

DISERTATIONES GEOLOGICAE UNIVERSITAS LATVIENSIS
Nr.20

OLĢERTS ALEKSĀNS

**DIVFĀZU ŠĶIDRUMA PLŪSMA GRUNTSŪDENS
HORIZONTĀ**

DISERTĀCIJA

RĪGA, 2011

DISERTATIONES GEOLOGICAE UNIVERSITAS LATVIENSIS
Nr.20

OLĢERTS ALEKSĀNS

**DIVFĀZU ŠĶIDRUMA PLŪSMA GRUNTSŪDENS
HORIZONTĀ**

DISERTĀCIJA

doktora grāda iegūšanai ģeoloģijas nozares
lietišķās ģeoloģijas apakšnozarē

LATVIJAS UNIVERSITĀTE

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, *doc., Dr. geol.*, Latvijas Universitāte

Māris Kļaviņš, *prof., 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 finansējusi Latvijas Universitāte.

Ar promocijas darbu 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

SATURS

Ievads	8
Pētījuma mērķis	9
Pētījuma aktualitāte.....	9
Pētījuma galvenie uzdevumi.....	10
Darbu novitāte.....	11
Praktiskā pielietojamība.....	11
Rezultātu aprobācija	12
Pateicības	15
Tekstā izmantotie saīsinājumi un apzīmējumi.....	16
Tekstā izmantotie akronīmi	17
Lietoto terminu saraksts	18
1. Divfāzu šķidrumu plūsmas pazemes ūdeņos teorētiskais pamatojums	20
2. Pētījuma teritorijas raksturojums.....	24
2.1. Pētījuma vietas izvēle un pētījuma priekšmeta detalizācija	24
2.2. Ventspils eksperimentālais laukums.....	26
2.2.1. Pētījumu teritorijas ģeoloģiskā uzbūve.....	27
2.2.2. Pētījumu rajona hidroģeoloģiskie apstākļi	30
2.3. Pētījumu objekta raksturojums	32
3. Materiāli un metodes	38
3.1. Eksperimenta realizācijas procedūra	38
3.1.1. Pētījuma plānojums	38
3.1.2. Eksperimenta realizācija.....	41
3.1.3. Iegūto datu analīze un sistematizēšana.....	44
3.2. Pētījuma analītiskās metodes.....	45
3.2.1. Skaitliskās analīzes metode	46
3.2.2. Empīriskā metode.....	52
3.3. Datu statistiskā apstrāde	58
3.3.1. Pētījuma hipotēzes izvirzīšana	58
3.3.2. Nozīmības līmeņa pieņemšana.....	59
3.3.3. Korelācijas analīze.....	60
3.3.4. Regresijas vienādojuma izvēle	62
3.3.5. Lineārās regresijas koeficientu noteikšana	63
3.3.6. Regresijas būtiskuma analīze izvirzītās hipotēzes pārbaudei	65
4. Rezultāti	66
4.1. Skaitliski noteiktais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums	66
4.2. Empīriski noteiktais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums.....	68

4.3. Pētījuma datu matemātiskās analīzes rezultāti	72
5. Diskusija.....	84
Secinājumi	95
Izmantotā literatūra	97
Publicētā	97
Nepublicētā.....	102
Interneta resursi.....	104
Disertācijas pielikums.....	106
Teksta tabulu saraksts.....	107
Teksta attēlu saraksts	110
Tekstā izmantoto Vienādojumu saraksts	114
Izmantoto fizikālo lielumu, apzīmējumu un mērvienību saraksts	119

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.

ABSTRACT

The doctoral thesis is dedicated to analyze of two-phase liquids hydro-geological 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 hydro-geological solutions, as well as to investigate the development trends of those methods and their potential usage in the future.

The study proves that after pumping from the well is terminated, 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: diphasic liquid flow, non-aqueous phase liquids, free phase, actual layer thickness, groundwater aquifer, oil products, pollution.

IEVADS

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).

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

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 diskutēts par šo teorētisko jautājumu atbilstību dabā novērotajam, par teorētisko modeļu aprobāciju un pārbaudi, ņemot vērā lauka mērījumu rezultātus.

Bīstamākās un apjomīgākās naftas produktu noplūdes notiek no pazemes cauruļvadiem, tvertnēm un rezervuāriem, kuru rezultātā var veidoties naftas produktu brīvās fāzes piesārņojums gruntsūdens horizontā, bet tā savlaicīga konstatācija ir tehniski sarežģīta un apgrūtināta. Divfāzu šķidrums nosacījumiem gruntsūdens horizontā nav piemērojami tradicionālie, pazemes ūdeņu plūsmas un tās dinamiku aprakstošie vienādojumi. Šeit darbojas daudzfaktoru vide, kuras izzināšanai ir vajadzīgas jaunas metodes, bet tās var iegūt vienīgi veicot mērķtiecīgus pētījumus un eksperimentus. Neskatoties uz augstāk minēto, Latvijā šādi pētījumi ir ļoti ierobežoti, bet to trūkums liedz vides speciālistiem, hidroģeologiem un inženieriem iegūt nepieciešamos parametrus NP piesārņojuma izplatības ierobežošanai un teritoriju sanācijas projektu izstrādei.

