to minimālo šķidrums apjomu gruntī, kas nepieciešams, lai veidotos plūsma (Luckner et al., 1989). Principā tas ir nogulumu porās kapilāro spēku ietekmē aizturētais šķidrums apjoms (Genuthen et al., 1985), kas nepiedalās gruntsūdens horizontā divfāzu šķidrums plūsmā, un tāpēc tas var arī nepārdīties urbumā gan tā atsūkņēšanas, gan arī līmeņu atjaunošanās laikā pēc atsūkņēšanas.

Pētījuma eksperimentā veiktie mērījumi atsevišķiem urbumiem ar nelielu brīvās fāzes šķidrums slāņa biezumu uzrādīja visai pretrunīgus rezultātus, un tas liek secināt, ka šajos urbumos eksperimenta gaitā novērojamās naftas produktu brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma izmaiņas ir atkarīgas ne tik daudz no šī slāņa faktiskā biezuma gruntsūdens horizontā, cik no to iežu filtrācijas īpašībām, kuru porās šis slānis atrodas. Jo smalkākas ir smiltis, jo vājākas filtrācijas īpašības un augstāka brīvās fāzes šķidrums adsorbēšanas spēja tām piemīt. Šo faktu savos darbos atzīmē arī citi līdzīgu pētījumu autori (Krumbein, Graybill, 1965; Marinelli et al., 1996). Šos pieņēmumus apstiprina arī pētījuma datu statistiskās analīzes rezultāti.

Apkopojot visu jau sacīto, var secināt, ka kreisā apgabala (A) kritisko vērtību kopas izklīde ir pārāk liela, lai iegūto regresijas vienādojumu varētu izmantot brīvās fāzes šķidrums aktuālā biezuma noteikšanai (prognozēšanai) gruntsūdens

horizontā pēc urbumu atsūkņēšanas datiem, kad urbumā novērotais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums ir mazāks par 0,4 metriem.

Līdzīgi kā kreisajam (A) apgabalam tika pārbaudītas arī skaitliski un empīriski aprēķinātās brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritiskās vērtības labajam (B) apgabalam. Iegūtā regresijas taisne skatāma 5.3. attēlā.



5.3. attēls. Pa labi vērstā (B) apgabala skaitliski un empīriski aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību lineārās regresijas taisne

APZĪMĒJUMI. 1 – X-Y vērtības; 2 – kreisā un labā kritisko vērtību robeža; 3 – trenda līnija; A un B – empīriski noteiktā brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību apgabali.

Izmantojot (B) apgabala lineārās sakarības vienādojuma koeficienta b_1 reprezentācijas rādītāju, veikta šo vērtību kopas regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude pēc Stjudenta kritērija. Pārbaudē noteikts, ka kopējā aprēķinu shēmā nieiekļaujas 28. urbums, tāpēc tā dati no turpmākajiem aprēķiniem tika izslēgti.

Atkārtoti aprēķini bez 28. urbuma uzrāda, ka otrā hipotēze $H_0: b_1 = 0$ ir noraidīta, jo $t = 1,809788 > t_{\alpha, n} = 1,798118$, bet tas nozīmē, ka šīs hipotēzes regresijas koeficients ir būtisks un noteiktais regresijas vienādojums ir reprezentabls (skat. 5.1. tabulu).

Nepieciešams atzīmēt, ka hipotēzes regresijas koeficienta būtiskuma nosacījums izpildās tikai 83% ($\alpha = 0,17$) ticamības intervālam un mazākam. No tā var secināt – lai gan grafika labās puses kritisko vērtību apgabala (B) izkliede ir augstāka par centrālā apgabala vērtību izkliedi, iegūto regresijas vienādojumu var izmantot brīvās fāzes šķidrums aktuālā biežuma noteikšanai (prognozēšanai) gruntsūdens horizontā pēc urbumu atsūkņēšanas datiem ar ticamības pakāpi līdz 83% pēc šāda vienādojuma:

$$Y_2 = 1,46 - 0,46 X_2 \quad (5.1)$$

Vienādojums (5.1) ir alternatīva vienādojumam (4.2), vienīgi tas ir paredzēts tikai tām urbumā nomērītajām brīvās fāzes šķidrums slāņa vērtībām, kas ir lielākas par 1 metru.

5.1. tabula

Labā (B) apgabala kritisko vērtību kopas regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude

Izvirzītā hipotēze	Regresijas koeficienta b_1 reprezentācijas rādītājs, s_{b_1}	Stjudenta kritērija teorētiskā vērtība, $t_{\alpha, n}$	Stjudenta kritērijs, $ t $	Nulles hipotēzes $H_0: b_1 = 0$ statuss nosacījumam $t, t_{\alpha, n}$
Otrā nulles hipotēze H_0 labā (B) apgabala kritisko vērtību kopai	0,253656	1,798118	1,809788	$t > t_{\alpha, n}$ Noraidīta

Tālāk, lai noteiktu brīvās fāzes šķidrums aktuālo biežumu gruntsūdens horizontā vērtībām, kas lielākas par 1 metru, balstoties uz urbumu atsūkņēšanas datu apstrādi, tāpat kā vērtību intervālam 0,4–1,0 m izmanto vienādojumu (4.5).

Apkopojot visu sacīto, var secināt, ka ir pierādīta saistība starp divu pētāmo parametru kopu vērtībām, kas noteiktas ar divām dažādām metodēm (empīrisku un analītisko). Tas nozīmē, ka atsūkņēšanas eksperimenta mērījumu rezultāti un analītisko aprēķinu dati adekvāti raksturo nosakāmā parametra skaitlisko vērtību un šī parametra variēšanu, un tas turpmāk šāda veida datus ļauj ar statistiski noteiktu ticamības pakāpi izmantot dažādiem hidroģeoloģiskiem aprēķiniem.

Secinājumi

Pirmo reizi Baltijas valstīm raksturīgos hidroģeoloģiskos apstākļos realizēta gruntsūdens horizontā pastāvošās divfāzu šķidruma plūsmas teorētisko datu sistemātiska analīze un to verificēšana ar lauka eksperimentu rezultātiem.

Pētījumā pārbaudīts zinātniskajā literatūrā izvirzītais un vairākkārt pierādītais fakts, ka novērošanas urbumā nomērītais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums parasti pārsniedz faktisko šī slāņa biezumu gruntsūdens horizontā.

Pierādīta hipotēze, ka urbumā ģeoloģiskajos nogulumos eksistē cieša saistība starp „patieso” (aktuālo) brīvās fāzes slāņa biezumu un „vērojamo” šī slāņa biezumu, un šo saistību var izmantot aktuālā slāņa biezuma aprēķināšanai pēc šī slāņa mērījumu datiem urbumos.

Veikta pētījuma datu statistiskā apstrāde, kuras gaitā pārbaudīts atsūknēšanas eksperimentā empīriski iegūtā (pētāmā) lieluma vērtību kopas patiesums, un tas salīdzināts ar skaitlisko (modelēto) aprēķinu ceļā teorētiski noteikto (zināmo) datu kopu.

Pierādīts, ka ar divām dažādām metodēm (empīriski un analītiski) noteikto divu parametru kopu vērtības ir patiesas, atsūknēšanas eksperimenta mērījumu rezultāti un analītisko aprēķinu dati adekvāti raksturo nosakāmā parametra skaitlisko vērtību un šī parametra variēšanu.

Pētījumā iegūto datu verificēšanai pirmo reizi Latvijā izmantota inovatīva lāzera izraisītās fluorescences metode, kas ir ātrs un jutīgs process, ideāli piemērots naftas produktu brīvās fāzes šķidruma noteikšanai gruntsūdens horizontā tiešsaistes ceļā ar lāzera skenēšanas iekārtu.

Pētījumu eksperimentu gaitā tika iegūta augsta veikto mērījumu atkārtotamība, un tas ļauj secināt, ka piedāvātā brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma izmaiņu noteikšanas metode ir ļoti efektīva, un pašreiz tai nav analoga hidroģeoloģisko pētījumu praksē Latvijā.

Pētījumā iegūtie rezultāti ir tikai neliela daļa no tās informācijas, kas vēl apgūstama ļoti aktuālajā gruntsūdens horizontā pastāvošās divfāzu šķidruma plūsmas veidošanās mehānisma izzināšanas jomā. Tas nepārprotami norāda uz to, ka šajā virzienā pētījumi ir jāturpina arī nākotnē.

Pateicības

Lielu ieguldījumu darba tapšanā, kā arī metodiskās konsultācijas un rekomendācijas sniedza šī pētījuma zinātniskais vadītājs, ģeoloģijas doktors un Latvijas Universitātes profesors Valdis Segliņš. Viņš palīdzēja arī strukturēt un optimizēt pētījuma saturu un veicināja pētījumā iegūto rezultātu sistemātisku izklāstu.

Promocijas darbs izstrādāts ar ESF projekta finansiālu atbalstu. ESF projekta numurs: 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060.

Metodiskās konsultācijas un atbalstu lauku darbu plānošanā, kā arī atsūkņšanas eksperimentu veikšanā sniedza SIA “VentEko” projektu vadītājs ģeologs Guntis Ginters. Viņš tāpat sniedza konsultācijas par pētījuma rajona ģeoloģiskās uzbūves īpatnībām, piedalījās atsevišķu ģeoloģisko robežu precizēšanā dabā. Pētījumā iekļautos grafiskos attēlus palīdzēja gatavot SIA “VentEko” datorgrafīķis Aivars Martinovs. Minētajiem kolēģiem esmu pateicīgs par ieguldījumu, kuru viņi sniedza pētījuma atsevišķu posmu realizācijā un iegūto rezultātu noformēšanā.

Liels paldies topošajam ģeologam manam dēlam Jānim Aleksānam par šī darba tulkojumu no latviešu uz angļu valodu, kā arī Uldim Kāknēnam par angļu teksta koriģēšanu.

Autors tāpat pateicas visiem citiem SIA “VentEko” speciālistiem par sniegto tehnisko atbalstu lauka pētījumu veikšanai, kā arī visu to uzņēmumu administrācijām un dienestiem, ar kuru laipnu atļauju šajā darbā ir izmantoti to uzņēmumu teritorijās veikto pētījumu rezultāti.

Īpaša pateicība visiem SIA “Ventspils nafta termināls” (bijusī AS “Ventspils nafta”) tehniskajiem dienestiem, vides speciālistiem un administratīvajiem darbiniekiem, bez kuru atbalsta un praktiskajiem padomiem nebūtu iespējama eksperimentu realizācija pētījuma objektā.

Izsaku lielu pateicību Inesei Martenai par palīdzību promocijas darba teksta noformēšanā un tematiski vienotas zinātnisko publikāciju kopas sagatavošanā.

Literatūra

Publicētie materiāli

- Abdul, A. S., Kia, S. F., Gibson, T. L., 1989. Limitations of monitoring wells for the detection and quantification of petroleum products in soils and aquifers. *Ground Water Monitoring Review* 9(2), pp. 90–99.
- Aleksāns, O., Klimovičs, J., 2006. Naftas produktu brīvās fāzes piesārņojums gruntsūdens horizontā. Kampars, V., (red.) *Materiālzinātne un lietišķā ķīmija*. Rīga, RTU, 12.–18. lpp.
- Aleksāns, O., 2000. Virs pazemes ūdens līmeņa peldošo piesārņojošo vielu slāņa faktiskā biezuma noteikšana. *Latvijas Ģeoloģijas Vēstis* (9), 35.–37. lpp.
- Aleksāns, O., 2006. Naftas produktu piesārņojuma peldošā slāņa biezuma izmaiņu monitorings. In: Brangulis, A. u. c., (red.) *Lietišķo ģeoloģisko pētījumu lauku metodes un instrumenti*. Rīga, LU, 6.–8. lpp.
- Aleksāns, O., 2008. Inovatīvo tehnoloģiju pielietošanas iespējas mūsdienu hidroģeoloģiskajos pētījumos. *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Zemes zinātne. Referātu tēzes*, 66. zinātniskā konference. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 180.–182. lpp.
- Aleksāns, O., 2009. Divu datu kopu pāru regresijas analīze hidroģeoloģiskajos pētījumos. (Book). Spalviņš, A., (red.) *Boundary Field Problems and Computer Simulation*. RTU Izdevniecība, Rīga, 27.–32. lpp.
- Aleksāns, O., 2009. Naftas produktu piesārņojuma noteikšana gruntī ar lāzera izraisītās fluorescences metodi. *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Zemes zinātne. Referātu tēzes*, 67. zinātniskā konference. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 162.–164. lpp.
- API-Bulleten-No.18, 2003. Answers to Frequently Asked Questions About Managing Risk at LNAPL Site. In: Adamski, M. et al. *Soil and Groundwater Research*. Washington, API Creative Services, pp. 2–3.
- API-No. 4711, 2001. Methods for Determining Inputs to Environmental petroleum Hydrocarbon Mobility and Recovery Models. (Book). *API publication*. American Petroleum Institute, Washington, pp. 5–66.
- API-No. 4729, 2003. Models for Design of Free-Product Recovery Systems for Petroleum Hydrocarbon Liquids. (Book). *Regulatory Analysis and Scientific Affairs Department*. American Petroleum Institute, Washington, p. 70.
- API-No. 4760, 2007. LNAPL Distribution and Recovery Model (LRDM-Vol.1). (Book). *Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media*. API Publication Number 4760, Washington, p. 53.
- API-Publication, 2004. API Interactive LNAPL Guide 2004. Version 2.0. (Book). *Environmental Systems & Technology (A Division of Groundwater & Environmental Services, Inc.)*. API Publications; Aqui-Ver Inc.; Park City, Utah., Blacksburg, Virginia, p. 72.
- Aral, M. M., Liao, B., 2000. LNAPL thickness interpretation based on bail-down tests. *Ground Water* 38(5), pp. 696–701.
- Blake, S. B., Hall, R. A., 1984. Monitoring petroleum spills with wells: some problems and solutions. (Book). *Proceedings, Fourth National Symposium on Aquifer Restoration and Groundwater Monitoring*. National Water Well Association, Columbus, OH, pp. 305–310.

- Bondy, B., Backett, G. D., Joy, S., 2006. Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Parameters Database. (Book). *Regulatory Analysis & Scientific Affairs Department*. API publications; Aqu-Ver Inc.; Park City, Utah., Washington, p. 45.
- Brook, R. H., Corey, A. T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrology* (3), p. 27.
- Buiķis, A., 1989. Pazemes filtrācijas procesu analīze pēc iespējamās avārijas. *Latvijas Ekoloģija. Informatīvais biļetens*. Ventspils/Rīga, 45.–55. lpp.
- Burdine, N. T., 1953. Relative permeability calculations from pore-size data. *Trans. A.I.M.E* (198), pp. 71–77.
- Chidley, T. R. E., Lloyd, J. W., 1977. A Mathematical Model Study of Fresh-Water Lenses. *Ground Water* 15(3), p. 215–222.
- Genuchten, M. T. V., 1980. Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* (44), pp. 892–898.
- Gruszczenski, T. S., 1987. Determination of a realistic estimate of the actual formation product thickness using monitor wells: A field bailout test. In: *Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground water: Prevention, Detection, and Restoration*. Dublin, Natl. Ground Water Assoc., pp. 235–253.
- Howard, K., 2005. Contaminant Hydrogeology. Section 2. (Book). *Contaminated and Hazardous Waste Site Management Course.*, Toronto, p. 53.
- Hughes, J. P., Sullivan, C. R., Zimmer, R. E., 1998. Two techniques for Determining the True Hydrocarbon Thickness in an Unconfined Sandy Aquifer. In: *Proceeding of the National Water Well Association of Ground Water Scientists and Engineers and the American Petroleum Institute Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water*. National Water Well Association of Ground Water Scientists and API, pp. 291–314.
- Juškevičs, V., Kondratjeva, S., Mūrnieks, A., Mūrniece, S., 1998. Latvijas ģeoloģiskā karte, mērogs 1:200 000, 41. lapa – Ventspils. (Grāmata). *Paskaidrojuma teksts*. Valsts ģeoloģijas dienests, Rīga, 48. lpp.
- Krumbein, W. C., Graybill, F. A., 1965. An introduction to statistical models in geology. (Book). McGraw-Hill Inc., New York, p. 475.
- Lefebvre, R., 2006. Écoulement multiphase en milieux poreux, Chapitre 8. (Book). *Volume et transmissivité des liquides immiscibles dans les sols*. Université de Québec, Québec, pp. 264–296.
- Liepa I., 1974. Biometrija. (Grāmata). *Statistika*. Zvaigzne, Rīga, 336. lpp.
- Luckner, L., Genuchten, M. T. V., Nielsen, D. R., 1989. A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface. (Book). *Water Resources*, US, pp. 2193–2197.
- Mandeika, R., Vircavs, V., 2008. Degvielas uzpildes staciju un naftas bāžu radītā grunts un augsnes piesārņojuma likvidācija. (Grāmata). *Studentu starptautiskās zinātniskās konferences tēzes*. Lauku Inženieru fakultāte, Vides un ūdenssaimniecības katedra, Jelgava, 109. lpp.
- Mercer, J. W., Cohen, R. M., 1990. A review of immiscible fluids in the subsurface. Properties, models, characterization, and remediation. *Journal of Contaminant Hydrology* (6), pp. 107–163.