Veiktais pētījums ir balstīts uz lauku novērojumu rezultātu apkopojumu, to analīzi un salīdzināšanu ar parametriem, kas iegūti ar jaunākajām, uz empīriskiem aprēķiniem balstītām, teorētiskām metodēm. Pētījums ir balstīts uz eksperimentāliem un praktiskiem mērījumiem lauku apstākļos, kas veikti vienā no Ventspils pilsētas rūpnieciskās zonas piesārņojuma objektiem – SIA Ventspils Naftas termināls (VNT) naftas produktu

noliešanas estakādes rajonā rezervuāru parka teritorijā. Papildus izmantoti arī pētījumu rezultāti, kas iegūti līdzīgos objektos citās Latvijas vietās.

Promocijas darba apjoms ir 96 lpp. (bez pielikuma); tas satur 20 teksta tabulas un 29. teksta attēlus un 42 vienādojumus.

Pētījuma mērķis

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.

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), pētījumu 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).

Pētījuma aktualitāte

Pētījums aptver pēdējo desmit gadu laikā autora iegūto lauka novērojumu rezultātu apkopojumu un to analīzi. Tas ir balstīts uz eksperimentāliem un praktiskiem mērījumiem urbumos un ir 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 izzināšanai 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.

Pētījuma galvenie uzdevumi

Promocijas darba ietvaros tika izvirzīti vairāki pētījuma pamatuzdevumi, kas vērsti uz jaunu praktisku divfāzu šķidruma plūsmas gruntsūdens horizontā likumsakarību noteikšanas metožu meklēšanu un jau zināmo metožu teorētisko pārbaudi, kā arī visu šo metožu piemērošanas iespēju apzināšanu 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 atsūknēšanas datu apstrādi.

Ļoti būtiski bija arī noteikt svarīgākos kritērijus, kas ietekmē brīvās fāzes šķidruma slāņa biezumu gruntsūdens horizontā, kā arī galvenos faktoros, kuru ietekmē veidojas starpība starp urbumā nomērīto šķietamo brīvās fāzes šķidruma slāņa biezumu un šī šķidruma aktuālo biezumu gruntsūdens horizontā.

Pirms pētījuma eksperimentu uzsākšanas bija nepieciešams precīzi definēt pētījuma metodes, izstrādāt eksperimenta plānu un tā izpildes procedūru, kā arī izvēlēties attiecīgo tehnisko nodrošinājumu, kas ļautu šos eksperimentu realizēt nepieciešamajā līmenī un kvalitātē.

Pētījuma sākumā svarīgi bija izvēlēties eksperimenta vietu un detalizēt pētījuma priekšmetu, izpētīt eksperimentālā laukuma ģeoloģiskos un hidroģeoloģiskos apstākļus, kā arī apzināt un raksturot pašu pētījuma objektu.

Ļoti svarīgi bija noteikt gruntsūdens horizontu raksturojošos pamatkritērijus, kas iespaido brīvās fāzes šķidruma slāņa veidošanās mehānismu un tā biezumu poraino nogulumu horizontā, tas ir – piesātināto iežu litoloģisko sastāvu, to heterogenitāti, nogulumu filtrācijas īpašības, fizikāli mehāniskos rādītājus u.c.

Nākamais svarīgs pētījuma uzdevums bija noteikt svarīgākos divfāzu šķidrumu sistēmu ietekmējošos fizikālos un ķīmiskos faktoros, kā iespaidā urbumā nomērītais (šķietamais) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums atšķiras no šī šķidruma aktuālā (patiesā) biezuma gruntsūdens horizontā – šķidrumu kapilāro spēku mijiedarbība porainajā vidē, brīvās fāzes vielas blīvums un tā saistības pakāpe ar minerālo grunti u.c.

Pētījuma nosacījumi tāpat paredzēja analizēt iegūtos datus un atsūknēšanas eksperimenta mērījumu rezultātus, lai pārbaudītu, vai analītisko aprēķinu dati adekvāti raksturo nosakāmā parametra skaitlisko vērtību un šī parametra variēšanu. Svarīgi bija izdalīt un raksturot likumsakarības, kas var negatīvi ietekmēt rezultāta ticamību, veikt kļūdaino rezultātu (noraidīto vērtību) analīzi, raksturot to rašanās iemeslus un iespējamus risinājumus kļūdu novēršanai.

Kā pēdējais uzdevums bija izdalīt un raksturot traucējošos faktoros, kas var negatīvi ietekmēt rezultāta ticamību, veikt kļūdaino rezultātu (noraidīto vērtību) analīzi, raksturot to rašanās iemeslus un iespējamus risinājumus kļūdu novēršanai.

Lai izpildītu izvirzīto mērķi, tika izvērtētas visas pieejamās jaunāko teorētisko metožu izstrādnes, analizēta publicētā zinātniskā literatūra (Nyer et al., 1996; Aral, Liao, 2000; Lefebvre, 2006; Bondy et al., 2006), pētījumu 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

Atšķirībā no iepriekšēji veiktajiem līdzīgas ievirzes pētījumiem Latvijā (Aleksāns, 2006; Buiķis, 1989; Spalvins, Lace, 1997; Spalvins et al., 1997; Spalviņš et al., 2002; Aleksāns, Klimovičs, 2006), promocijas darba autora pētījumā pirmo reizi realizēta divfāzu šķidrums plūsmas gruntsūdens horizontā teorētisko datu sistemātiska analīze un to pārbaude ar lauku eksperimentu rezultātiem: noteiktas likumsakarības, novērtēti apstākļi un rezultātus ietekmējošie faktori. Veiktais pētījums ir orientēts tieši uz Latvijas ģeoloģiski hidroģeoloģiskajiem apstākļiem, kas ļauj pilnīgāk apzināt divfāzu šķidrums plūsmas īpatnības naftas produktu piesārņojuma vietās Latvijā.

Autora pētījuma rezultātu analīzei izmantota datu statistiskā apstrāde, ar augstu analītisko kvalitāti nosakot sakarību starp urbumā novēroto (šķietamo) un gruntsūdens horizontā esošo (aktuālo) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezumu. Līdzīgi pētījumi agrāk Latvijā nav veikti un līdz šim zinātniskā literatūrā (Aleksāns, 2006; Buiķis, 1989; Spalvins, Lace, 1997; Spalvins et al., 1997) galvenokārt tika akcentēti brīvās fāzes šķidrums gruntsūdens horizontā teorētiskie aspekti, bet netika diskutēti jautājumi par minēto teorētisko rezultātu atbilstību dabā novērotajam. Tam ir vairāki iemesli, starp kuriem svarīgākais ir lauka pētījumu ar *in situ* novērojumiem tehniskā sarežģītība un to realizācijai nepieciešamais ievērojamais laiks. Autora veiktais pētījums ir pirmais šāda veida eksperiments, kur brīvās fāzes šķidrums plūsmas gruntsūdens horizontā teorētiskie aspekti ir pamatoti ar plašu lauku novērojumu datu bāzi.

Pētījumā iegūto datu verificēšanai pirmo reizi Latvijā pielietota inovatīva lāzera izraisītās fluorescences (LIF) metode. Fluorescences spektroskopija šodien ir viena no jaukākajām tehnoloģijām pasaulē (Aldstadt et al., 2002), kas piemērota aromātiskās struktūras molekulu novērošanai pētāmajā vidē. Viena no šāda veida ogļūdeņražu grupām ir policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži (PAO), kas veido lielāko daļu naftas produktu. Fluorescences spektroskopija, pēc būtības, ir ātrs un jūtīgs process, kas padara šo metodi ideāli piemērotu naftas produktu (NP) brīvās fāzes šķidrums noteikšanai gruntsūdens horizontā tiešsaistes skanēšanas ceļā ar speciālu šim nolūkam izstrādātu lāzera zondēšanas iekārtu UVOST.

Latvijā šāda veida pētījums ir pirmais un tāpēc tajā iegūtie rezultāti ir tikai neliela daļa no tās informācijas, kas vēl apgūstama ļoti aktuālajā divfāzu šķidrums plūsmas gruntsūdens horizontā veidošanās mehānisma izzināšanas jomā. Tas nepārprotami norāda uz to, ka šajā virzienā pētījumi ir jāturpina arī nākotnē.

Praktiskā pielietojamība

Pētījuma gaitā pierādīts, ka starp urbumā nomērītajām, empīriski noteiktajām un skaitliski aprēķinātajām (modelētajām) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtībām eksistē korelācija un visas šīs vērtības ir savā starpā salīdzināmas. Tas nozīmē, ka izmantojot pētījumā izstrādāto metodi, brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālo biezumu gruntsūdens horizontā ir iespējams noteikt empīriski, balstoties tikai uz urbumu atsūkšanās eksperimenta datiem. No tā izriet, ka turpmāk varēs iztikt bez sarežģītiem matemātiskiem aprēķiniem ar daudzu nezināmu parametru izmantošanu, kā tas notika agrāk saskaņā ar tradicionāli pielietojamajām metodēm (API-No.4729, 2003; API-No.4760, 2007).

Lauku apstākļos iegūtā un statistiski pamatotā divfāzu šķidrums plūsmas gruntsūdens horizontā aktuālā biezuma noteikšanas metode, paver jaunu iespēju dažādu

hidroģeoloģisko uzdevumu risināšanai tehniski sarežģītās teritorijās: naftas terminālos, ostās, naftas produktu noplūdes vietās no cauruļvadiem, pilsētu rūpnieciskajās zonās u.c.

Latvijā plaši sastopamais naftas produktu brīvās fāzes piesārņojums gruntsūdens horizontā (LVĢMC, 2006; Mandeika, Vircavs, 2008) savā atrašanās vietā kļūst par sekundāru piesārņojuma avotu un gadu desmitus var turpināt piesārņot gruntsūdeni ar izšķīdušiem ogļūdeņražiem, bet tā objektīvai novērtēšanai ir nepieciešami speciāli pētījumi un šo pētījumu realizācijas metodikas. Latvijā šādi pētījumi līdz šim bija veikti ļoti ierobežoti un to trūkums liedza vides speciālistiem, hidroģeologiem un inženieriem iegūt nepieciešamos parametrus NP 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.