- Merry, A., 2005. Practical Model Application for Site Assessment and Remediation. Section 3. (Book). *Contaminated and Hazardous Waste Site Management Course*, Toronto, p. 41.
- Spalviņš, A., Janbickis, R., Lāce, I., Aleksāns, O., 2002. Ventspils naftas pārkraušanas ceha drenāžas sistēmas pētīšana ar hidroģeoloģiskā modeļa palīdzību. (Grāmata). *Starptautiskā konference EcoBalt'2002*. Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 74. lpp.
- Spalvins, A., Lace, I., 1997. Estimating of free and trapped oil volumes for light hydrocarbon plumes in groundwater. In: Spalviņš, A., Niceckis, L., Majevskis, A., Janbickis, R., (eds.) *Boundary field problems and computers*. Rīga, RTU, pp. 50–59.
- Spalvins, A., Slangens, J., Janbickis, R., 1997. Experiments with the ARMOS code on modeling Rumbula and Ilukste oil contaminated placesies. In: Spalviņš, A., Niceckis, L., Majevskis, A., Janbickis, R., (eds.) *Boundary field problems and computers*. Rīga, RTU, pp. 60–84.
- Testa, S. M., Paczkowski, M. T., 1989. Volume determination and recoverability of free hydrocarbon. *Ground Water Monitoring Review* 9(1), pp. 120–128.
- Testa, S. M., Winegardner, D. L., 1991. Restoration of Petroleum Contaminated Aquifers. (Book). Levis Publishers, Chelsea, p. 42.

Nepublicētie materiāli

- Aleksāns, O., 1998. Atskaite par grunts un gruntsūdens piesārņojuma inventarizāciju AS “Ventspils nafta” naftas produktu pārkraušanas ceha teritorijā. (Atskaite). Virszemes un pazemes ūdeņu piesārņošanās un aizsardzība. VE, Ventspils, 51. lpp. [Atskaite glabājas Latgefondā, Inv. Nr. 11798].
- Aleksāns, O., 1999. Dzelzceļa cisternu divpusējās izliešanas-uzpildīšanas estakādes Nr. 3 grunts un gruntsūdens attīrīšanas sistēmas izveides projekts. (Projekts). SIA “VentEko”, Rīga, 13. lpp. [Projekts glabājas SIA “VentEko” arhīvā: Inv. Nr. 06-01-EST-J/99-1999-01].
- Aleksāns, O., 2001. Atskaite par AS “Ventspils nafta” pārkraušanas ceha drenāžas sistēmas darbības analīzi, hidroģeoloģiskā modeļa sastādīšanu un iespējamo optimizācijas variantu izstrādi. (Atskaite). SIA “VentEko”, Rīga, 34. lpp. [Atskaite glabājas SIA “VentEko” arhīvā: Inv. Nr. 06-01-301/1-L-2001-01].
- Aleksāns, O., 2002. Tehniskais projekts drenāžas sistēmas izbūvei A/S Ventspils nafta gaišo naftas produktu un jēlnaftas izliešanas dzelzceļa estakādes Nr. 1 rekonstrukcijai. (Projekts). VentEko, Rīga, 28. lpp. [Projekts glabājas SIA “VentEko” arhīvā: Nr. 06-08-VE-120402-2002-01].
- Ališauskas, K., 1997. Ventspils pilsētas atsevišķo teritoriju pārslapinātības izpēte 1993.–1997. gadā. (Atskaite). AS “Ģeoserviss”, Rīga, 150. lpp. [Atskaite glabājas AS Ģeoserviss arhīvā].
- Juškevičs, V., 1999. Ventspils ģeoloģiskā uzbūve. Materiāli pilsētas ģenerālplāna korekcijai. (Atskaite). *Inženierģeoloģiskā izmeklēšana pilsētu detālplānojuma vajadzībām*, Rīga, 26. lpp. [Atskaite glabājas Latgefondā. Inv. Nr. 12266].

- Kovaļenko., F., 1996. Augšnes, tās aerācijas zonas un gruntsūdeņu piesārņojuma inventarizācija VAS Ventspils nafta 1. ceha teritorijā. (Grāmata). VNT SIA, Ventspils-Rīga, 42. lpp. [Atskaite glabājas SIA VNT arhīvā].
- Kalpišs, K., 2010. Pārskats par grunts un gruntsūdens piesārņojuma (UVOST*) izpēti un gruntsūdens novērošanas aku tikla optimizāciju SIA Ventspils naftas termināls PC teritorijā, Talsu ielā 75, Ventspilī. (Grāmata). SIA "VentEko", Rīga, 34. lpp. [Atskaite glabājas SIA "VentEko" arhīvā. Inv. Nr. 06-05-VNT-IZP-01/2010-2010-02].
- Levins, I., Krutofal, T., 1992. Atskaite par gruntsūdens piesārņojuma izpētes rezultātiem Ventspils naftas bāzes teritorijā. (Atskaite). Virszemes un pazemes ūdeņu piesārņošanās un aizsardzība., Rīga, 74. lpp. [Atskaite glabājas Latgeofondā, krievu val.].
- Ludāns, A., 2009. Pārskats par A/S VN PC drenāžas sistēmas darbības analīzi, hidroģeoloģiskā modeļa sastādīšanu un iespējamo optimizācijas variantu izstrādi, Talsu ielā 75. (Pārskats). SIA "VentEko", Rīga, 34. lpp. [Pārskats glabājas SIA "VentEko" arhīvā. Inv. Nr. 06-01-VNT-MOD-01/09-2009-01].
- Podgurskis, V., Meirons, Z., Arharova, T., 1985. Pārskats par 1 : 50 000 mēroga grupveida ģeoloģisko kartēšanu lapas O-34-91-G; O-34-92-A,B,V,G; O-34-103-B,G un O-34-104-A,B,V,G teritorijā (Ventspils). (Atskaite). *Ģeoloģiskā kartēšana*. Ģeoloģijas pārvalde, Rīga, 612. lpp. [Atskaite glabājas Latgeofondā, Inv. Nr. 10297, krievu val.].
- Spalviņš, A., Šlangens, J., Lāce, I., 2009. Hidroģeoloģiskā modeļa izveide SIA "Ventspils nafta termināls" un tai piegulošajai teritorijai. (Pārskats). Aleksāns, O., (red.) RTU VMC, Rīga, 17. lpp. [Pārskats glabājas SIA "VentEko" arhīvā. Inv. Nr. 06-01-VNT-MOD-RTUVMC-2009-01].
- Tracevskis, G., Juškevičs, V., Bogdanovs, A., 1969. Pārskats par 1 : 200 000 mēroga komplekso ģeoloģisko un hidroģeoloģisko kartēšanu O-43-XXII, XXIII, XXIV lapu teritorijā. (Grāmata). *Kompleksā kvartāra nogulumu inženierģeoloģiskā un hidroģeoloģiskā kartēšana*. Ģeoloģijas pārvalde, Rīga, 583. lpp. [Atskaite glabājas Latgeofondā. Inv. Nr. 08555, krievu val.].

Interneta resursi

- Baltijas Vides forums, 2006. Rūpnieciskais piesārņojums. Baltijas Vides forums, Pieejams: <http://www.bef.lv/177/> [Skatīts 2011. g. 8. janvārī].
- Carkova, V., 1979. Matemātiskā statistika. Rīga: LU Pieejams: <http://home.lu.lv/~carkova/lv/studentiem/dokumenti/Stat.pdf> [Skatīts 2011. g. 23. februārī].
- Geske, A., 2001. Dator tehnoloģijas un matemātikas metožu lietošana izglītības pētījumos. Hipotēžu statistiskā pārbaude. Pieejams: <http://globalfilesearch.net/browser/lauva.liis.lv/macmat/pedagog/> [Skatīts 2011. g. 21. februārī].
- LVĢMC, 2006. Piesārņoto un potenciāli piesārņoto vietu valsts datu bāze. [Online] Pieejams: <https://www.visr.eps.gov.lv/visr/default.aspx?action=2&rid=58> [Skatīts 2010. g. 15. aprīlī].
- Pospelova, G., 2004. Datorlietas. Pieejams: <http://priede.bf.lu.lv/grozs/Datorlietas/> [Skatīts: 2008. g. 2. novembrī].

Publikāciju saraksts

Raksti starptautiskajos izdevumos un kolektīvajās monogrāfijās

1. Aleksāns, O., 2009. Divu datu kopu pāru regresijas analīze hidroģeoloģiskajos pētījumos. Kolishkin, A., (red.) *RTU Zinātniskie raksti. Datormodelēšana un robežproblēmas*. Rīga, Latvija, RTU, 29.–34. lpp.
2. Aleksāns, O., Gavēna, I., 2008. Vacuum-enhanced recovery project at the site of former military airbase Rumbula in Riga, Latvia. In: Barnes, I., Kharytonov, M., (eds.) *Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment. NATO Science for Peace and Security Programme*. Alushta, Ukraine, Springer, pp. 495–500.
3. Aleksāns, O., Klimovičs, J., 2007. Naftas produktu brīvās fāzes piesārņojums gruntsūdens horizontā. Kampars V. (red.) *RTU Zinātniskie raksti*. Rīga, Latvija, RTU, 13.–21. lpp.
4. Aleksāns, O., 2006. Naftas produktu brīvās fāzes slāņa aktuālā biežuma noteikšanas problēmas un to iespējamie risinājumi, *Datormodelēšana un robežproblēmas* 29(5), Rīga, Latvija, RTU, 173.–182. lpp.
5. Spalvins, A., Semjonovs, I., Gosk, E., Gobins, J., Aleksāns, O., 1999. Development of a Mathematical Model for Contamination Migration in the Area of the Sulphur-Tar Sludge Waste Pools in Incukalns, Latvia. In: Fendekova, M., Fendek, M., (eds.) *XXIX Congress of International Association of Hydrogeologists*. Bratislava, Slovak, pp. 253–256.
6. Spalvins, A., Slangens, J., Janbickis, R., Lace, I., Skribelis, V., Gosk, E., Aleksāns, O., Semjonovs, I., 1999. Creating of regional and local hydrogeological models for waste deposit pools in Incukalns, Latvia. *Environmental Simulation* (41), pp. 44–56.
7. Aleksāns, O., Gobiņš, J., Semjonovs, I., 1997. Incukalns – pētījumi sanācijai. Semjonovs, I., (red.) *Pazemes ūdeņu aizsardzība Latvijā*. Rīga, Latvija, Gandrs, 401.–425. lpp.
8. Levin, I., Gosk, E., Aleksāns, O., 1994. Present and future for the Incukalns waste pools. In: Spalvins, A., Bleiers, J., (eds.) *Proceedings of Latvian-Danish seminar on Groundwater and Geothermal Energy*, Rīga, Latvia, RTU, pp. 87–99.
9. Gosk, E., Aleksāns, O., Levin, I., 1993. What to do with The Incukalns waste pools? (Book). Spalvins, A., Bleiers, J., (eds.) *Boundary Field Problems and Computers Numerical Simulation for Hydrogeology*. Rīga, Latvia, RTU, pp. 4–25.

Starptautisko konferenču un semināru referātu tēzes

1. Aleksāns, O., 2009. Detection of Hydrocarbons in Soil by Laser-Induced Fluorescence Method. In: Kirstuka, I., (ed.) *International conference: Soil Degradation*. Rīga, SIA “VentEko”, pp. 74–77.

2. Markulis, V., Dolgiy, Anatolijs, Dolgiy, Andrejs, Zolotarev, V., Aleksans, O., Selivanov, I., 2007. Joint Interpretation of GPR Data and Results of Observation Wells Monitoring to Estimate the Ground Contamination Degree. *In: Candansayer, M.E. et al., (eds.) 13-th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics: Near Surface 2007.* Istanbul, Turkey, EAGE, pp. 54–59.
3. Aleksans, O., Gavena, I., 2007. Groundwater remediation for fresh water resources protection. *Conference "Water & Environment"*. Kiev, International Exhibition Centre, pp. 263–264.
4. Spalviņš, A., Šlangens, J., Janbickis, R., Lāce, I., Aleksāns, O., Selivanovs, I., 2001. Pazemes ūdens plūsmas un naftas piesārņojumu migrācijas modeļošana bijušās Rumbulas lidostas teritorijai. *Datorzinātne* (42), RTU, 64.–65. lpp.
5. Spalvins, A., Slangens, J., Janbickis, R., Lace, I., Aleksans, O., 2000. Mathematical Models as Powerful Tools to Optimize Remediation Measures for Sulphur Acid Waste Pools at Incukalna, Latvia. *In: NordSoil Conference on Soil and Groundwater Pollution: expanding Possibilities for Nordic-Baltic Co-operation.* Vilnius, Geological Survey of Lithuania, pp. 89–91.
6. Spalvins, A., Slangens, J., Janbickis, R., Lace, I., Aleksans, O., Snitko, P., 1998. Simulation of Oil Contamination Migration in Area of Sewage Water Treatment Plant of Venspils Seaport. *In: Merkuryev, Y. et al (eds.) A Publication of the Society for Computer Stimulation International.* Riga, Latvia, RTU, pp. 48–50.
7. Aleksans, O., Gobins, J., Kalnina, D., Vulfa, L., Vitriscak, I., 1996. Groundwater remediation alternatives at a sulphuric acid – tar waste disposal site in Latvia. *In: Korenman, M., (ed.) International Ecological Congress.* Voronezh, Russia, Kansas State University, p. 46.

Konferenču un semināru referātu tēzes Latvijā

1. Aleksāns, O., Dimitrijevs, E., 2011. Lāzera izraisītās fluorescences metodes iespējas organiskā piesārņojuma noteikšanai gruntī. *Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne.* Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 264.–266. lpp.
2. Aleksāns, O., Dimitrijevs, E., 2009. Naftas produktu piesārņojuma noteikšana gruntī ar lāzera izraisītās fluorescences metodi. *Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne.* Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 162.–166. lpp.
3. Aleksāns, O., 2008. Inovatīvo tehnoloģiju pielietošanas iespējas mūsdienu hidroģeoloģiskajos pētījumos. *Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne.* Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 180.–182. lpp.
4. Aleksāns, O., 2007. Divfāzu šķidrums dinamika gruntsūdens horizontā. *Ģeogrāfija, ģeoloģija vides zinātne.* Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 117.–119. lpp.
5. Aleksāns, O., 2006. Naftas produktu piesārņojuma peldošā slāņa biezuma izmaiņu monitorings. Brangulis, A. et al., (red.) *Lietišķo ģeoloģisko pētījumu lauku metodes un instrumenti.* Rīga, LU, 6.–8. lpp.
6. Aleksāns, O., 2001. Naftas produktu piesārņojuma pētīšana bijušās Rumbulas lidostas pazemes ūdeņos. Naftas savākšans metožu izvēle. *Lietišķo ģeoloģisko*

- pētījumu lauku metodes un instrumenti*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 218.–220. lpp.
7. Spalviņš, A., Šlangens, J., Janbickis, R., Lāce, I., Aleksāns, O., Selivanovs, I., 2001. *Aviācijas degvielas izraisītā pazemes ūdeņu piesārņojuma modelēšana bijušajā Rumbulas lidostā*. Rīga, Latvija: SIA "VentEko".
 8. Aleksāns, O., Zilāns, A., Spalviņš, A., Janbickis, R., Šlangens, J., 1997. *Naftas produktu izlijumu modelēšana Rumbulas un Ilūkstes objektos. LU 56. zinātniskā konference*. Rīga, LU, 4. lpp.
 9. Aleksāns, O., 1996. *Ilūkstes naftas pārsūkņēšanas stacijas teritorijas piesārņojuma pētījumi*. In: *LU 55. zinātniskā konference*. Rīga, LU, 11. lpp.

Citas publikācijas

1. Aleksāns, O., 2000. *Virš pazemes ūdens līmeņa peldošo piesārņojošo vielu slāņa faktiskā biezuma noteikšana*. *Latvijas Ģeoloģijas Vēstis* (9), 35.–37. lpp.
2. Aleksāns, O. et al., 1993. *Incukalns Waste Pools, Problem or Asset. Service report*, Copenhagen, DGU Geological Survey of Denmark.
3. Aleksāns, O., Levin, I., Gosk, E., 1994. *Incukalns investigation, completion report. Service report Nr. 24*. Copenhagen, DGU Geological Survey of Denmark, pp. 4–55.
4. Levin, I., Aleksāns, O., Gosk, E., 1994. *Incukalns Investigation, Groundwater Contamination at the Southern Waste Pool Site. Service report Nr. 25*. Copenhagen, DGU Geological Survey of Denmark

DISERTATIONES GEOLOGICAE UNIVERSITAS LATVIENSIS NR. 20
UNIVERSITY OF LATVIA
FACULTY OF GEOGRAPHY AND EARTH SCIENCES



Oļģerts Aleksāns

Two-Phase Liquid Flow in the Groundwater Aquifer

Summary of Doctoral Thesis

In partial Fulfillment of the Requirements
of the Doctor Degree in Geology
Sub discipline of Applied Geology

Rīga, 2011

The doctoral thesis was elaborated: The Chair of Applied Geology, the Faculty of Geography and Earth Sciences, University of Latvia

Supervisor: **Valdis Segliņš**, Professor, *Dr. geol.*, University of Latvia

Reviewers:

Uldis Bethers, *Dr. phys.*, University of Latvia

Aija Dēliņa, doc., *Dr. geol.*, University of Latvia

Māris Kļaviņš, prof., *Dr. habil. chem.*, University of Latvia

Doctoral Committee:

Vitālijs Zelčs, Professor, *Dr. geol.* – council chairman

Ervīns Lukševičs, Professor, *Dr. geol.* – deputy chairman

Aija Dēliņa, Docent, *Dr. geol.*

Laimdota Kalniņa, Assoc. Professor, *Dr. geogr.*

Valdis Segliņš, Professor, *Dr. geol.*

Ivars Zupiņš, *Dr. geol.*

Secretary: **Ģirts Stinkulis**, Assoc. Professor, *Dr. geol.*

This thesis is accepted for the commencement of the degree of Doctor of Geology on May 19th, 2011, Protocol No. 002/2011, by the Doctoral Committee of Geology, University of Latvia.

The thesis will be defended at the public session of the Doctoral Committee of Geology University of Latvia, Alberta Street 10, Jāņa un Elfrīdas Rutku auditorium (Room 313), on September 2th, 2011.

The publication of this summary of doctoral thesis is granted by the University of Latvia.

The thesis is available at the Scientific Library of the University of Latvia, Kalpaka Blvd. 4, Rīga, and Academic Library of Latvia, Rūpniecības Street 10, Rīga.

Address for submission of comments:

Dr. **Ģirts Stinkulis**, Department of Geology, University of Latvia, Raiņa Blvd. 19, LV-1586, Rīga. Fax: +371 733 2704, e-mail: Girts.Stinkulis@lu.lv

© Oļģerts Aleksāns, 2011

© University of Latvia, 2011

ISBN 978-9984-45-367-5

Contents

Abstract	54
Topicality of the study	54
Aim and goals of the study	55
Novelty of the study	56
Approbation and implementation of the study results	57
1 The study area charecterization	58
1.1 The study site selection and study object specification	58
1.2. Ventspils expérimental site	59
2 Methods and materials	63
2.2 Implementation procedure for experiment	63
2.2 Analytical methods of the study	66
3 Data statistical analysis	72
4 Results	76
4.1 Numerically calculated free-phase liquid layer thickness	76
4.2 Empirically determined free-phase liquid layer thickness	77
4.3 The data mathematical analysis results	79
5 Discussion	84
Conclusions	90
Acknowledgments	91
References	92
Published materials	92
Unpublished materials	94
Internet sources	95
List of publications	96
Articles in international publications and collective monographs	96
International conference and seminar thesis	96
Conference and seminar thesis in Latvia	97
Other publications	98

Abstract

The doctoral thesis is dedicated to analyze two-phase liquids hydrogeological parameters' determining methods and importance of these methods in contemporary applied geology. Also the doctoral thesis describes the applicability of studied methods for the different kind of hydrogeological solutions, as well as to investigate the development trends of those methods and their potential usage in the future.

The study proves that after suspension of pumping process from the well, during the period of level recovery based on the regular free-phase liquid layer thickness and its interface with water measurements in the pumping well, it is possible to obtain the data necessary for determining the actual thickness of free phase liquid layer in the aquifer.

Systematic analysis of theoretical data of two-phase liquid flow in the shallow aquifer has been carried out and verified with the results of field experiments. The parameters obtained experimentally in the field have tight correlation with the empirically-estimated indicators that point to the interchangeability of these methods for applied and scientific research.

Key words: two-phase liquids, non-aqueous phase liquids, free phase, layer thickness, groundwater aquifer, oil products, pollution.

Topicality of the study

After the re-establishment of Latvian independence in the nineties of XX century variety of patterns of environmental studies began develop rapidly, including highly detailed hydrogeological studies that were often related to major changes in environmental legislation. With the development of an appropriate legislative base, it was gradually aligned with the rules implement in the European Union, and in this context as one of the priority environmental requirements integrated industrial pollution control and prevention were established, including identification, investigation and remediation of contaminated sites.

The petroleum and petroleum product processing, storage and transportation companies were mostly affected by the changes in legislation (Ministry of Economy, 11/15/2004), in the result of their historical performance in many parts of Latvia was created widespread soil and groundwater contamination plumes (Baltic Environmental Forum, 2006; Gosk et al., 1993, Levin et al., 1994; Aleksāns et al., 1997), but the traditional research methods proved to be inadequate for proper study of the pollution (Levin, Prols, 1997; Loginov, 1997). Soil and groundwater petroleum product pollutant quantity calculations were incorrect (API-Publication, 2004) and the resulting rates often several

times exceeded the actual quantities of the existing polluting oil products in the environment. As a result, companies were applied unreasonably high rates of natural resources for actually non-existent environmental damage (Aleksāns, 2000, Kovalenko, 1996).

Numbers of petroleum product spills are occurring in Latvia annually, that results in contamination of thousands square meters of surface area and water bodies and hundreds of cubic meters of petroleum products leak into the soil and groundwater (SIA “VentEko” data about leaks over the last 8–12 years). Oil pollution of groundwater horizon is characterized by a two-phase liquid state, that is one of the most pressing environmental problems study of which requires special techniques and special measuring equipment.

Two-phase fluid flow in groundwater aquifer as a problem has been widely studied in the world. Particularly remarkable is American Petroleum Institute (API) development (API-No.4711, 2001, API-Publication, 2004), as well as a few Latvian studies (Aleksāns, 2006; Buiķis, 1989; Spalvins, Lace, 1997; Spalvins et al., 1997). In these studies, an emphasis on the theoretical aspects about two-phase fluid flow in groundwater aquifer is made, but discussion about matter of the theoretical question for the observed in nature and the theoretical models of approbation and the examination of the field measurements still remain not sufficient in the scientific literature.

Traditionally, groundwater flow and their descriptive dynamics equations are not applicable for the two-phase fluid conditions in the groundwater aquifer. There are multiple operating environments, which need new methods to be found out, but they can only be gained through targeted research and experimentation. Notwithstanding the above, in Latvia such studies are very limited (Aleksāns, 2000) and their absence prevents environmental specialists, engineers and hydro geologists from obtaining the required parameters for petroleum product contamination control and remediation projects in the area (Aleksāns, 2002).

Aim and goals of the study

The aim of study was to develop a new practical method for two-phase liquid layer thickness determination in the groundwater aquifer, to explore the two unmixed fluid flow patterns in porous sediment environments, to examine pre-existing theoretical methods by evaluating the possibilities of applying for current hydrogeological issues in Latvian geological conditions.

The main tasks for the above mentioned purpose was to collect, compile and analyze the large evidence base and find the correct calculation algorithm, which would be most simple and at the same time allowing to obtain realistic

results, based solely on the pumping data. It was very important to identify the key criteria that affect the free-phase liquid layer in groundwater aquifer, as well as the main factors which affect the formation of the difference between the measured in boring apparent free-phase liquid layer thickness and the actual thickness of the liquid in groundwater aquifer.

Study conditions also intended to acquire data analysis and statistical analysis for results of experimental measurement of pumping to examine whether the analytical data calculation adequately describes the numerical value of this parameter and its differentiation. It was important to distinguish and describe patterns, which may adversely affect the reliability of results, provide incorrect result (the rejected value) analysis, characterize their causes and possible solutions to fix the problem.

To meet this objective, an appreciation of all the available latest theoretical developments of methods, analysis of published scientific literature (Nyeri et al., 1996, Aral, Liao, 2000; Lefebvre, 2006, Bondy et al., 2006), technical studies reports (Aleksāns, 2002; Aleksāns, 1998) and information available on the Internet, as well as investigation and analysis of various course materials, information of conferences and seminars held by professional organizations (Howard, 2005; Merry, 2005) was carried out.

Novelty of the study

The completed study covers author's field observations' summary obtained during last ten years, their analysis and comparison with the parameters obtained with the latest, based on empirical calculations, theoretical methods. It is based on experimental and practical measures in field conditions and is targeted at local geologically hydrogeological conditions, allowing better identification of two-phase fluid flow characteristics of petroleum product pollution at sites in Latvia. The author's study is the first such experiment in which theoretical aspects of free-phase liquid flow in groundwater aquifer are based on extensive field observation data base.

It is well known (API-Bulleten-No.18, 2003) that free-phase liquid layer thickness, which forms in groundwater aquifer, is closely linked to saturated horizons of rock making up the liquid permeability properties, free-phase liquid physico-chemical indicators and several other factors. Interaction of these factors provides a free-phase liquid layer flow conditions and the actual changes in thickness regularities in groundwater aquifer (Aleksāns, 2006), which differs significantly from the pure water filtration characteristics in the porous environment (API-No.4760, 2007).

Dissertation and its title focuses on a two-phase underground flow in groundwater aquifer. This emphasis on the two-phase fluid flow is performed in order to demonstrate that in contrast to normal flow in groundwater horizon, completely different patterns act in two-phase saturation conditions that requires specific studies to be found out. Two-phase flow patterns are intensively scientifically researched all around the world (API-Bulleten-No.18, 2003) and this determines importance and topicality of the study.

Approbation and implementation of the study results

Until 2011 based on the study results more than 30 scientific publications on individual study compounds and the work as a whole were elaborated, nine of said articles were published in international journals and in collective monographs, seven publications contain international conference and seminar theses, nine – theses from papers presented and published in Latvia, as well as several publications from different countries' geological institutions' and authorities' publications. International scientific congresses, thirteen papers have been read at conferences and seminars and ten reports were presented in scientific conferences and seminars in Latvia. As a whole the published materials fully reflect the results of the dissertation and result of objectives set in promotion paper.

In the field obtained and statistically based current thickness detection method for two-phase fluid flow in groundwater aquifer, which opens the possibility of different hydrogeological challenges in technically complex areas: oil terminals, ports, sites of petroleum product leak from pipelines, urban industrial zones, etc. Lack of such method in Latvia has so far prevented the environmentalists, engineers and hydrogeologists from obtaining the necessary parameters for petroleum pollution contamination control and remediation of sites. Therefore, scientifically-based free-phase liquid actual layer thickness determination method and approved by the author in the study may become a useful tool for calculations of various hydrogeological environmental remediation projects.

Of course, the results obtained are only a small part of the information, yet to be learnt about two-phase fluid flow in groundwater aquifer formation mechanism study area. However, it is a good experience, which offers huge potential in the future for practical application of these results in the groundwater aquifer ongoing two-phase fluid flow hydrogeological calculations.

1 The study area charecterization

1.1 The study site selection and study object specification

For realization of the promotion paper study site was selected with Latvian site-specific geological and hydrogeological conditions where two-phase fluid flow forms were studied. For determination of criteria for study site contaminated and potentially contaminated site registry was used (Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre, 2006), which contains 3567 entries, of which 243 are potentially contaminated. Of these 243 contaminated sites 192 (78%) cases have detected the presence of petroleum product contamination in the soil or groundwater. 49 sites contaminated by petroleum products (26%) have above the groundwater free-phase liquid layer, and at 143 sites (74%) this layer can potentially be formed.

For study site selection an additional criterion was set as a requirement that free-phase liquid layer was located in groundwater aquifer, where in the Latvian geologically hydrogeological conditions most common was two-phase flow, because in groundwater it is the least naturally protected from petroleum product contamination. The deeper water horizon oil pollution in Latvian geological conditions, on average, does not exceed 5–6% of the total pollution in the number of objects.

There is importance of free-phase liquid layer and water containing sediment lithological composition. Contaminated and potentially contaminated site in the database existing information analysis results show that groundwater floating over a free-phase liquid layer in 94% of the cases forms sandy sediments.

For study needs it was important to select a site in which the free-phase liquid layer consisted of petroleum product pollutants which are most common. 191 petroleum product contaminated site analysis showed that most (57%) frequent cause of pollution in some form is gasoline and/or diesel fuel.

After systematical evaluation all database sites with predefined criteria, as one of the most promising sites petroleum product pollution object in Ventspils city industrial area was selected for the study. It can be found in the Contaminated and Potentially Contaminated Site Register under number 27004/2055 (Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre, 2006).

1.2 Ventspils expérimental site

Administratively study site is located in the Baltic Sea coastal area (Fig. 1.1.) in Ventspils city's industrial zone oil product handling area. The company operates since late 60-ies, the total area is 81 ha and contains three tank parks, four rail racks for petroleum product unloading, pumping stations and other technological facilities (Kovalenko, 1996; Aleksāns, 1998). Majority volume of transshipped products consists of crude oil and diesel fuel, also gasoline and jet fuel is transferred.

The first groundwater research in this area (1990–1992) was launched by the Latvian Geological Survey (Levin, Krutofal, 1992), later – in year 1995 and 1996 it was continued by SIA Balt-Ost-Geo. This study carried out soil, soil unsaturated zone and groundwater contamination inventory (Kovalenko, 1996). SIA Balt-Ost-Geo in 1996 launched, and in 1997 continued soil and groundwater decontamination in rail racks area. SIA “VentEko” carried out a repeated soil and groundwater contamination inventory of all the oil products in shoretank farm area in 1997 (Aleksāns, 1998).

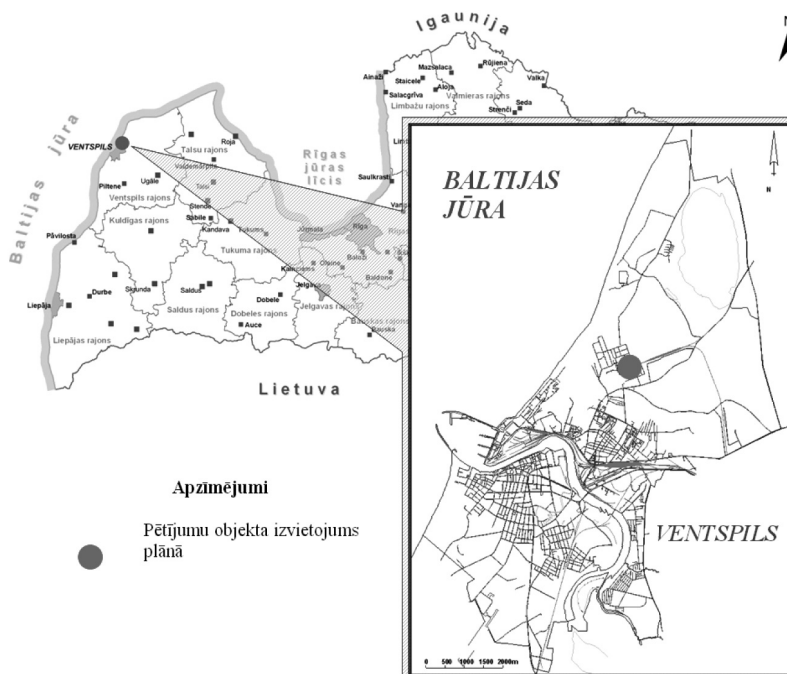


Figure 1.1 Study site location scheme

The experimental field area within the research area covers approximately 6 hectares and covers three out of four petroleum products' transshipment in the train trestles, which operating resulted in sandy sediments top array forming a substantial soil and groundwater contamination plume (Fig. 1.2.). The fuel quantity calculations showed that the amount of intensely contaminated soil ($> 5000 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$) in the train trestle area of 5.7 ha amounts to around $40\,000 \text{ m}^3$, but above the groundwater level by up to 3 m thick floating free-phase layer containing at least 3.000 m^3 of petroleum products (Aleksāns, 1998; Aleksāns, 1999).

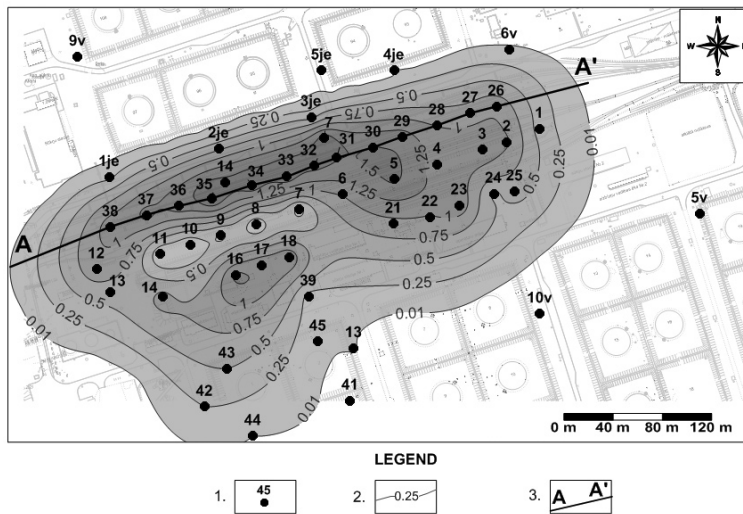


Figure 1.2 Free-phase liquid layer distribution map and drilling wells locations within the study site (Aleksāns, 1999)

LEGEND. 1 – drilling well and its number; 2 – geometric trace of free-phase liquid layer thickness, in meters; 3 – hydro geological cross section line.

Geologically free-phase liquid layer within the range of the experimental field is located at the flat plain of the former Littorina lagoon northern part. A quaternary deposit, which covers the lower strata that directly covers the Devonian rocks, consists of Latvian and Kurzeme glacial till deposits. While the majority of the upper strata is made up of clay with silt strata in between which on the surface is covered by poorly sorted sand. Quaternary deposits' total thickness at the research site and the surrounding areas varies from 20 to 60 meters (Juškevičs et al., 1998; Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al., 1969). The study area hydrogeology section can be seen in Fig. 1.3.