Izstrādāta un pētījuma eksperimenta rezultātu analīzei pielietota datu statistiskās apstrādes procedūra, kas turpmāk var tikt izmantota dažāda veida eksperimentu datu analīzei lietišķajā ģeoloģijā un hidroģeoloģijā (Aleksāns, 2009).

Pētījumā iegūtie rezultāti ir laba pieredze aktuālajā divfāzu šķidrums plūsmas gruntsūdens horizontā veidošanās mehānisma izziņāšanas jomā, kas paver plašas iespējas šo rezultātu praktiskam pielietojumam gruntsūdens horizontā notiekošās divfāzu šķidrums plūsmas hidroģeoloģiskajiem aprēķiniem nākotnē.

Rezultātu aprobācija

Balstoties uz pētījuma rezultātiem līdz 2011. gadam sagatavotas vairāk kā 30 zinātniskas publikācijas par atsevišķām pētījuma sadaļām un darbu kopumā, no kurām 9 raksti publicēti starptautiskos izdevumos un kolektīvajās monogrāfijās, 7 publikācijas satur starptautisko konferenču un semināru tēzes, 9 Latvijā nolasīto referātu publicētās tēzes, kā arī 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.

Raksti starptautiskajos izdevumos un kolektīvajās monogrāfijās:

- 1) Aleksāns, O., 2009. Divu datu kopu pāru regresijas analīze hidroģeoloģiskajos pētījumos. Kolishkin, A. u. c., (red.) *RTU zinātniskie raksti. Datormodelēšana un robežproblēmas*. Rīga, Latvija, RTU, lpp. 29-34.
- 2) Aleksāns, 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. u.c. (red.). *RTU zinātniskie raksti*. Rīga, Latvija, RTU, lpp. 13-21.
- 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, lpp. 173-182.

- 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, lpp.401-425.
- 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.

Starptautisko konferenču un semināru referātu tēzes.

- 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, lpp.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, lpp.64-65.
- 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) 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, lpp. 264-266.
- 2) Aleksāns, O., Dimitrijevs, E., 2009. Naftas produktu piesārņojuma noteikšana gruntī ar lāzera izraisītās fluorescences metodi. *Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, lpp. 162-166.
- 3) Aleksāns, O., 2008. Inovatīvo tehnoloģiju pielietojuma iespējas mūsdienu hidroģeoloģiskajos pētījumos. *Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, lpp.180-182.
- 4) Aleksāns, O., 2007. Divfāzu šķidrums dinamika gruntsūdens horizontā. *Ģeogrāfija, ģeoloģija vides zinātne*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, lpp. 117-119.
- 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, lpp. 6-8.
- 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, lpp. 218-220.
- 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., Zīlāns, A., Spalviņš, A., Janbickis, R., Šlangens, J., 1997. Naftas produktu izlijumu modelēšana Rumbulas un Ilūkstes objektos. *LU 56. zinātniskā konference*. Rīga, LU, lpp. 4.
- 9) Aleksāns, O., 1996. Ilūkstes naftas pārsūkņēšanas stacijas teritorijas piesārņojuma pētījumi. In *LU 55. zinātniskā konference*. Rīga, LU, lpp.11.

Citas publikācijas.

- 1) Aleksāns, O., 2000. Virs pazemes ūdens līmeņa peldošo piesārņojošo vielu slāņa faktiskā biezuma noteikšana. *Latvijas ģeoloģijas vēstis (9)*, lpp. 35-37.
- 2) Aleksāns, O. et al., 1993. Incukalns Waste Pools, Problem or Asset. *Service repor*, 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

Referāti starptautiskos kongresos, konferencēs un semināros.

- 1) RTU 50. starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 2009.
- 2) Starptautiskā zinātniskā konference *Soil Degradation*, Rīga, 2009.
- 3) NATO Advanced Research Workshop, Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment, Alushta, Ukraine, 2008.

- 4) 13-th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, P54, Istanbul, Turkey, 2007.
- 5) RTU 47. starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 2006
- 6) Starptautiskā konference *EcoBalt-2002*, Rīga, 2002.
- 7) RTU 42. starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 2001.
- 8) Starptautiskā konference *EcoBalt-2001*, Rīga, 2001.
- 9) Starptautiskā konference *NordSoil Conference on Soil and Groundwater Pollution: expanding Possibilities for Nordic-Baltic Co-operation*. Vilnius, 2000.
- 10) Starptautiskā konference *EcoBalt-2000*, Rīga, 2000.
- 11) Starptautisks seminārs, *Modeling and simulation within a maritime environment*, Rīga, 1998.
- 12) Starptautiski-zinātniski praktisks seminārs, *Naftas termināli Austrumbaltijā – vides problēmas*, Rīga, 1997.
- 13) International Ecological Congress. Voronezh, Russia, 1996.

Referāti Latvijas konferencēs un semināros.

- 1) LU 69. zinātniskā konference, Rīga, 2011.
- 2) LU 67. zinātniskā konference, Rīga, 2009.
- 3) LU 66. zinātniskā konference, Rīga, 2008.
- 4) LU 65. zinātniskā konference, Rīga, 2007.
- 5) LU 64. zinātniskā konference, Rīga, 2006;
- 6) LU lauku seminārs, Lietišķo ģeoloģisko pētījumu lauku metodes un instrumenti, Lodesmuiža, Latvija, 2006;
- 7) LU 60. zinātniskā konference, Rīga, 2001;
- 8) LU 56. zinātniskā konference, Rīga, 1997;
- 9) LU 55. zinātniskā konference, Rīga, 1996;
- 10) LU 54. zinātniskā konference, Rīga, 1995;

Papildus augstāk minētajam, brīvās fāzes šķidrums peldošā slāņa aprēķinu metode ir aprobēta un pārbaudīta arī dažādos ģeoloģiskajos un ekoloģiskajos pētījumos, kas veikti gan Latvijā gan arī citās Eiropas valstīs. Dažādu pārskatu, atskaišu un ziņojumu skaits par šiem pētījumiem pārsniedz vairākus desmitus, daļa no kuriem savu atspoguļojumu ir guvuši arī šī promocijas darba ietvaros.

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 Nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060 finansiālu atbalstu.

Metodiskās konsultācijas un atbalstu lauku darbu plānošanā, kā arī atsūkņēšanas 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 datorgrafīkis Aivars Martinovs. Minētajiem

kolēģiem esmu pateicīgs par ieguldījumu, kuru viņi sniedza pētījuma atsevišķu posmu realizācijā un iegūto rezultātu noformēšanā.

Autors tāpat pateicas visiem citiem SIA VentEko speciālistiem par sniegto tehnisko atbalstu lauku pētījumu veikšanai un pateicība 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.

Personīga pateicība Inesei Martenai par nesavtīgo palīdzību promocijas darba teksta noformēšanā un tematiski vienotās zinātnisko publikāciju kopas kopiju sagatavošanā.

TEKSTĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

atm.	atmosfēra (spiediena mērvienība)
att.	attēls
dnn.	diennakts
kr.	krievu
lpp.	lappuses
n.z.v.	no zemes virsmas
piem.	piemēram
tab.	tabula
t.i.	tas ir
vienādoj.	vienādojums
u.c.	un citi
v.j.l.	virs jūras līmeņa
val.	valoda
z.j.l.	zem jūras līmeņa

TEKSTĀ IZMANTOTIE AKRONĪMI

API	American Petroleum Institute (Amerikas Naftas Institūts)
BC	Brūka-Koreja modelis
BFŠS	Brīvās fāzes šķidrums slānis
DTI	Dakota Technologies, Inc.
FM	Fizikālais modelis
LIF	Lāzera izraisītā fluorescences
LR	Latvijas Republika
LU	Latvijas Universitāte
LVĢMC	SIA Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs
MM	Matemātiskais modelis
NP	Naftas produkti
NPBFS	Naftas produktu brīvās fāzes slānis
PAO	Policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži
ROST	Rapid Optical Screening Tool
SE	Skaitliskais eksperiments
UVOST	Ultra-Violet Optical Screening Tool
VARAM	Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija
VE	SIA VentEko, www.venteko.com
VG	Van Genuhtena modelis
VNT	SIA Ventspils Naftas termināls, www.vnt.lv

LIETOTO TERMINU SARAKSTS

Nr. pk.	Termins	Skaidrojums
1.	Aerācijas zona	Slānis starp zemes virsu un gruntsūdens līmeni, kura poras daļēji aizpildītas ar gaisu
2.	Aktuālais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums	Nesajaukta (homogēna, noslāņota) divfāzu šķidrums vienas fāzes slāņa faktiskais biezums gruntsūdens horizontā
3.	Brīvās fāzes šķidrums slānis	No ūdens brīvs (nesamaisīts, noslāņots) vieglās fāzes šķidrums slānis
4.	Divfāzu šķidrums plūsma	Divu nesajaucošos šķidrumu maisījuma plūsma gruntsūdens horizontā
5.	Divfāzu šķidrums	Heterogēns (nehomogēns, neviendabīgs) divu nesajaucošos šķidrumu maisījums
6.	Ģeoloģiskā pamatinformācija	Datu kopums par zemes dziļu uzbūvi, īpašībām un resursiem
7.	Ģeoloģiskā/hidroģeoloģiskā izpēte	Visi darbi ģeoloģiskās/hidroģeoloģiskās informācijas iegūšanai un papildināšanai, neatkarīgi no mērķiem
8.	<i>In situ</i>	Uz vietas (<i>latīniski</i>)
9.	Kapilārais pacēlums	Augstums, kurā pārvietojas šķidrums pa grunts porām kapilāro spēku ietekmē
10.	Kapilārais spiediens	Kapilāro spēku ietekmē nogulumu porās šķidrums radītais spiediens
11.	Kapilārā mitrumietilpība	Kapilāro spēku ietekmē nogulumu porās aizturētais ūdens apjoms
12.	Naftas produkti	Naftas destilēšanas produkti vai to maisījums: benzīns, petroleja, dīzeļdegviela, mazuts, eļļas
13.	Naftas produktu brīvās fāzes slānis	Brīvās fāzes slānis, kuru veido naftas produkti
14.	Naftas produktu peldošais slānis	Divfāzu šķidrums virsējais naftas produktu slānis
15.	Naftas produktu piesārņojums	Skatīt „Piesārņojums”
16.	Pazemes ūdens	Visi ūdeņi, kas iegūti zem zemes virsas
17.	Pazemes ūdens horizonts	Ar ūdeni piesātināts iežu vai nogulumu slānis, kura fiziskās īpašības nodrošina ūdens filtrāciju tajā