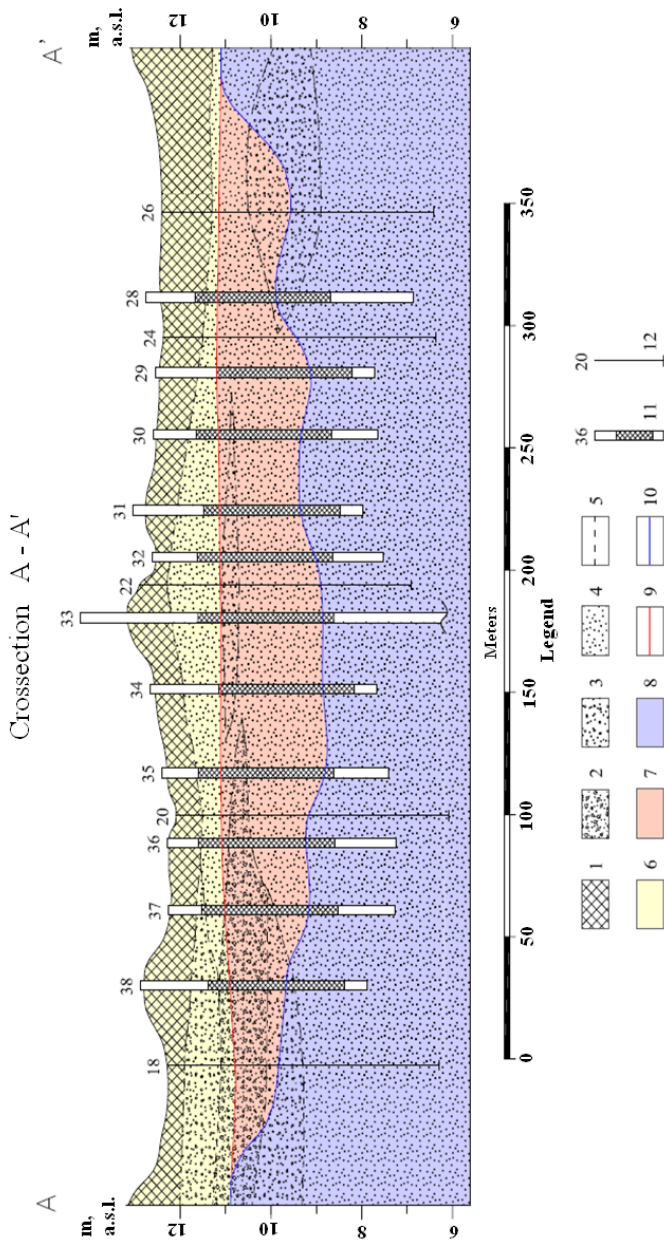


Figure 1.3 Hydrogeological cross section of exploration area

LEGEND. 1 – embankment; 2 – gravel sand; 3 – medium coarse sand; 4 – fine sand; 5 – lithological boundary; 6 – vadose zone; 7 – free-phase liquid layer; 8 – groundwater; 9 – non aqueous phase liquid top; 10 – groundwater and non aqueous phase liquid interface; 11 – pumping well and its number; 12 – exploration well and its number.

Devonian rocks in the most part of territory are located in the depth of 15–20 m below sea level and are represented by Narva rock suites. It is up to 100 m thick water poorly or very poorly permeable rock complex, which consists of greenish-gray and gray clay, dolomitic clay and dolomite-marl with clayey dolomite strata in between. In the bottom of the beds gypsum mid-strata is also found. Narva rocks beds separate the Quaternary sediments from deeper laying mid-Devonian Pärnu and lower-Devonian Kemeru suites and Gargždu series of sandstone.

Study area and its surrounding hydrogeological conditions are closely related to geological structural characteristics and sediment composition changes, in part, they are also affected by the ongoing economic activity here. The first groundwater aquifer is related by laying on the surface of different age, composition and genesis sandy sediments. Groundwater depth in research site on average varies from 1.2 m to 3.5 m below the ground surface (Kovalenko, 1996; Aleksāns, 1998; Ludāns, 2009) and it is determined by now observed relief and nature of water-containing sediment thickness, as well as rainfall and its distribution in annual terms. The coastal dune belt groundwater level may also be located deeper – often 3–5 meters below the ground surface, or even more (Juškevičs, 1999; Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al., 1969).

Groundwater flow has complex character, which has the basis of a dense network of underground facilities and industrial areas intensive workload. As a whole at the research area the groundwater flow is directed in the Baltic Sea and the Venta river direction. Much weaker, this flow is to the northeast, where between the hills the Zemstīla swamp is situated in a hollow (Ališauskas, 1997). Also a major role in the groundwater flow is left to the drainage system (Aleksāns, 2002).

Groundwater aquifer is waterwealthy and pumping yield, depending on wells screen diameter, its length and the depth of location here ranges from 0.03 to $0.67 \ell \times s^{-1}$ (Aleksāns, 1998; Aleksāns, 2001; Spalviņš et al., 2009). Depending on ground water contained sediment size composition, rock permeability varies from 1.5 to $8.5 \text{ m} \times \text{dnn}^{-1}$ (Aleksāns, 2002).

2 Methods and materials

2.1 Implementation procedure for experiment

The implementation procedure for experiment has three highlighted phases: 1) study design, 2) the realization of the experiment and 3) analytical performance.

For quality and representative data collection, as well as various confounding factors in mitigation of impact on the progress of the experiment, study forming had to be planned in such a way to comply with a number of important conditions: geological and hydrogeological conditions, free-phase liquid layer in the presence in groundwater aquifer, technical and technological requirements, the tools and equipment, as well as other earlier conducted experiments' condition descriptions listed in the literature (Gruszczenski, 1987; Test, Winegardner, 1991; Hughes et al., 1998; Beckett, Lyverse, 2002).

According to the experiment requirements 46 observation wells were examined within study field, from which 31 were found in conformity with criteria required. Drilling depth on average reached 5–6 meters, the filter column diameter for selected holes varied: 89, 108 or 127 mm. All wells were equipped by 2.5 to 3.0 m long brass mesh screen located in the range of 2–5 meters below the ground surface (Kovalenko, 1996; Aleksāns, 1998). Free-phase liquid (petroleum product) layer thickness in the wells examined varied from 0.13 m to 2.70 m. Wells, in which petroleum product layer was less than 0.10 m, were not included in the experiment. For pumping fluid from the well surface centrifugal pump was used. For free-phase liquid pumping from the well surface centrifugal pump was used (see Fig. 2.1.) with a pumping capacity 0.3 to $0.5 \text{ l} \times \text{s}^{-1}$. Principal scheme of pumping system for one hole seen in Fig. 2.1.

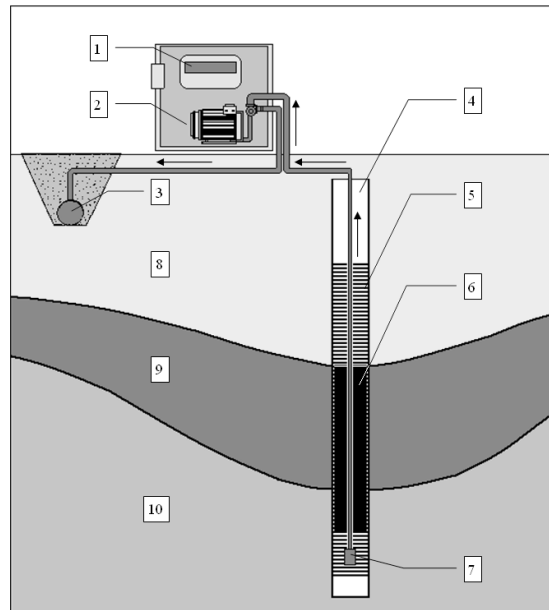


Figure 2.1 Principal scheme of pumping system

LEGEND. 1 – control panel; 2 – surface centrifugal pump; 3 – industrial sewage; 4 – pumping well; 5 – well screen; 6 – free-phase liquid layer in the well; 7 – check valve; 8 – vadose zone; 9 – free-phase layer in the groundwater aquifer; 10 – groundwater.

The research experiment was carried out within the framework of remediation work which included the petroleum products' free phase liquid pumping from groundwater aquifer. Drilling and pumping duration, depending on the free-phase liquid volume and intensity of water supply, in different wells ranged from a few days up to one month or longer. The total study period was four months, during which the petroleum products free phase liquid layer parameter has been measured in wells (Aleksāns, 2007).

During pumping stage level of reduction was usually reached in the range, which provided gradual free-phase liquid layer thickness reduction and the complete disappearance in the well (Gruszczenski, 1987, Hughes et al., 1998). In those cases, where free-phase liquid flow to the borehole was so intense that there was no possibility of achieving a complete disappearance of the floating layer, pumping was continued until it was achieved that in borehole measured free-phase liquid layer thickness was stabilized.

For level measuring in the wells SOLINST immiscible fluid probe interface detector was used that provides both free-phase liquid or/and water

surface measurements, as well as the fluid contact surface depth in borehole measurements to an accuracy of 1 centimeter (SOLINST, 2009). In parallel to the SOLINST detector study was designed also to examine the original, developed by the author (Aleksāns, 2008) a free-phase liquid layer thickness detection method, using three miniature DIVER type sensors.

For free-phase liquid layer actual thickness verification on-site, this study used an innovative laser induced fluorescence (LIF) probing method (Aleksāns, Dimitrijevs, 2009, 2011). This method allows to obtain verification of the experimental results with necessary data having much higher precision and confidence level, compared to previously used techniques (Aleksans, 2009). The construction and its principal scheme can be seen in Figure 2.2.

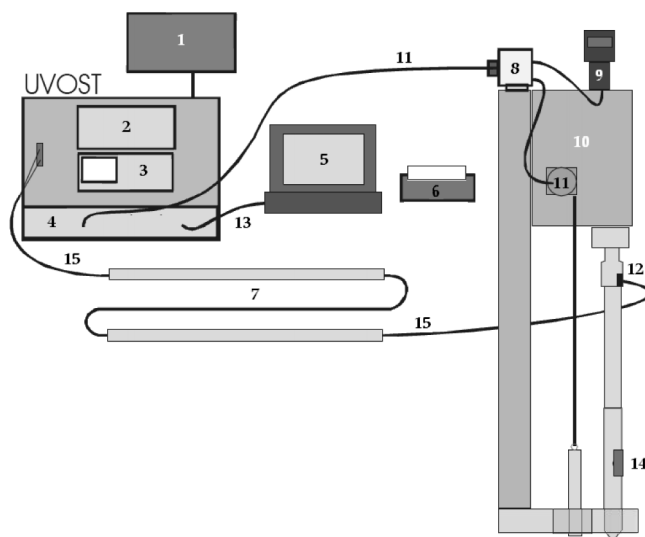


Figure 2.2 The principal scheme of laser-induced fluorescence (LIF) probing device

LEGEND. UVOST – Ultra Violet Optical Screening Tool; 1 – generator; 2 – laser; 3 – scope; 4 – e-deck; 5 – PC; 6 – printer; 7 – roads; 8 – breakout box; 9 – remote display; 10 – direct push equipment; 11 – umbilical; 12 – split cup; 13 – LAN; 14 – window in the road for laser excitation and receiving emitted light; 15 – fiber optic cable.

2.2 Analytical methods of the study

To compare preliminary known regularities and theoretical assumptions with the author's realized original field experiment results, several methods were used, among which two major are highlighted:

- 1) two-phase fluid in the groundwater aquifer vertical distribution main characteristics identification using the numerical analysis method;
- 2) free phase liquid layer in the groundwater aquifer actual thickness determination using field experiment observation data (empirical method).

Numerical experiment used in the study was based on physical model of a two-phase fluid system in the groundwater aquifer, as reflected in Fig. 2.3.

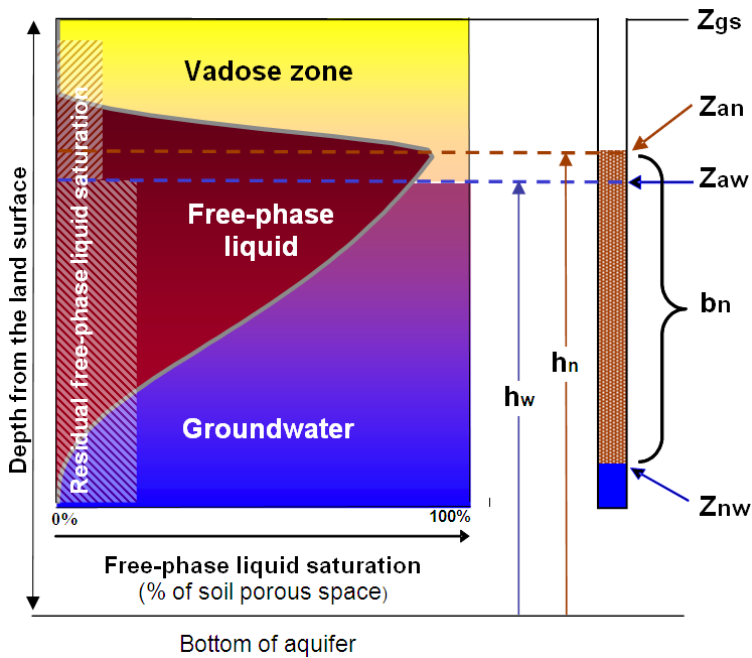


Figure 2.3 Physical model of two-phase liquid vertical distribution in the groundwater aquifer

LEGEND. Z_{gs} – reference level (top of surface); Z_{an} – air and free-phase liquid interface; Z_{aw} – hypothetical (piezometric) groundwater level; b_n – observed free-phase liquid layer thickness in the monitoring well; Z_{nw} – free-phase liquid and water interface; h_w – water rising altitude (pressure) in the groundwater aquifer; h_n – free-phase liquid rising altitude (pressure) above its and groundwater interface.

These estimates as a key used physical model-based application on the Burdine Van Genuchten-liquid two-phase systems in the groundwater aquifer that allows you to analyze the petroleum products contamination spread for one or two mutually isolated groundwater aquifers in porous environment. It is accessible at the American Petroleum Institute home page (Burdine, 1953; Genuchten, 1980).

In the picture shown physical model-based describes two-phase liquid conditions in the vertical distribution of homogeneous, unlimited in area and proper fluid vertical distribution in the observation well for cross-section of the porous sediment environment in the groundwater aquifer.

Two immiscible fluid nature in the vertical distribution of groundwater aquifer for porous sediments is determined by intrinsic capillary properties for these sediments and by the capillary pressure caused by the fluid inside the pores, which can be calculated using the Van Genuchten capillary pressure model, and it is based on the following algorithm:

- 1) the capillary zone height elevation calculation for the maximum observed free-phase liquid layer in borehole (z_{max});
- 2) free-phase liquid initial (maximum) vertical distribution identification in the groundwater aquifer (S_{ni});
- 3) identification of irreversible volume of free-phase liquid in the vertical distribution (in the soil adsorbed or residual volume);
- 4) calculation of free-phase liquid and water vertical distribution in the groundwater aquifer basing on measured free-phase liquid layer thickness in borehole.

Physical model assumed for the numerical calculations is a typical case of groundwater contamination with petroleum products in sandy sediment horizon (Mandeika, Vircavs, 2008) and meets the geological and hydrogeological conditions which actually exist in the field study site (Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al, 1969; Juškevičs, 1999).

Application of empirical methods used in the promotion work study are based on the observed water level recovery phenomenon for two-phase fluid flow conditions in groundwater aquifer during pumping experiments (see Fig. 2.4.).

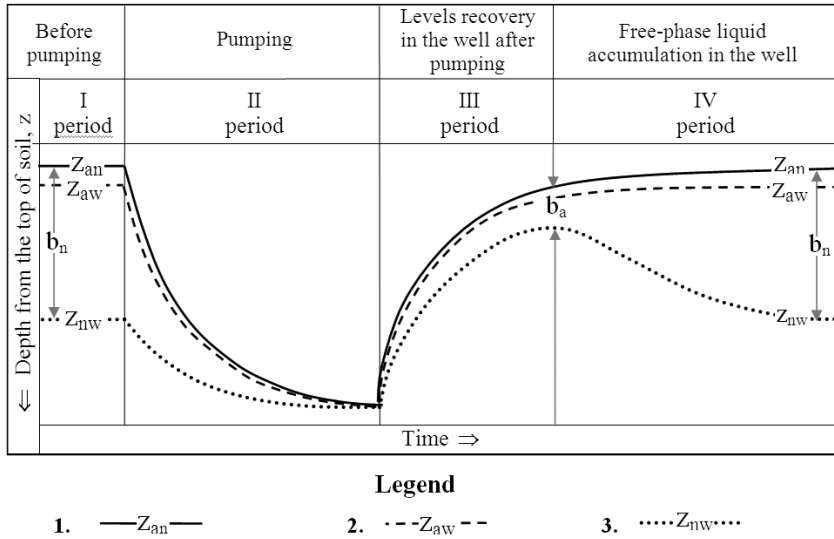


Figure 2.4 The graph of observed free-phase liquid layer thickness changes in the well during the pumping test

LEGEND. 1 – air and free-phase liquid interface; 2 – hypothetical (piezometric) groundwater level; 3 – free-phase liquid and water interface; b_a – actual (real) free-phase liquid layer thickness in the aquifer; b_n – observed free-phase liquid layer thickness in the monitoring well.

According to these observations, after termination of the pumping experiment, at the recovery stage in the borehole both free-phase top level, as well as free-phase – water contact surface's level keep steadily rising. However, at a given time, free-phase – water contact area at the observation borehole begins to gradually fall (sink), but free-phase liquid layer upper level is constant, or even slightly continues to rise. This process is characterized by free-phase liquid and water level change process in borehole during the experiment, which can be conditionally divided into four periods:

- 1) two-phase fluid level position in the borehole before pumping started;
- 2) the dynamics of the level change in the borehole during pumping;
- 3) dynamics of the levels recovery in the borehole after termination of the pumping until the free phase – water contact surface will not rise anymore;
- 4) dynamics of changes in levels after the free-phase – water contact surface in the borehole begins to gradually decline to a full stabilization of two levels in the borehole.

This phenomenon is based on the two-phase fluid pressure forces in equilibrium position, resulting in air, water and free-phase interactions (Lefebvre, 2006). Scientific literature's several researchers' publications (Lefebvre, 2006, Aral, Liao, 2000; Gruszczenski, 1987; Aleksāns, Klimovičs, 2006) as well as observations in the promotional paper results shows that free-phase liquid and water contact surface plot's upper turning point in the level recovery period curve describes the conditions under which free-phase liquid layer thickness in the borehole is equal to the actual layer thickness in the groundwater aquifer.

According to Giben-Hercberg theory (Chidley, Lloyd, 1977) it can be stated that $h_w = z_{nw}$, but $h_n = z_{an} + z_{nw}$ where $z_{an} = z_{an} - z_{aw}$ and $z_{nw} = z_{aw} - z_{nw}$ – that is, two immiscible fluids contact point free-phase liquid and water pressures are equal:

$$P_n = P_w \quad (2.1)$$

Knowing the density of water (ρ_w) and free-phase liquid density (ρ_n), equation (2.2) can be rewritten as follows:

$$h_n \times \rho_n \times G = h_w \times \rho_w \times G, \quad (2.2)$$

where:

G – gravity constant ($G = 6,67259 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2 \times \text{kg}^{-2}$);

ρ_n – free-phase liquid density;

ρ_w – water density in groundwater aquifer;

– all other terms as before.

Free-phase liquid layer height elevation from the contact surface with water (h_n), or in the borehole observed layer thickness (b_n) can be expressed by the equation:

$$(\Delta z_{an} + h_w) \times \rho_n = h_w \times \rho_w \quad (2.3)$$

Transforming the expression (2.3), we obtain the relationship, which by its forms of expression is fully consistent with Giben-Hercberg equation (Chidley, Lloyd, 1977).

$$\Delta z_{an} \times \rho_n = (\rho_w - \rho_n) \times h_w = (\rho_w - \rho_n) \times \Delta z_{nw} \quad (2.4)$$

$$\Delta z_{nw} = \Delta z_{an} \times \frac{\rho_n}{(\rho_w - \rho_n)} \quad (2.5)$$

From that follows that free-phase liquid layer height in the borehole is equal to $h_n = h_w + \Delta z_{an}$, but at the same time it is also equal to $h_n = \Delta z_{nw} + \Delta z_{an}$, which allows to write down the following equation (Lefebvre, 2006):

$$h_n = \Delta z_{an} \times \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_w - \rho_n} \right) \quad (2.6)$$

$$h_n = \Delta z_{an} \times \frac{\rho_n}{\rho_w - \rho_n} \quad (2.7)$$

Thus, equation (2.7) is used for calculating two-phase liquid system height in the observation well. However, as indicated by previous studies (Lefebvre, 2006), it is not applicable to identify these levels in the geological horizon of sediment where capillary forces form two entirely different immiscible fluid vertical distributions, which can be seen in Fig. 2.5.

Two immiscible fluid vertical distribution in the groundwater aquifer sediments is mainly affected by water and free-phase liquid saturation level ratio, determined with numerical method. Figure 2.3 shows that two-phase liquid layer's upper part up to 80% is dominated by free-phase liquid, but with depth its content is reduced to zero. While the water saturation was highest in the layer at the bottom, toward the top water content decreases. Notably, water saturation even at two-phase fluid's upper part layer is never zero, where its presence more or less always ensures the water capillary zone penetration into the free-phase liquid layer (Lefebvre, 2006).

Depending on the water and free-phase fluid's saturation degree percentage change in the vertical direction, water (p_w) and free-phase fluid's (p_n) pressure in the groundwater aquifer also change. Fig. 2.5. (B) graph shows that the curves of pressure change have complex nature – the upper part layer is dominated by free-phase fluids, at the bottom – water pressure. However, despite the complex nature of the curves, the cumulative pressure p_Σ ($p_\Sigma = p_n + p_w$) in groundwater aquifer (2.5. Fig., (B) graph) is equal to p_n and p_w pressure in observation wells, (Fig. 2.5., (C) graph) which, in fact, also proves that the whole two-phase fluid system, both in the borehole and horizon, is in the balance (Lefebvre, 2006).

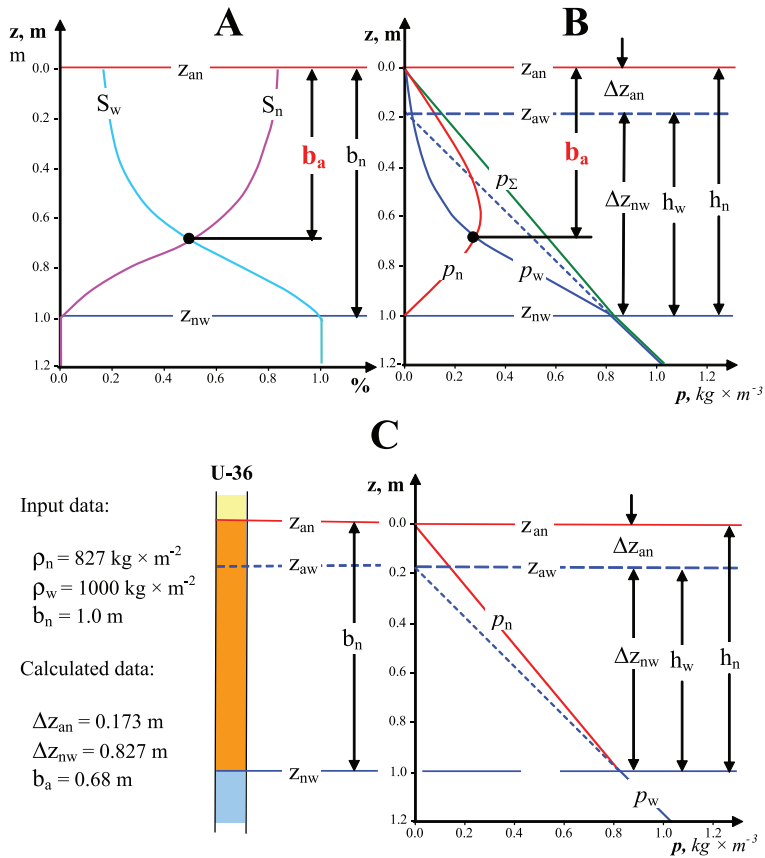


Figure 2.5 Two-phase liquid vertical distribution key parameters comparison for groundwater aquifer (A, B graphs) and observation well (C graph)

LEGEND. 1 – well screen interval; 2 – vadose zone; 3 – free-phase liquid layer and its level in the well; 4 – ground water level in the well (with a dotted line – hypothetical); U-1 and U-2 – the first and second wells correspondently; h_w – water rising altitude (pressure) above the free-phase liquid and water interface; h_n – free-phase liquid rising altitude (pressure) above its interface with the groundwater (also – free-phase liquid layer thickness: $h_n = b_n$); Δz_{an} – free-phase liquid height above the hypothetical groundwater level ($\Delta z_{an} = h_n - h_w$); Δz_{nw} – hypothetical ground water level height above its interface with free-phase liquids ($\Delta z_{nw} = h_w$); z_{an} – air and free-phase liquid interface; z_{nw} – hypothetical (piezometric) water level; z_{nw} – free-phase liquid and water interface; p_a – atmospheric pressure; p_w – water pressure; p_n – free-phase liquid pressure; p_Σ – cumulative pressure; S_w , S_n – water and free-phase liquid, correspondently, vertical distribution for saturated zone at the level (z); A – free phase liquid and water interface point.

3 Data statistical analysis

Conducted study's statistical data processing's main tasks were to check accuracy of the pumping experiment's empirically gained (investigated) set of size values, and to compare it with the numerically calculated (simulated) theoretically gained (known) data set and to determine the regression function, i.e. mathematical form of dependency between the pumping experiment empirically gained researched parameter size values measured in drilling, which would allow in the future to predict a random variable values with the another random variable values given (Aleksāns, 2009).

For statistical data processing following algorithm has been chosen the:

- 1) the study hypotheses;
- 2) significance level (α) determination;
- 3) data correlation analysis;
- 4) regression function selection;
- 5) determination of linear regression coefficient;
- 6) regression significance analysis for the hypotheses chosen.

To test possibility of reliability and the applicability of data obtained in the study two null hypotheses were set.

The first null hypothesis $H0_1$: there is a relationship between in the borehole defined (measured), free-phase fluid layer thickness value of the random variable X_i and numerically defined (designed) Y_i – increasing the independent variable X_i values increases linearly dependent variable's Y_i average values and its correlation's regression line has a linear function:

$$Y_i = b0_i + b1_i X_i, \quad (3.1)$$

where:

- X_i – in the borehole measured parameter value;
- Y_i – numerically defined (designed) parameter value;
- $b0_i$ – the first hypothesis' regression's free member;
- $b1_i$ – first hypothesis' regression' coefficient.

First hypothesis $H0_1$ is described by the equation:

$$H0_1 : b1_i = 0 \quad (3.2)$$

If the null hypothesis $H0_1 : b1_i = 0$ is valid, then the regression coefficient $b1_i = 0$ and characteristics variation is completely independent, which means that between the regressors and regressants there is no significant correlation

and linear dependence. On the other hand, if the null hypothesis raised H_{0_1} : $b_{1_1} \neq 0$ is not valid, then the regression coefficient $b_{1_1} \neq 0$ and characteristics variation is dependent, which means that the regressors and regressants have correlation and linear dependence.

The second null hypothesis H_{0_2} states that the two different methods (numerical and empirical) in a given free-phase liquid layer actual thickness of the random variable X_2 and empirically set in pumping experiment free-phase liquid layer thickness for the random variable Y exist in the relationship – an increase in the independent variable X_2 values linearly increases the dependent variable Y average value and its correlation regression line has a linear function:

$$Y_2 = b_{0_2} + b_{1_2}X_2, \quad (3.3)$$

where:

- X_2 – numerically calculated parameter value;
- Y_2 – empirically set (in the experiment) parameter value;
- b_{0_2} – the second hypothesis' regression's free member;
- b_{1_2} – second hypothesis' regression' coefficient.

Second hypothesis H_{0_2} is described by the equation:

$$H_{0_2}: b_{1_2} = 0, \quad (3.4)$$

If the raised null hypothesis $H_{0_2}: b_{1_2} = 0$ is valid, then the regression coefficient $b_{1_2} = 0$ and characteristics variation is completely independent, which means that between the regressors and regressant there is no significant correlation and linear dependence. On the other hand, if the null hypothesis raised $H_{0_2}: b_{1_2} \neq 0$ is not valid, then the regression coefficient $b_{1_2} \neq 0$ and characteristics variation is dependent, which means that between the regressors and regressant there is correlation and linear dependence.

During statistical processing and data analysis, the study findings will always have a probabilistic nature or characteristics (Geske, 2001). The experimental result are not contrary to the hypothesis and the observed anomalies have a casual basis if the measurement error probability does not exceed the significance level α (Carkova, 1979). Importantly, the significance level α is not chosen based on statistical considerations, but according to the research tasks (Geske, 2001).

In common practice, the significance level is adopted in the uniform of one of the numbers – 0.05, 0.01, 0.001, which is recognized by all and which, therefore, have prepared statistical tables (Carkova, 1979), they indicate a general relationship: the higher level of importance, the lower study accuracy is. For studies based on physical measurements (analytical studies), most commonly used significance level is $\alpha = 0.05$, corresponding to a probability of 95% (Geske,

2001). In this case, rejecting the null hypothesis, there is a 5% probability that the hypothesis is wrongly rejected.

Correlation analysis was carried out for three interrelated and by various methods obtained free-phase liquid layer thickness numerical values:

- 1) numerically calculated (modeled);
- 2) empirically determined (experimental);
- 3) in borehole observed (measured).

The executed correlation analysis aim was to determine the closeness between the factorial and resulting over groundwater floating a free-phase liquid layer's thickness values. To visually determine the relationship nature and the closeness between the factorial and the resulting free-phase liquid layer thickness's values correlation or scatter diagrams were used. Scattering of points around an imaginary curve characterizes the closeness of the correlation (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004), but the imaginary shape of the curve – the type of regression relationships.

Correlation coefficient interpretation is correct only if the test samples correspond to normal distribution. Assuming the possibility that in a study carried out experiments one of the group measurements may not meet the normal distribution, or it contains a false defined values, in addition to correlation analysis also regression analysis was conducted, which in these cases is strongly recommended by the existing statistical data processing practice (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004).

To check whether paired regression is linear, determination coefficient R with the correlation coefficient r were compared, which squares in case of linear regression, have to match: $R^2 = r^2$ (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004). In addition to the linear regression other known paired regression probability existence was also examined.

Basing on empirical regression chart, as well as on the determination and correlation coefficient square analysis results, it was determined that with different measurement methods determined free-phase liquid layer actual thickness point values have a linear relationship – an increase of the independent variable X_i (regressors) values linearly increases the dependent variable Y (regressant) average values and regression line has a linear function:

$$Y = b_0 + b_1X, \quad (3.5)$$

where:

X – in measured borehole (first hypothesis) or analytically calculated (second hypothesis) parameter value;

Y – experimentally set (empirical) parameter value;

b_0 – regression line free member, describing the y -axis straight value from the coordinate system beginning to the point where the regression line crosses the y -axis (Carkova, 1979; Krumbein, Graybill, 1965);

b_1 – regression coefficient, or the slope coefficient, i.e. the tangent of the angle the regression line forms with x -axis (Carkova, 1979).

The linear regression coefficients b_0 (free member) and b_1 (regression coefficient) are calculated after the formulas (3.6) and (3.7):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \cdot \bar{y} \cdot n}{(n-1) \cdot s_x^2} \quad (3.6)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad , \quad (3.7)$$

where:

s_x – regressors (x sample set) standard deviation,

– all other terms as before.

At the end of statistical data processing the regression significance testing was carried out using the Student's criterion, where linear dependence is determined by factor b_1 representational indicator s_{b_1} . If the coefficient $b_1 = 0$, then characteristics variation is fully independent, there is no significant correlation and linear dependence between the regressors and regressants. In this case the regression line is parallel to the x -axis and regression is not significant.

Null hypothesis $H_0 : b_1 = 0$, that b_1 coefficient is not significantly different from the zero, is tested with Student's criterion by equation (3.8).

$$|t| = \frac{b_1}{s_{b_1}} \quad (3.8)$$

Null hypothesis $H_0 : b_1 = 0$ is valid and regression is not significant when $t < t_{\alpha, \nu}$, $t_{\alpha, \nu}$ – Student's criterion's theoretical value, but $\nu = n - k$, where k – regression equation's number of the coefficients, α – significance level.

4 Results

4.1 Numerically calculated free-phase liquid layer thickness

Numerical experiment of the study was based on American Petroleum Institute's developed Van Genuchten-Burdine (API-No.4729, 2003, API-No.4760, 2007) physical model of two-phase fluid system in groundwater aquifer (see 2.3. fig.). In the result of using Van Genuchten-Burdine calculation model in the study for 30 wells used in experiment free-phase liquid actual thickness before pumping start, and after its completion, when in the borehole fully recovered, free-phase liquid and water table were calculated (modeled). With the modeling (numerical) method obtained and in borehole measured free-phase liquid layer thickness values are summarized in Table 4.1.

Table 4.1

The values of free-phase liquid layer thickness measured in the wells and calculated (modeled) numerically

No.	Well No.	Free phase liquid thickness, m			
		Measured in the well – b_n		Numerically calculated – b_a	
		Before pumping	After pumping	Before pumping	After pumping
1	7A	0.98	1.23	0.678	0.896
2	12	0.48	0.58	0.257	0.338
3	14	1.18	0.58	0.852	0.338
4	14A	2.12	1.40	1.683	1.045
5	15	1.23	1.11	0.896	0.791
6	16	1.29	1.30	0.949	0.957
7	17	1.74	1.20	1.346	0.87
8	21	1.78	1.30	1.381	0.957
9	22	1.24	1.12	0.905	0.799
10	23	1.06	0.68	0.747	0.421
11	24	0.57	0.29	0.330	0.117
12	25	0.94	0.63	0.643	0.379
13	26	1.38	1.00	1.028	0.695
14	27	1.44	1.19	1.081	0.861
15	28	1.57	1.56	1.195	1.187
16	29	1.73	1.58	1.337	1.204
17	30	1.86	1.66	1.452	1.275
18	31	2.02	1.46	1.594	1.098

No.	Well No.	Free phase liquid thickness, m			
		Measured in the well – b_n		Numerically calculated – b_a	
		Before pumping	After pumping	Before pumping	After pumping
19	32	2.38	1.68	1.914	1.293
20	33	2.43	1.73	1.959	1.337
21	34	2.42	1.59	1.950	1.213
22	35	2.38	1.59	1.914	1.213
23	36	1.97	1.06	1.550	0.747
24	37	1.68	0.79	1.293	0.514
25	38	1.18	0.61	0.852	0.363
26	40	1.17	0.03	0.843	0.007
27	41	0.43	0.15	0.218	0.039
28	42	0.45	0.50	0.234	0.273
29	43	0.49	0.25	0.265	0.091
30	44	0.01	0.05	0.004	0.011

4.2 Empirically determined free-phase liquid layer thickness

Based on data collected during pumping, for each of the 30 studied wells level recovery graph was drawn (see graphic examples in Fig. 4.1.).