Nr. pk.	Termins	Skaidrojums
18.	Piesārņojums	Tāda tieša vai netieša emisijas ietekme uz vidi, kas var apdraudēt cilvēku veselību, nodarīt kaitējumu īpašumam, rada vai var radīt kaitējumu videi, tai skaitā ekosistēmām, traucēt dabas resursu izmantošanu vai citādi traucēt likumīgu vides izmantošanu.
19.	Piesārņota vieta	Augsne, zemes dzīles, ūdens, dūņas, kā arī ēkas, ražotnes vai citi objekti, kas satur piesārņojošas vielas.
20.	Pjezometriskais vai hidrostatiskais līmenis	Spiedienūdens līmenis urbumā, kas izteikts metros no zemes virsas vai absolūtajās atzīmēs
21.	Potenciāli piesārņota vieta	Augsne, zemes dzīles, ūdens, dūņas, kā arī ēkas, ražotnes vai citi objekti, kuri, pēc nepārbaudītas informācijas, satur vai var saturēt piesārņojošas vielas.
22.	Sanācija	Piesārņotas vietas attīrīšana un atveseļošana vismaz līdz tādai pakāpei, ka turpmāk cilvēku veselība vai vide netiek apdraudēta un attiecīgo teritoriju iespējams izmantot noteiktai saimnieciskai darbībai.
23.	Sprostslānis	Iežu vai nogulumu slānis, kurš praktiski nelaiž cauri ūdeni
24.	Vides aizsardzība	Pasākumu kopums vides kvalitātes saglabāšanai un dabas resursu ilgtspējīgas izmantošanas nodrošināšana.
25.	Vides normatīvie akti	Normatīvie akti, kas attiecas uz vidi vai palīdz sasniegt valsts vides politikas mērķus — saglabāt, aizsargāt un uzlabot vides kvalitāti, ilgtspējīgi izmantot dabas resursus un nodrošināt kvalitatīvu dzīves vidi.
26.	Vides zinātne	zinātnes nozare, kas pēta vides sastāvdaļu savstarpējo mijiedarbību un to mijiedarbību ar cilvēka veidoto vidi, kā arī cilvēka saimnieciskās darbības ietekmi uz vidi un tās sastāvdaļām.
27.	Vieglās fāzes šķidrums slānis	Divfāzu šķidrums vieglākās (virsējās) fāzes slānis
28.	Viela	Jebkurš ķīmiskais elements vai ķīmisku elementu savienojums.

1. DIVFĀZU ŠĶIDRUMU PLŪSMAS PAZEMES ŪDEŅOS TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS

Brīvās fāzes šķidrums slānis (BFŠS) gruntsūdens horizontā ir no ūdens brīvs, nesamaisīts un noslāņots šķidrums, kas pastāv atsevišķas fāzes veidā un, saskaroties ar ūdeni vai gaisu, nesajaucas ar tiem. Atšķirīgo ūdens un brīvās fāzes šķidrums fizikālo un ķīmisko īpašību dēļ starp diviem šķidrumiem veidojas fiziska saskarne, kas nepieļauj šo šķidrumu sajaukšanos. Brīvās fāzes šķidrumi parasti tiek klasificēti vai nu kā vieglie, kuru blīvums ir mazāks nekā ūdenim, vai arī smagie brīvās fāzes šķidrumi, kuru blīvums ir lielāks nekā ūdenim (Huling, Weaver, 1991). Šī promocijas darba ietvaros tiek analizēta divfāzu šķidrums sistēma gruntsūdens horizontā, kur viens no šķidrumiem ir ūdens, bet otrs – vieglais brīvās fāzes šķidrums.

Brīvās fāzes šķidrums slānis daudzās vietās visā valsts teritorijā ir par cēloni gruntsūdens kvalitātes pasliktināšanai, kam par iemeslu parasti ir naftas produktu izlijumi gruntī un gruntsūdenī (LVĢMC, 2006; Aleksans, Gavena, 2008). Naftas produkti ir daudzkomponentu bioloģisks maisījums, kura sastāvā ir ķīmiskas vielas ar dažādas pakāpes šķīdību ūdenī (Charles et al., 1995; Spalvins et al., 1999; Aleksans et al., 1996). Dažas no šīm vielām, piemēram, metil-terc-butilēteris un spirts ļoti labi šķīst ūdenī. Savukārt citas sastāvdaļas, piemēram, benzols, toluols, etilbenzols un ksiloli ūdenī šķīst salīdzinoši sliktāk (Mercer, Cohen, 1990). Tas kopumā liek secināt, ka naftas produktu brīvās fāzes šķidrums slānis ir ilgtermiņa gruntsūdens piesārņojuma avots, kas var negatīvi ietekmēt pazemes ūdeņu kvalitāti daudzu gadu desmitu garumā un tāpēc tā izziņāšanai ir liela gan praktiska, gan arī pētnieciska nozīme.