Analyzing the acquired graphs in accordance with the above-described and in the scientific literature used empirical method (Aleksāns, Klimovičs, 2006, Lefebvre, 2006; Gruszczenski, 1987), all 30 boreholes studied had free-phase liquid layer actual thickness evaluated. To specify the data obtained, in addition to abovementioned evaluation, in 28 wells (out of 30 studied) free-phase liquid layer actual thickness still had to be corrected. The adjustment was necessary because in the borehole fixed free-phase liquid and water-contact surface level changes in the upper turning point in the graph theoretically may be offset along the time axis on either side and located in between two measurements. Therefore, the actual free-phase liquid layer thickness in most cases slightly differs from the one set using graph. Author's correction applied to the possible contact surface level break-even point deviation in time graph eliminates that uncertainty.

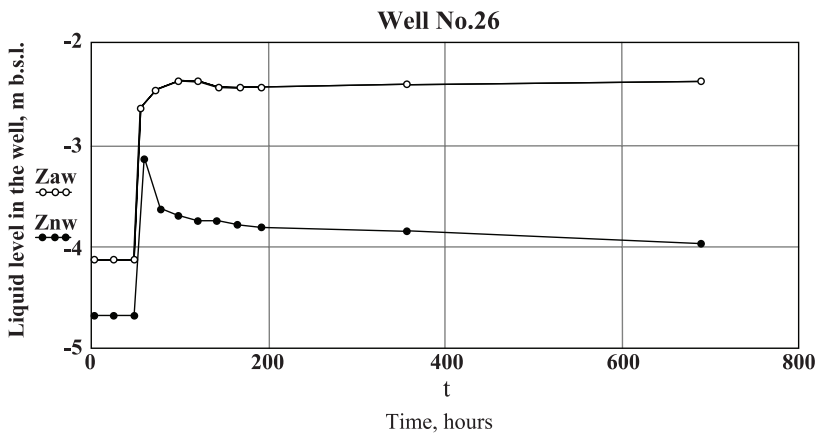
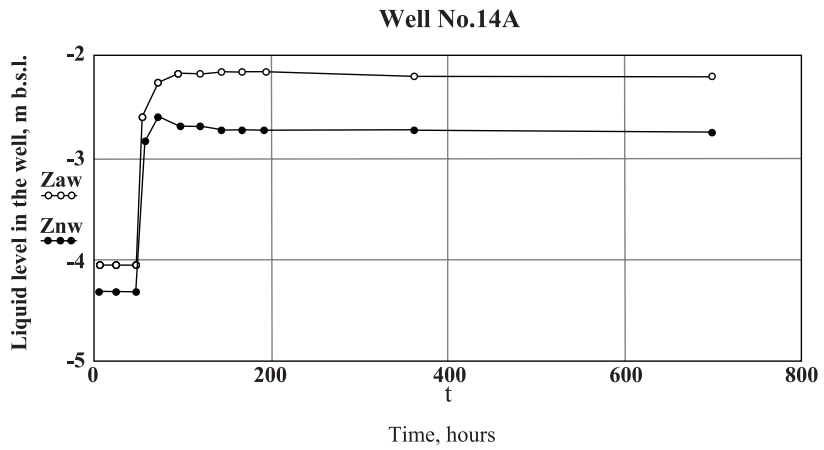


Figure 4.1 In the wells No.14A and No.26 observed free-phase liquid layer

Empirically identified and corrected free-phase liquid values are summarized in Table 4.2.

Table 4.2

Empirically discovered free-phase liquid layer thickness values

No.	Well No.	Without deviation correction	With deviation correction	No.	Well No.	Without deviation correction	With deviation correction
1	7A	0.44	0.429	16	29	0.38	0.749
2	12	0.36	0.400	17	30	0.85	0.989
3	14	0.36	0.361	18	31	1.12	1.237
4	14A	0.29	0.484	19	32	0.40	0.872
5	15	0.66	0.651	20	33	1.50	1.525
6	16	0.90	n.d.	21	34	0.23	0.713
7	17	1.15	0.871	22	35	1.23	1.213
8	21	0.95	n.d.*	23	36	0.72	0.741
9	22	1.16	1.130	24	37	0.44	0.579
10	23	0.46	0.237	25	38	0.19	0.114
11	24	0.09	0.119	26	40	0.01	0.007
12	25	0.38	0.343	27	41	0.12	0.101
13	26	0.81	0.598	28	42	0.05	0.057
14	27	0.66	0.859	29	43	0.15	0.167
15	28	1.12	1.049	30	44	0.01	0.009

* n.d. – deviation could not be determined

4.3 The data mathematical analysis results

First of all, test for the first null hypothesis H_{01} that there exists relationship between in the borehole set (measured) free-phase liquid layer thickness point values X_1 and numerically determined (designed) Y_1 values was made. Then statistical calculations for the second null hypothesis H_{02} set testing that there is relationship between the numerically calculated (designed) free-phase liquid layer thickness point values and empirically determined (experimental set) values was performed.

The study data were analyzed using a regression significance test by the Student's criterion. During the test a linear correlation equation coefficient b_1

representational parameter was determined; it describes regression line state in general set. Based on the representational coefficient the regression coefficient significance test was performed.

By means of calculation carried out it was determined that the first null hypothesis $H_{01} : b_1 = 0$ is rejected, from which it follows that regression coefficient is significant, which means that between in the borehole determined (measured) free-phase liquid layer thickness value for point values X_1 and numerically set (modeled) Y_1 values exists regularity and the equation set is presentable.

Whereas in the second null hypothesis $H_{02} : b_1 = 0$ regression coefficient significance before the critical value data set selection test showed that it is irrelevant, and the second hypothesis is valid. This in turn means that determined regression equation is not presentable and it thus can not be used for determination of the free-phase liquid actual thickness (prediction) in groundwater aquifer using pumping data.

Second null hypothesis H_{02} calculated and empirically set free-phase liquid layer thickness value's linear regression line and confidence interval limits at a probability of 95% are shown in Figure 4.2.

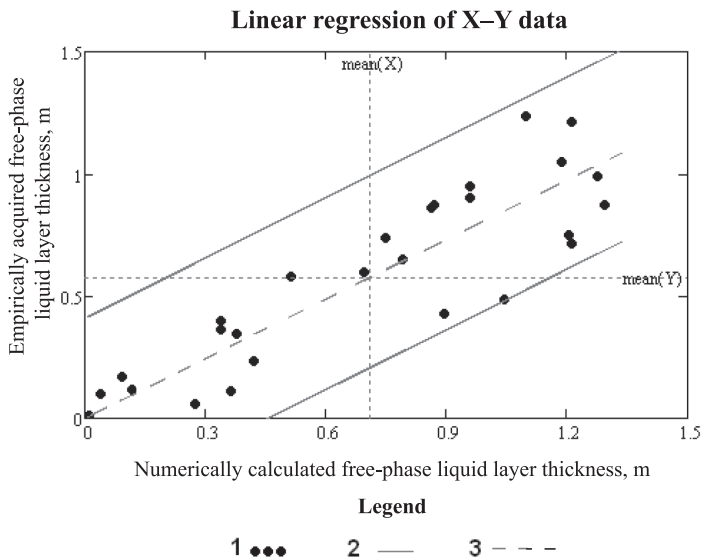


Figure 4.2 The linear regression line of free-phase liquid layer thickness values calculated (simulated) numerically and acquired empirically (before critical data values dismissing from data set)

LEGEND. 1 – X-Y values; 2 – left and right limits of critical values; 3 – the trend line

To achieve the second null hypothesis's $H_{0_2} : b_1 = 0$ regression coefficient significance conditions being satisfied from free- phase liquid layer thickness measurement sets obtained in the course of the study were examined and removed those critical values, which were located outside the regression confidence interval or near its borders. Overall, in this way were removed 12 measurements, which for various reasons turned out to be not presentable. More detail on all the reasons why this data was rejected is described under section Discussion.

After critical value removal from data set and repeated second null hypothesis's H_{0_2} statistical parameters' calculation a new regression line was derived, and on its basis repeated regression coefficient significance test was made.

The newly obtained results showed that after data sets' critical value selection the second null hypothesis $H_{0_2} : b_1 = 0$ is rejected, from which it follows that now regression coefficient is significant, but the determined equation is presentable and calculations can be used in the study, which was the objective to be proved.

Summary of regression coefficient significance test for the first and the second null hypothesis summarized in Table 4.3.

Table 4.3

Regression coefficient significance verification

Hypothesis	Representation indicator, sb_1 for regression coefficient b_1	Student's criterion's theoretical value, $t_{\alpha,v}$	Student's criterion, $ t $	Null hypothesis $H_0 : b_1 = 0$ status at $t, t_{\alpha,v}$ conditions
First null hypothesis, H_{0_1}	0.006423	2.001717	19.68387	$t > t_{\alpha,v}$ Rejected
Second null hypothesis, H_{0_2} (before data sets' critical value selection)	0.083113	2.05183	0.176607	$t < t_{\alpha,v}$ Not rejected
Second null hypothesis, H_{0_2} (after data sets' critical value selection)	0.08303	2.13145	2.239287	$t > t_{\alpha,v}$ Rejected

Based on the above findings of the two hypotheses the correlation coefficient significance determination was performed, comparing its calculated value with the critical value, which, depending on from the samples volume n and α , was determined after the table (Liepa I., 1974).

The correlation coefficient critical value comparison results seen in Table 4.4.

Table 4.4

The correlation coefficient significance verification

Hypothesis	Sample volume, n	Significance level, α	Correlation coefficient calculated, r	Correlation coeff. critical value, $r_{\alpha,n}$
First null hypothesis, H_{0_1}	60	0.05	0.998	0.253
Second null hypothesis, H_{0_2} (before data sets' critical value selection)	29	0.05	0.889	0.367
Second null hypothesis, H_{0_2} (after data sets' critical value selection)	17	0.05	0.839	0.482

For the calculated correlation coefficient value and their corresponding relationship closeness characterization table data was also used (Arhipova, Bălița, 2000). According to these figures, in all the cases described above calculated correlation coefficient values are described as functionally positive, which confirms once more that after statistical processing of data it has shown that between the regression data sets exists tight relationship and the resulting data may be used for further calculations.

Taking into account data collected according to the first and the second hypothesis two regression equations can be written:

$$Y_1 = 0.0147 + 0.8231 X_1, \quad (4.1)$$

where:

Y_1 – numerically calculated free-phase liquid layer thickness – b_a ;

X_1 – in borehole measured free-phase liquid layer thickness – b_n ;

$$Y_2 = 0.2575 + 0.5358 X_2, \quad (4.2)$$

where:

Y_2 – empirically determined free-phase liquid layer thickness – b_o ;

X_2 – numerically determined free-phase liquid layer thickness – b_a .

Replacing Y_1, X_1, Y_2 un X_2 , with b_a, b_n, b_o un b_a , respectively, we get:

$$b_a = 0.0147 + 0.8231 b_n \quad (4.3)$$

$$b_o = 0.2575 + 0.5358 b_a \quad (4.4)$$

According with the research hypothesis in the course of the study it has been established that between the modeled and measured in borehole free-phase liquid layer thickness values exists a close correlation ($r = 0.998$) and data dispersion around the regression line is minimal. Statistically processed data results suggest that numerically determined (modeled) free-phase liquid layer thickness values are real and therefore any other such parameter values obtained with different methods, including empirically, may equated with them.

Empirically determined free-phase liquid layer thickness differs from in the borehole measured and also from the numerically calculated. Author during the research demonstrated that between the empirically set and numerically calculated (modeled) free-phase liquid layer thickness values also exists correlation, which means that empirically set values can be equated with the modeled. To do this, regression equation (4.4) is rewritable as follows:

$$b_a = \frac{b_o - 0.2575}{0.5358} \quad (4.5)$$

Thus obtained (4.5) equation allows to determine free-phase liquid actual thickness in groundwater aquifer empirically based only on pumping data processing. It is not necessary to perform complex mathematical calculations with many unknown parameter usage on which such estimates are based under the existing methodology (API-No.4729, 2003; API-No.4760, 2007).

5 Discussion

Two-phase fluid vertical distribution in groundwater aquifer concept has been repeatedly changed and so has changed the hydrogeological calculation methodology. Yet in last century's 50–60's years, it was based on a standard (API-Publication, 2004), but the erroneous impression (API-Bulleten-No.18, 2003), that free-phase liquid layer in groundwater aquifer forms as strictly separated from the water floating above it lens in which 100% pore volume is filled with free-phase liquid.

As of last century 70s years (Lefebvre, 2006) subsequent studies (Brook, Corey, 1964; Genuchten, 1980) showed that capillary force influence on free-phase liquid layer deposits range in groundwater aquifer creates a complex multiphase system, in which free-phase liquid saturation of soil pores changes from its maximum percentage content in the top layer to the minimum at the bottom layer. Field studies have shown (API-Publication, 2004) that the multiphase concept is applicable to coarse granular as well as fine sand. However, the sand grain size in this concept has fundamental importance because depending on whether the sand is coarse or fine there can be seen difference between in the borehole observed (apparent) and in groundwater aquifer's saturated part actually existing (real) free-phase liquid layer thickness (Abdul et al., 1989). Rock heterogeneity effects on the two unmixable fluid vertical distribution in groundwater aquifer is well illustrated in Fig. 5.1.

The main factors resulting in the difference between in the borehole observed (apparent) and the groundwater aquifer saturated part of the actual (real) free-phase liquid layer thickness are the capillary forces in the horizon, free-phase liquid density and the degree of commitment with the mineral soil (Blake, Hall, 1984). The finer the soil is and the higher capillary forces act, the greater is the difference between the observed in the borehole and the real free-phase liquid layer thickness in groundwater aquifer saturated part (Mercer, Cohen, 1990). Given the fact that the borehole capillary forces practically do not exist, the water level will always be located below the groundwater capillary elevation zone. As a result, free-phase liquid from the groundwater capillary elevation impact zone, where water pressure from below acts on it through the pores, will move to the borehole, where capillary water pressure of this type does not exist, and fill in this space in the borehole, starting from the lowest level corresponding to the groundwater capillary zone elevation beginning in the horizon.

However, the described approach is valid for a limited free-phase liquid layer thickness values. It was found that free-phase liquid layer in the groundwater aquifer increases and reaches some kind of a certain thickness (Lefebvre, 2006), this layer mass pressure begins to overwhelm the underlying water capillary

elevation and as a result of it the difference between the in the borehole observed horizon and the free-phase liquid layer thickness declines (Aleksans, Gavena, 2008; Testa, Paczkowski, 1989). And vice versa – a decrease of free-phase liquid layer in the groundwater aquifer increases its part that is mechanically linked to the soil, resulting in this liquid losing its mobility and stoppage of prevention of its accumulation in the borehole. In this case, in the borehole observed free-phase liquid layer thickness is less than what it should be in accordance with the study design.

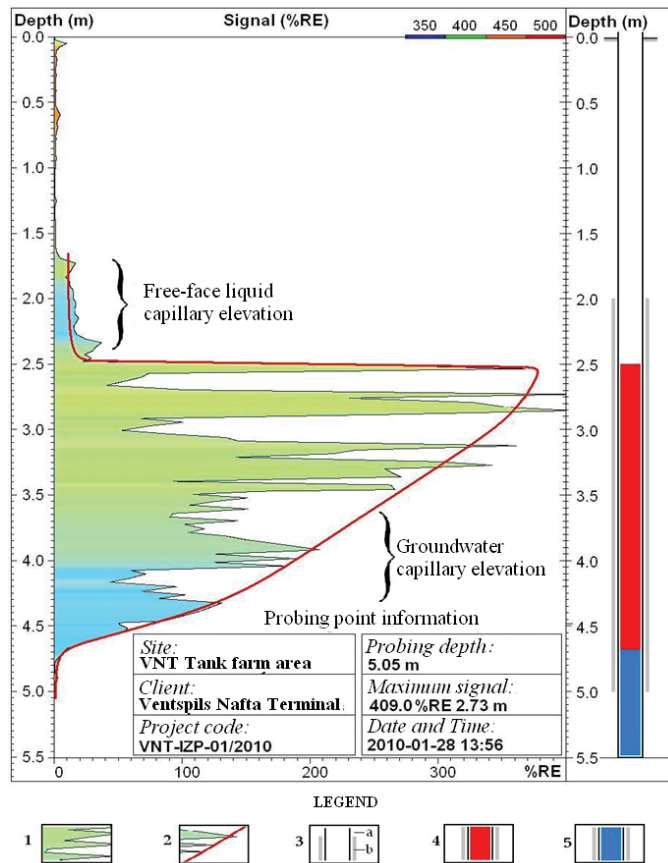


Figure 5.1 Two-phase liquid fluorescence–depth vertical profile for heterogeneous deposits aquifer

LEGEND. 1 – the total fluorescence–depth profile; 2 – match between measured (green area) and predicted by model (red line) free phase liquid saturation in the soil; 3 – well: a) casing, b) screen; 4 – free-phase liquid in the well; 5 – water in the well.

As an important additional factor in the mobile fluid volume loss by adsorption should also be mentioned the fact that all these processes result in significant changes in the rock filtration properties themselves, which even further reduces the free-phase liquid mobility in soil and with it the likelihood that such layer will form at all (Burdine, 1953; API_No.4711, 2001).

By Van Genuhten-Burdine model numerically set irretrievable (adsorbed) and mobile free-phase liquid's proportional ratio in the groundwater aquifer it is indirectly confirmed also by laser induced fluorescence probing results, which are well illustrated in Fig. 5.2. (Kalpišs, 2010).

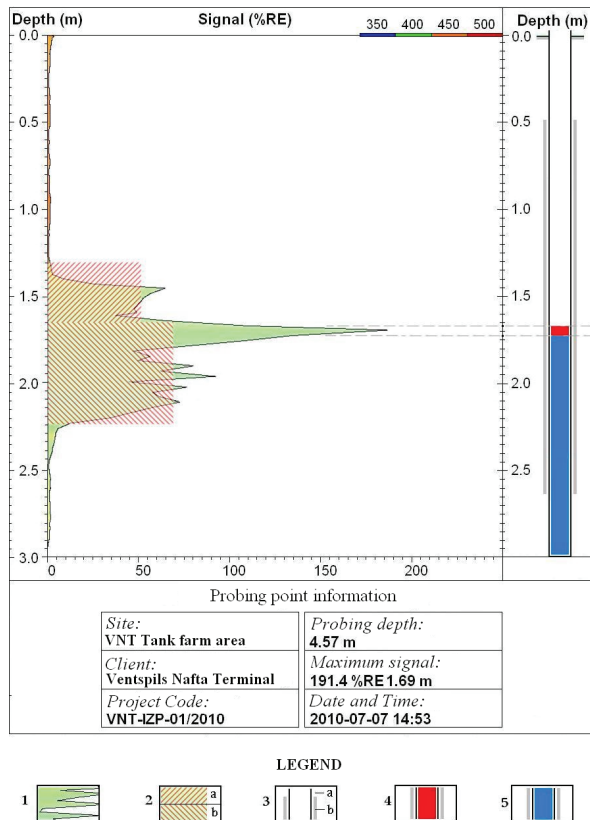


Figure 5.2 Residual and mobile free-phase liquid saturation distribution in the area of well No.44, determined in the field by LIF method

LEGEND. 1 – The total fluorescence-depth profile; 2 – residual free-phase liquid saturation: a) in vadose zone, b) in saturated zone; 3 – well: a) casing, b) screen; 4 – free-phase liquid in the well; 5 – water in the well.

All these factors are very important for trial data processing and interpretation of results. Especially when it comes to the case where free-phase liquid layer thickness is so large that its contact point with the groundwater arise such pressure that it prevents water from moving up the capillary and squeezing into a free-phase liquid saturation zone. This means that free-phase liquid layer thickness, exceeding a certain size, its actual value in the groundwater aquifer progressively will move closer to the in the borehole observed layer thickness value (Testa, Paczkowski, 1989). This fact is also confirmed by the study statistical data processing results.

Initially, in the data statistical treating process rejected empirical free-phase liquid layer thickness critical value nature shows that in this value graph two areas are to be highlighted – the left (A) and right-pointing (B) area (see Fig. 5.3). Each of these areas has its own origin and its explanation.

Right-pointing area (B), as was explained above, is related with the set empirically free-phase liquid layer thickness values exceeding 1 meter mark. On the other hand, left area (A) is related with the free-phase liquid layer thickness values of less than 0.4 meters.

The left area empirical value rejection reason (in contrast to the right side area values) likely is related to the free-phase liquid adsorbing in the groundwater aquifer rock mineral fraction, resulting in irreversible free-phase liquid saturation S_{nr} and S_{nr} . This parameter indicates the minimum amount of liquid in soil, which is required to form a stream in soil (Luckner et al., 1989). In principle, it is a fluid volume held up by capillary forces affecting sediment pores (Genuthen et al., 1985), which does not participate in a two-phase flow in the groundwater aquifer and therefore may not be shown in the borehole pumping as well as the level recovery after pumping.

During the research experiment conducted measurements in individual wells with a small free-phase liquid layer thickness showed a rather contradictory results, suggesting that during the experiment in these wells observed petroleum product free-phase liquid layer thickness changes depend not so much on the actual thickness of the layer in the groundwater aquifer, as on rock filtration properties, in whose pores this layer is located in. The finer is the sand, the weaker the filtration properties are and higher free-phase liquid adsorbing ability they possess. This fact is noted also by other similar study authors in their works (Krumbein, Graybill, 1965; Marinella et al., 1996). Above assumptions are confirmed by the study data statistical analysis.

Summarizing the above, it appears that the left area (A) critical value set dispersion is too high for the obtained regression equation being possible to be used for free-phase liquid current thickness determination (prediction) in the groundwater aquifer pumping data, when in the borehole observed free-phase liquid thickness is less than 0.4 meters.

Similar to the left (A) area, numerically and empirically calculated free-phase liquid layer thickness critical values for the right (B) area were also examined. The resulting regression line seen in Figure 5.3.

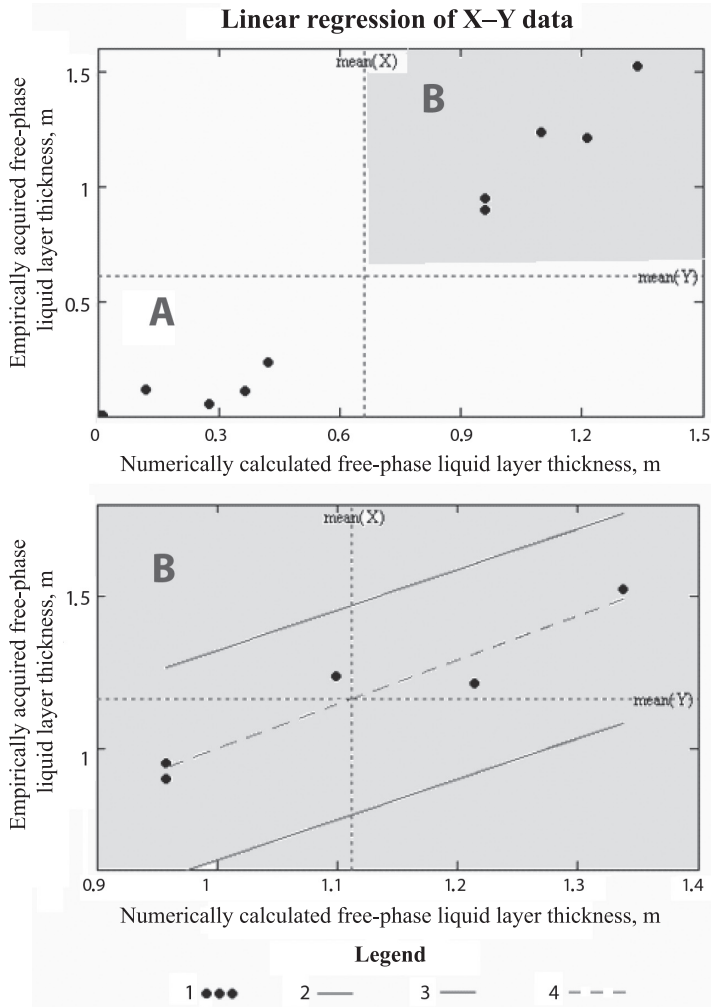


Figure 5.3 Right side (B) linear regression line of free-phase liquid layer thickness values calculated (simulated) numerically and acquired empirically

LEGEND. 1 – X–Y values; 2 – left limits of critical values; 3 – right limits of critical values; 4 – the trend line; A and B – areas of critical free-phase liquid layer thickness values acquired empirically.

Using (B) area linear correlation equation coefficient $b1$ representational parameter, significance testing by the Student's criterion for this set of values regression coefficient was made. The test determined that the 28th hole falls outside the overall calculation scheme, so its data were excluded from further calculations.

Repeated calculation excluding the 28th borehole show that the second hypothesis $H_{02}: b1 = 0$ is rejected as $t = 1.809788 > t_{\alpha, v} = 1.798118$, but it means that this hypothesis regression coefficient is important and established regression equation is presentable (see Table 5.1.).

Table 5.1

Right (B) area critical value set regression coefficient significance test

Hypothesis	Representation indicator, $sb1$ for regression coefficient $b1$	Student's criterion's theoretical value, $t_{\alpha, v}$	Student's criterion, $ t $	Null hypothesis $H_0: b1 = 0$ status at $t, t_{\alpha, v}$ conditions
Second null hypothesis, H_{02} for the right area (B) critical values data set	0.253656	1.798118	1.809788	$t > t_{\alpha, v}$ Rejected

It is necessary to note that the hypothesis regression coefficient significance conditions apply only to 83% ($\alpha = 0.17$) and lower confidence interval. It can be concluded that, although the graph's right side critical value area (B) dispersion is higher than the central area value dispersion, the obtained regression equation can be used for free-phase liquid actual thickness determination (prediction) in the groundwater aquifer using pumping data with a confidence level up to 83% according to the following equation:

$$Y_2 = 1.46 - 0.46 X_2 \quad (5.1)$$

Equation (5.1) is alternative to (4.2) but it is intended only for those in the borehole measured free-phase liquid layer values, which are larger than 1 meter.

Next, to determine the free-phase liquid actual thickness in the groundwater aquifer for values greater than 1 meter, based on pumping data as well as for a value range from 0.4 to 1.0 m equation using (4.5) is used.

Summarizing the above, it can be concluded that there is a proven link between the two studied set value parameters that were set by two different methods (empirical and analytical). This means that the pumping experiment measurement results and analytical calculation data adequately describe determined parameter numerical value and its differentiation, which in the future will allow this type of data to be used for a variety of hydrogeological calculations with statistically determined level of confidence.

Conclusions

For the first time in the Baltic country-specific hydrogeological conditions a two-phase fluid flow in the groundwater aquifer theoretical data systematic analysis as well as its verification with field experiments was realized.

The study examined in the scientific literature put forward and repeatedly proven fact that the in the observation borehole measured free-phase liquid layer thickness generally exceeds the actual layer thickness in the groundwater aquifer.

The hypothesis that there is a close correlation, which can be used for calculating the actual thickness after this layer's measured data in boreholes, between the "real" (actual) free-phase layer thickness in geological sediments and "observed" in the borehole thickness of this layer was proved.

Statistical processing of the study data was made, during which in the pumping experiment empirically gained (studied) size set of values sincerity was tested and it was compared with numerically (modeled) calculated theoretical (known) data set.

It was proven that with two different methods determined (empirical and analytical) the two sets of parameters values are real, pumping experiment measurement results and analytical calculation data adequately describe the determinable parameter numerical value and its differentiation.

For research data verification for the first time in Latvia an innovative laser induced fluorescence method was used, which is a fast and sensitive process, ideal for petroleum product free-phase liquid determination in the groundwater aquifer in direct connection with laser scanning equipment.

During the study experiments a high repeatability of measurements carried out was obtained, that allows to draw conclusion that the proposed free-phase liquid layer's thickness change detection method is very effective and at the moment there is no analogous hydrogeological research in practice in Latvia.

The research results are only a small part from the information, yet to be learnt about very topical exploration area of formation mechanisms of two-phase fluid flow in the groundwater aquifer. This clearly indicates that said direction should be further investigated in the future.

Acknowledgments

A major contribution to the elaboration of this work, as also methodological advice and recommendations for this study provided scientific director, Dr. Geology and the Latvian University Professor Valdis Segliņš. He also helped to structure and optimize the content of the study and contributed to systematic presentation of the study results.

The thesis has been developed with a financial support of the ESF project No. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060.

Methodological advice and support field strategic planning, as also pumping experiments gave VentEko Ltd. Project Manager geologist Guntis Ginters. He also gave advice on research area's geological structural characteristics, attended some geological boundary clarifying in the field. VentEko Ltd. computer graphics designer Aivars Martinovs has helped to prepare the graphic images included in the study. To these colleagues I am grateful for the contributions which they made in individual stages of the study and presentation of results gained.

The author also thanks all others VentEko Ltd. specialists for the technical support in field research activities and gratitude to all other company administrations and public services, research results of which carried out on their business areas have been used in this study with their courtesy.

Many thanks to the forthcoming geologist my son Jānis Aleksāns for the English translation of the Doctoral thesis and also to Uldis Kaknens for the final corrections.

Special thanks to all Ventspils Nafta Terminals Ltd (formerly Joint Stock Company Ventspils Nafta) technical services, environmental specialists and administrative staff, without which support and practical advice experimental realization at the study site would not be possible.

Personal thanks to Inese Martena for the help to the preparation of scientific publications volume.

References

Published materials

- Abdul, A. S., Kia, S. F., Gibson, T. L., 1989. Limitations of monitoring wells for the detection and quantification of petroleum products in soils and aquifers. *Ground Water Monitoring Review* 9(2), pp. 90–99.
- Aleksāns, O., Klimovičs, J., 2006. Naftas produktu brīvās fāzes piesārņojums gruntsūdens horizontā. Kampars, V., (red.) *Materiālzinātne un lietišķā ķīmija*. Rīga, RTU, 12.–18. lpp.
- Aleksāns, O., 2000. Virs pazemes ūdens limeņa peldošo piesārņojošo vielu slāņa faktiskā biezuma noteikšana. *Latvijas Ģeoloģijas Vēstis* (9), 35.–37. lpp.
- Aleksāns, O., 2006. Naftas produktu piesārņojuma peldošā slāņa biezuma izmaiņu monitorings. In: Brangulis, A. u. c., (red.) *Lietišķo ģeoloģisko pētījumu lauku metodes un instrumenti*. Rīga, LU, 6.–8. lpp.
- Aleksāns, O., 2008. Inovatīvo tehnoloģiju pielietojuma iespējas mūsdienu hidroģeoloģiskajos pētījumos. *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Zemes zinātne. Referātu tēzes, 66. zinātniskā konference*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 180.–182. lpp.
- Aleksāns, O., 2009. Divu datu kopu pāru regresijas analīze hidroģeoloģiskajos pētījumos. (Book). Spalviņš, A., (red.) *Boundary Field Problems and Computer Simulation*. RTU Izdevniecība, Rīga, 27.–32. lpp.
- Aleksāns, O., 2009. Naftas produktu piesārņojuma noteikšana gruntī ar lāzera izraisītās fluorescences metodi. *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Zemes zinātne. Referātu tēzes, 67. zinātniskā konference*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 162.–164. lpp.
- API-Bulleten-No.18, 2003. Answers to Frequently Asked Questions About Managing Risk at LNAPL Site. In: Adamski, M. et al. *Soil and Groundwater Research*. Washington, API Creative Services, pp. 2–3.
- API-No. 4711, 2001. Methods for Determining Inputs to Environmental petroleum Hydrocarbon Mobility and Recovery Models. (Book). *API publication*. American Petroleum Institute, Washington, pp. 5–66.
- API-No. 4729, 2003. Models for Design of Free-Product Recovery Systems for Petroleum Hydrocarbon Liquids. (Book). *Regulatory Analysis and Scientific Affairs Department*. American Petroleum Institute, Washington, p. 70.
- API-No. 4760, 2007. LNAPL Distribution and Recovery Model (LRDM-Vol.1). (Book). *Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media*. API Publication Number 4760, Washington, p. 53.
- API-Publication, 2004. API Interactive LNAPL Guide 2004. Version 2.0. (Book). *Environmental Systems & Technology (A Division of Groundwater & Environmental Services, Inc.)*. API Publications; Aquiver Inc.; Park City, Utah., Blacksburg, Virginia, p. 72.
- Aral, M. M., Liao, B., 2000. LNAPL thickness interpretation based on bail-down tests. *Ground Water* 38(5), pp. 696–701.
- Blake, S. B., Hall, R. A., 1984. Monitoring petroleum spills with wells: some problems and solutions. (Book). *Proceedings, Fourth National Symposium on Aquifer Restoration and Groundwater Monitoring*. National Water Well Association, Columbus, OH, pp. 305–310.

- Bondy, B., Backett, G. D., Joy, S., 2006. Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Parameters Database. (Book). *Regulatory Analysis & Scientific Affairs Department*. API publications; Aquifer Inc.; Park City, Utah., Washington, p. 45.
- Brook, R. H., Corey, A. T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrology* (3), p. 27.
- Buiķis, A., 1989. Pazemes filtrācijas procesu analīze pēc iespējamās avārijas. *Latvijas Ekoloģija. Informatīvais biļetens*. Ventspils/Rīga, 45.–55. lpp.
- Burdine, N. T., 1953. Relative permeability calculations from pore-size data. *Trans. A.I.M.E* (198), pp. 71–77.
- Chidley, T. R. E., Lloyd, J. W., 1977. A Mathematical Model Study of Fresh-Water Lenses. *Ground Water* 15(3), p. 215–222.
- Genuchten, M. T. V., 1980. Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* (44), pp. 892–898.
- Gruszczenski, T. S., 1987. Determination of a realistic estimate of the actual formation product thickness using monitor wells: A field bailout test. In: Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground water: Prevention, Detection, and Restoration. Dublin, Natl. Ground Water Assoc., pp. 235–253.
- Howard, K., 2005. Contaminant Hydrogeology. Section 2. (Book). *Contaminated and Hazardous Waste Site Management Course.*, Toronto, p. 53.
- Hughes, J. P., Sullivan, C. R., Zimmer, R. E., 1998. Two techniques for Determining the True Hydrocarbon Thickness in an Unconfined Sandy Aquifer. In: Proceeding of the National Water Well Association of Ground Water Scientists and Engineers and the American Petroleum Institute Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water. National Water Well Association of Ground Water Scientists and API, pp. 291–314.
- Juškevičs, V., Kondratjeva, S., Mūrnieks, A., Mūrniece, S., 1998. Latvijas ģeoloģiskā karte, mērogs 1:200 000, 41. lapa – Ventspils. (Grāmata). Paskaidrojuma teksts. Valsts ģeoloģijas dienests, Rīga, 48. lpp.
- Krumbein, W. C., Graybill, F. A., 1965. An introduction to statistical models in geology. (Book). McGraw-Hill Inc., New York, p. 475.
- Lefebvre, R., 2006. Écoulement multiphase en milieux poreux, Chapitre 8. (Book). *Volume et transmissivité des liquides immiscibles dans les sols*. Université de Québec, Québec, pp. 264–296.
- Liepa I., 1974. Biometrija. (Grāmata). *Statistika*. Zvaigzne, Rīga, 336. lpp.
- Luckner, L., Genuchten, M. T. V., Nielsen, D. R., 1989. A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface. (Book). Water Resources, US, pp. 2193–2197.
- Mandeika, R., Vircavs, V., 2008. Degvielas uzpildes staciju un naftas bāžu radītā grunts un augsnes piesārņojuma likvidācija. (Grāmata). *Studentu starptautiskās zinātniskās konferences tēzes*. Lauku Inženieru fakultāte, Vides un ūdenssaimniecības katedra, Jelgava, 109. lpp.
- Mercer, J. W., Cohen, R. M., 1990. A review of immiscible fluids in the subsurface. Properties, models, characterization, and remediation. *Journal of Contaminant Hydrology* (6), pp. 107–163.