Zinātniskā literatūrā ir plaši atzīts un vairākkārtīgi pierādīts (Aral, Liao, 2000; Lefebvre, 2006; Aral, Liao, 1996; API-No.4760, 2007; Gruszczenski, 1987; Hughes et al., 1998), ka novērošanas urbumā nomērītais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums parasti pārsniedz faktisko šī slāņa biezumu horizonta nogulumos urbumam piegulošajā zonā. Starpību starp „patieso” (aktuālo) brīvās fāzes slāņa biezumu ģeoloģiskajā slānī un „vērojamo” šī slāņa biezumu urbumā galvenokārt nosaka urbumam piegulošo iežu kapilārās īpašības, kā arī gruntsūdens līmeņa pazemināšanās (depresija) virs tā esošā brīvās fāzes šķidrums slāņa svara (spiediena) ietekmē (API-No.4760, 2007). Tāpēc salīdzinoši neliels brīvās fāzes šķidrums apjoms gruntī dažreiz var veidot ievērojamu brīvās fāzes šķidrums slāni urbumā. Aktuālā un urbumā novērojamā slāņa biezumu starpības lielumu ietekmē arī urbuma konstrukcija, gruntsūdens līmeņa vertikālās svārstības, kā arī brīvās fāzes izplatības areāla robežas tuvums mērāmajam urbumam (Aral, Liao, 1996).

Vienu no pirmajiem pētījumiem par brīvās fāzes šķidrums aktuālā slāņa biezuma noteikšanas iespējām jau 1987. gadā veica T. S. Gruženskis (Thomas S. Gruszczenski). Veiktā pētījuma metode balstījās uz atsūknēšanas paņēmienu (angliski – *bail down test*), kura laikā no urbuma tiek atsūknēts ūdens kopā ar brīvās fāzes šķidrums līdz urbumā pilnībā izzūd virs ūdens peldošais brīvās fāzes šķidrums slānis. Tad atsūknēšanu pārtrauc un turpmāk novēro gruntsūdens un virs tā esošās brīvās fāzes šķidrums līmeņa atjaunošanos urbumā. Eksperimentā tika noskaidrots, ka sākumā notiek abu līmeņu celšanās, bet pēc kāda laika ūdens līmenis urbumā sāk pazemināties. Saskaņā ar T. S. Gruženska. pieņēmumu, brīdī, kad urbumā novērojamais ūdens līmenis ir visaugstākais, brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums tajā atbilst „patiesajam” brīvās fāzes šķidrums slāņa biezumam gruntsūdens horizontā.

Veikto pētījumu rezultātā tika piedāvātas vairākas empīriskas shēmas kā pārvērst urbumā novēroto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezumu šī slāņa faktiskajā biezumā nogulumu formācijā (Pastrovich et al., 1979). Vēlāk, 1991. gadā S. M. Testa un D. L.

Vinegardners (Testa, Winegardner, 1991) vienlaicīgi ar brīvās fāzes šķidrums aktuālā biežuma empīrisku aprēķina metodi piedāvāja arī divus citus paņēmienus, kā šī slāņa „patieso” biežumu noteikt tieši uz vietas tā izplatības areālā. Pirmā no minētām metodēm balstās uz sausās urbšanas paņēmieni, kad visā urbuma dziļumā no serdes tiek ņemti paraugi, kuros nosaka brīvās fāzes šķidrums daudzumu iezī vizuāli (Testa, Winegardner, 1991). Savukārt otrais paņēmienis paredz paraugošanas skatrakuma ierīkošanu līdz brīvās fāzes šķidrums slāņa ieguram virsmai un turpmāko grunts paraugu ņemšanu tieši no peldošā slāņa intervāla to analīzei laboratorijā, vai arī nosakot brīvās fāzes piesātinājuma pakāpi gruntī vizuāli (Testa, Winegardner, 1991).

Turpinot T. S. Gružinska aizsākto pētījumu (Gruszczenski, 1987), J. P. Huges 1998. gadā piedāvāja atšķirīgu atsūkšanās (*bail down test*) metodi (Hughes et al., 1998), kuras pamatā ir tikai brīvās fāzes šķidrums atsūkšanās no urbuma bez ūdens piemaisījuma. Atbilstoši šai metodei sūkšanās laikā tiek mērīts gan brīvās fāzes šķidrums slāņa līmenis, gan arī tā saskares virsmas ar ūdeni dziļums urbumā.

Papildus šiem diviem rādītājiem nepārtraukti tiek mērīts arī atsūkšamā šķidrums daudzums laika vienībā (debits). Saskaņā ar šo teoriju sākumā sūkšanās debits ir konstants, bet tad kādā brīdī tas sāk samazināties. J. P. Huges paredzēja, ka tieši tajā brīdī, kad sākas debita samazināšanās, var noteikt brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālo biežumu gruntsūdens horizontā. Autors pieņem, ka tas ir vienāds ar starpību starp nomērīto brīvās fāzes šķidrums līmeni urbumā pirms sūkšanās uzsākšanas un šo pašu līmeni, kāds tas ir urbumā uz brīdī, kad sākas sūkšanās debita samazināšanās (Hughes et al., 1998).