- Merry, A., 2005. Practical Model Application for Site Assessment and Remediation. Section 3. (Book). *Contaminated and Hazardous Waste Site Management Course.*, Toronto, p. 41.
- Spalviņš, A., Janbickis, R., Lāce, I., Aleksāns, O., 2002. Ventspils naftas pārkraušanas ceha drenāžas sistēmas pētīšana ar hidroģeoloģiskā modeļa palīdzību. (Grāmata). *Starptautiskā konference EcoBalt'2002.* Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 74. lpp.
- Spalvins, A., Lāce, I., 1997. Estimating of free and trapped oil volumes for light hydrocarbon plumes in groundwater. In: Spalviņš, A., Niceckis, L., Majeviskis, A., Janbickis, R., (eds.) *Boundary field problems and computers.* Rīga, RTU, pp. 50–59.
- Spalvins, A., Slangens, J., Janbickis, R., 1997. Experiments with the ARMOS code on modeling Rumbula and Ilukste oil contaminated placesies. In: Spalviņš, A., Niceckis, L., Majeviskis, A., Janbickis, R., (eds.) *Boundary field problems and computers.* Rīga, RTU, pp. 60–84.
- Testa, S. M., Paczkowski, M. T., 1989. Volume determination and recoverability of free hydrocarbon. *Ground Water Monitoring Review* 9(1), pp. 120–128.
- Testa, S. M., Winegardner, D. L., 1991. Restoration of Petroleum Contaminated Aquifers. (Book). Levis Publishers, Chelsea, p. 42.

Unpublished materials

- Aleksāns, O., 1998. Atskaite par grunts un gruntsūdens piesārņojuma inventarizāciju AS “Ventspils nafta” naftas produktu pārkraušanas ceha teritorijā. (Atskaite). Virszemes un pazemes ūdeņu piesārņošanās un aizsardzība. VE, Ventspils, 51. lpp. [Atskaite glabājas Latgeofondā, Inv. Nr. 11798].
- Aleksāns, O., 1999. Dzelzceļa cisternu divpusējās izliešanas–uzpildīšanas estakādes Nr. 3 grunts un gruntsūdens attīrīšanas sistēmas izveides projekts. (Projekts). SIA “VentEko”, Rīga, 13. lpp. [Projekts glabājas SIA “VentEko” arhīvā: Inv. Nr. 06-01-EST-J/99-1999-01].
- Aleksāns, O., 2001. Atskaite par AS “Ventspils nafta” pārkraušanas ceha drenāžas sistēmas darbības analīzi, hidroģeoloģiskā modeļa sastādīšanu un iespējamo optimizācijas variantu izstrādi. (Atskaite). SIA “VentEko”, Rīga, 34. lpp. [Atskaite glabājas SIA “VentEko” arhīvā: Inv. Nr. 06-01-301/1-L-2001-01].
- Aleksāns, O., 2002. Tehniskais projekts drenāžas sistēmas izbūvei A/S Ventspils nafta gaišo naftas produktu un jēlnaftas izliešanas dzelzceļa estakādes Nr. 1 rekonstrukcijai. (Projekts). VentEko, Rīga, 28. lpp. [Projekts glabājas SIA “VentEko” arhīvā: Nr. 06-08-VE-120402-2002-01].
- Ališauskas, K., 1997. Ventspils pilsētas atsevišķo teritoriju pārslapinātības izpēte 1993.–1997. gadā. (Atskaite). AS “Ģeoserviss”, Rīga, 150. lpp. [Atskaite glabājas AS Ģeoserviss arhīvā].
- Juškevičs, V., 1999. Ventspils ģeoloģiskā uzbūve. Materiāli pilsētas ģenerālplāna korekcijai. (Atskaite). *Inženierģeoloģiskā izmeklēšana pilsētu detālplānojuma vajadzībām.*, Rīga, 26. lpp. [Atskaite glabājas Latgeofondā, Inv. Nr. 12266].

- Kovaļenko., F., 1996. Augšnes, tās aerācijas zonas un gruntsūdeņu piesārņojuma inventarizācija VAS Ventspils nafta 1. ceha teritorijā. (Grāmata). VNT SIA, Ventspils–Rīga, 42. lpp. [Atskaite glabājas SIA VNT arhīvā].
- Kalpišs, K., 2010. Pārskats par grunts un gruntsūdens piesārņojuma (UVOST®) izpēti un gruntsūdens novērošanas aku tīkla optimizāciju SIA Ventspils naftas termināls PC teritorijā, Talsu ielā 75, Ventspilī. (Grāmata). SIA “VentEko”, Rīga, 34. lpp. [Atskaite glabājas SIA “VentEko” arhīvā. Inv. Nr. 06-05-VNT-Izp-01/2010-2010-02].
- Levins, I., Krutofal, T., 1992. Atskaite par gruntsūdens piesārņojuma izpētes rezultātiem Ventspils naftas bāzes teritorijā. (Atskaite). Virszemes un pazemes ūdeņu piesārņošanās un aizsardzība., Rīga, 74. lpp. [Atskaite glabājas Latgeofondā, krievu val.].
- Ludāns, A., 2009. Pārskats par A/S VN PC drenāžas sistēmas darbības analīzi, hidroģeoloģiskā modeļa sastādīšanu un iespējamo optimizācijas variantu izstrādi, Talsu ielā 75. (Pārskats). SIA “VentEko”, Rīga, 34. lpp. [Pārskats glabājas SIA “VentEko” arhīvā. Inv. Nr. 06-01-VNT-MOD-01/09-2009-01].
- Podgurskis, V., Meirons, Z., Arharova, T., 1985. Pārskats par 1 : 50 000 mēroga grupveida ģeoloģisko kartēšanu lapas O-34-91-G; O-34-92-A,B,V,G; O-34-103-B,G un O-34-104-A,B,V,G teritorijā (Ventspils). (Atskaite). *Ģeoloģiskā kartēšana*. Ģeoloģijas pārvalde, Rīga, 612. lpp. [Atskaite glabājas Latgeofondā, Inv. Nr. 10297, krievu val.].
- Spalviņš, A., Šlangens, J., Lāce, I., 2009. Hidroģeoloģiskā modeļa izveide SIA “Ventspils nafta termināls” un tai piegulošajai teritorijai. (Pārskats). Aleksāns, O., (red.) RTU VMC, Rīga, 17. lpp. [Pārskats glabājas SIA “VentEko” arhīvā. Inv. Nr. 06-01-VNT-MOD-RTUVMC-2009-01].
- Tracevskis, G., Juškevičs, V., Bogdanovs, A., 1969. Pārskats par 1 : 200 000 mēroga komplekso ģeoloģisko un hidroģeoloģisko kartēšanu O-43-XXII, XXIII, XXIV lapu teritorijā. (Grāmata). *Kompleksā kvartāra nogulumu inženierģeoloģiskā un hidroģeoloģiskā kartēšana*. Ģeoloģijas pārvalde, Rīga, 583. lpp. [Atskaite glabājas Latgeofondā. Inv. Nr. 08555, krievu val.].

Internet sources

- Baltijas Vides forums, 2006. Rūpnieciskais piesārņojums. Baltijas Vides forums, Pieejams: <http://www.bef.lv/177/> [Skatīts 2011. g. 8. janvārī].
- Carkova, V., 1979. Matemātiskā statistika. Rīga: LU Pieejams: <http://home.lu.lv/~carkova/lv/studentiem/dokumenti/Stat.pdf/> [Skatīts 2011. g. 23. februārī].
- Geske, A., 2001. Datortehnoloģijas un matemātikas metožu lietošana izglītības pētījumos. Hipotēžu statistiskā pārbaude. Pieejams: <http://globalfilesearch.net/browser/lauva.liis.lv/macmat/pedagog/> [Skatīts 2011. g. 21. februārī].
- LVGMC, 2006. Piesārņoto un potenciāli piesārņoto vietu valsts datu bāze. [Online] Pieejams: <https://www.visr.eps.gov.lv/visr/default.aspx?action=2&rid=58> [Skatīts 2010. g. 15. aprīlī].
- Pospelova, G., 2004. Datorlietas. Pieejams: <http://priede.bf.lu.lv/grozs/Datorlietas/> [Skatīts: 2008. g. 2. novembrī].

List of publications

Articles in international publications and collective monographs

1. Aleksāns, O., 2009. Divu datu kopu pāru regresijas analīze hidroģeoloģiskajos pētījumos. Kolishkin, A., (red.) *RTU Zinātniskie raksti. Datormodelēšana un robežproblēmas*. Rīga, Latvija, RTU, 29.–34. lpp.
2. Aleksans, O., Gavena, I., 2008. Vacuum-enhanced recovery project at the site of former military airbase Rumbula in Riga, Latvia. In: Barnes, I., Kharytonov, M., (eds.) *Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment. NATO Science for Peace and Security Programme*. Alushta, Ukraine, Springer, pp. 495–500.
3. Aleksāns, O., Klimovičs, J., 2007. Naftas produktu brīvās fāzes piesārņojums gruntsūdens horizontā. Kampars V. (red.). *RTU Zinātniskie raksti*. Rīga, Latvija, RTU, 13.–21. lpp.
4. Aleksāns, O., 2006. Naftas produktu brīvās fāzes slāņa aktuālā biezuma noteikšanas problēmas un to iespējamie risinājumi, *Datormodelēšana un robežproblēmas* 29(5), Rīga, Latvija, RTU, 173.–182. lpp.
5. Spalvins, A., Semjonovs, I., Gosk, E., Gobins, J., Aleksans, O., 1999. Development of a Mathematical Model for Contamination Migration in the Area of the Sulphur-Tar Sludge Waste Pools in Incukalns, Latvia. In: Fendekova, M., Fendek, M., (eds.) *XXIX Congress of International Association of Hydrogeologists*. Bratislava, Slovak, pp. 253–256.
6. Spalvins, A., Slangens, J., Janbickis, R., Lace, I., Skribelis, V., Gosk, E., Aleksans, O., Semjonovs, I., 1999. Creating of regional and local hydrogeological models for waste deposit pools in Incukalns, Latvia. *Environmental Simulation* (41), pp. 44–56.
7. Aleksāns, O., Gobiņš, J., Semjonovs, I., 1997. Inčukalns – pētījumi sanācijai. Semjonovs, I., (red.) *Pazemes ūdeņu aizsardzība Latvijā*. Rīga, Latvija, Gandrs, 401.–425. lpp.
8. Levin, I., Gosk, E., Aleksans, O., 1994. Present and future for the Incukalns waste pools. In: Spalvins, A., Bleiers, J., (eds.) *Proceedings of Latvian-Danish seminar on Groundwater and Geothermal Energy*, Riga, Latvia, RTU, pp. 87–99.
9. Gosk, E., Aleksans, O., Levin, I., 1993. What to do with The Incukalns waste pools? (Book). Spalvins, A., Bleiers, J., (eds.) *Boundary Field Problems and Computers Numerical Simulation for Hydrogeology*. Riga, Latvia, RTU, pp. 4–25.

International conference and seminar thesis

1. Aleksans, O., 2009. Detection of Hydrocarbons in Soil by Laser-Induced Fluorescence Method. In: Kirstuka, I., (ed.) *International conference: Soil Degradation*. Riga, SIA "VentEko", pp. 74–77.
2. Markulis, V., Dolgiy, Anatolijs, Dolgiy, Andrejs, Zolotarev, V., Aleksans, O., Selivanov, I., 2007. Joint Interpretation of GPR Data and Results of Observation

- Wells Monitoring to Estimate the Ground Contamination Degree. In: Candansayer, M.E. et al., (eds.) *13-th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics: Near Surface 2007*. Istanbul, Turkey, EAGE, pp. 54–59.
3. Aleksans, O., Gavena, I., 2007. Groundwater remediation for fresh water resources protection. *Conference "Water & Environment"*. Kiev, International Exhibition Centre, pp. 263–264.
 4. Spalviņš, A., Šlangens, J., Janbickis, R., Lāce, I., Aleksāns, O., Selivanovs, I., 2001. Pazemes ūdens plūsmas un naftas piesārņojumu migrācijas modelēšana bijušās Rumbulas lidostas teritorijai. *Datorzinātne* (42), RTU, 64.–65. lpp.
 5. Spalvins, A., Slangens, J., Janbickis, R., Lace, I., Aleksans, O., 2000. Mathematical Models as Powerful Tools to Optimize Remediation Measures for Sulphur Acid Waste Pools at Incukalns, Latvia. In: *NordSoil Conference on Soil and Groundwater Pollution: expanding Possibilities for Nordic-Baltic Co-operation*. Vilnius, Geological Survey of Lithuania, pp. 89–91.
 6. Spalvins, A., Slangens, J., Janbickis, R., Lace, I., Aleksans, O., Snitko, P., 1998. Simulation of Oil Contamination Migration in Area of Sewage Water Treatment Plant of Venspils Seaport. In: Merkurjev, Y. et al (eds.) *A Publication of the Society for Computer Stimulation International*. Riga, Latvia, RTU, pp. 48–50.
 7. Aleksāns, O., Gobins, J., Kalnina, D., Vulfa, L., Vitricak, I., 1996. Groundwater remediation alternatives at a sulphuric acid – tar waste disposal site in Latvia. In: Korenman, M., (ed.) *International Ecological Congress*. Voronezh, Russia, Kansas State University, p. 46.

Conference and seminar thesis in Latvia

1. Aleksāns, O., Dimitrijevs, E., 2011. Lāzera izraisītās fluorescences metodes iespējas organiskā piesārņojuma noteikšanai gruntī. *Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 264.–266. lpp.
2. Aleksāns, O., Dimitrijevs, E., 2009. Naftas produktu piesārņojuma noteikšana gruntī ar lāzera izraisītās fluorescences metodi. *Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 162.–166. lpp.
3. Aleksāns, O., 2008. Inovativo tehnoloģiju pielietojuma iespējas mūsdienu hidroģeoloģiskajos pētījumos. *Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 180.–182. lpp.
4. Aleksāns, O., 2007. Divfāzu šķidrums dinamika gruntsūdens horizontā. *Ģeogrāfija, ģeoloģija vides zinātne*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 117.–119. lpp.
5. Aleksāns, O., 2006. Naftas produktu piesārņojuma peldošā slāņa biezuma izmaiņu monitorings. Brangulis, A. et al., (red.) *Lietišķo ģeoloģisko pētījumu lauku metodes un instrumenti*. Rīga, LU, 6.–8. lpp.
6. Aleksāns, O., 2001. Naftas produktu piesārņojuma pētīšana bijušās Rumbulas lidostas pazemes ūdeņos. Naftas savākšanas metožu izvēle. *Lietišķo ģeoloģisko pētījumu lauku metodes un instrumenti*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 218.–220. lpp.

7. Spalviņš, A., Šlangens, J., Janbickis, R., Lāce, I., Aleksāns, O., Selivanovs, I., 2001. *Aviācijas degvielas izraisītā pazemes ūdeņu piesārņojuma modelēšana bijušajā Rumbulas lidostā*. Rīga, Latvija: SIA "VentEko".
8. Aleksāns, O., Zilāns, A., Spalviņš, A., Janbickis, R., Šlangens, J., 1997. Naftas produktu izlijumu modelēšana Rumbulas un Ilūkstes objektos. *LU 56. zinātniskā konference*. Rīga, LU, 4. lpp.
9. Aleksāns, O., 1996. Ilūkstes naftas pārsūkņēšanas stacijas teritorijas piesārņojuma pētījumi. In: *LU 55. zinātniskā konference*. Rīga, LU, 11. lpp.

Other publications

1. Aleksāns, O., 2000. Virs pazemes ūdens līmeņa peldošo piesārņojošo vielu slāņa faktiskā biezuma noteikšana. *Latvijas Ģeoloģijas Vēstis (9)*, 35.–37. lpp.
2. Aleksāns, O. et al., 1993. Incukalns Waste Pools, Problem or Asset. *Service report*, Copenhagen, DGU Geological Survey of Denmark.
3. Aleksans, O., Levin, I., Gosk, E., 1994. Incukalns investigation, completion report. *Service report Nr. 24*. Copenhagen, DGU Geological Survey of Denmark, pp. 4–55.
4. Levin, I., Aleksans, O., Gosk, E., 1994. Incukalns Investigation, Groundwater Contamination at the Southern Waste Pool Site. *Service report Nr. 25*. Copenhagen, DGU Geological Survey of Denmark.