T. Gružinska un J. Huges iegūto datu skaidrojumam atšķirīgu interpretāciju 2000. gadā piedāvāja M. M. Arals un B. Liao (Aral, Liao, 2000). Šie autori savā darbā parādīja, ka brīvās fāzes šķidrums aktuālā biežuma noteikšanas rezultātus var būtiski ietekmēt tādi parametri kā horizonta iezū filtrācijas un kapilārās īpašības, brīvās fāzes šķidrums blīvums un viskozitāte. Svarīgi atzīmēt, ka šie parametri patiešām netika ņemti vērā T.S. Gružinska un J.P. Huges pētījumos un tas ļauj M. M. Aralam un B. Liao secināt, ka, neņemot vērā visus minētos ietekmējošos faktorus, ar atsūkšanās (*bail down test*) paņēmieni noteiktais brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālais biežums ne vienmēr ir korekts (Aral, Liao, 2000).

Blakus iepriekšēji minētajiem pētījumiem, zinātniskajā literatūrā sastopamas arī atšķirīgas, mazāk zināmas citu pētnieku piedāvātās brīvās fāzes šķidrums slāņa biežuma aprēķinu metodes. Šeit minami tādu autoru kā T.L. Pastroviča (EPA-510-R-96-001, 1996), R.A. Halla un S.B. Bleika. (Hall et al., 1984), T.P. Balestero (Ballestero et al., 1994), H.O. Šiega (Schiegg, 1987), A.M. Farra (Farr et al., 1990), R.J. Lenharda un J.C. Parkera (Lenhard, Parker, 1990), kā arī citu autoru pētījumi. Neskatoties uz to, ka pētījumos izmantotās metodes ir salīdzinoši vienkāršas, tām tomēr ir būtiski trūkumi un šo autoru piedāvātie aprēķini var tikt izmantoti tikai aptuvenai brīvās fāzes šķidrums slāņa biežuma noteikšanai (EPA-510-R-96-001, 1996).

Atzīstams un vērā ņemams ir arī vēlākajos gados veiktais Kvebekas Universitātes profesora R. Lefebvre pētījums par daudzfāzu šķidrums plūsmu porainā vidē (Lefebvre, 2006). R. Lefebvre ļoti detalizēti un uzskatāmi apraksta divfāzu šķidrums spiediena spēku sadalījumu novērošanas urbumā, kas ir viens no atslēgas momentiem divu nesajaucamo šķidrums plūsmas gruntsūdens horizontā dinamikas izpratnei.

Paralēli augstāk minētajiem pētījumiem deviņpadsmitā gadsimta 80-tajos gados pasaulē strauji sāka attīstīties divfāzu šķidrums plūsmas datormodelēšana, izmantojot šim nolūkam speciāli izveidotas programmas. Viens no pirmajām analītisko aprēķinu modeļiem, kas paredzētas divfāzu šķidrums apstākļu modelēšanai gruntsūdens horizontā, tika izstrādāts sadarbībā ar Amerikas Naftas institūtu. Šis modelis ir balstīts uz Van Genuchtena - Burdine divfāzu šķidrums sistēmas gruntsūdens horizontā aprēķinu

vienādojumiem (Burdine, 1953; Genuchten, 1980) un ir paredzēts brīvās fāzes šķidrums izplatības porainā vidē analīzei vienam vai diviem savstarpēji izolētiem pazemes ūdeņu horizontiem (API-No.4729, 2003).

Izmantojot par pamatu Van Genuchtena - Burdine divfāzu šķidrums sistēmas gruntsūdens horizontā analītisko modeli, Amerikas Vides tehnoloģiju un sistēmu institūts ES&T (*Environmental Systems & Technologies, Inc*) izstrādāja vairākas dažādas sarežģītības un nozīmes savas modelēšanas programmas: ARMOS, SpillCAD, BioTRANS. Viena no šīm programmām (ARMOS - *Areal Multiphase Organic Simulator*), sākot ar 1996. gadu ir sekmīgi izmantota arī modelēšanai Latvijas apstākļiem (Spalvins et al., 1997; Spalviņš et al., 2001; Spalvins et al., 1998; Spalvins et al., 2000).

Pašlaik Amerikas naftas institūtā ir izstrādātas vairākas brīvās fāzes šķidrums modelēšanas programmas, viena no kurām ir izmantota arī šī pētījuma datu verificēšanai: *LNAPL Distribution and Recovery Model*, vai saīsināti – LRDM (API-No.4760, 2007). Šī programma tāpat kā Van Genuchtena - Burdine divfāzu šķidrums sistēmas gruntsūdens horizontā fizikālais modelis ļauj aprēķināt naftas produktu piesārņojuma izplatīšanās parametrus poraino nogulumu vidē.

Kvantitatīvai divfāzu šķidrums plūsmas aprakstīšanai gruntsūdens horizontā liela nozīme ir dažāda veida parametriem, kas raksturo gan pašas grunts īpašības, gan arī tajā esošās vielas un šeit notiekošos procesus. Šajā nolūkā tika veikti daudzi speciāli pētījumi un tajā skaitā arī laboratorijas testi, kuru rezultāti ir apkopoti dažādās datu bāzēs un programmās. Viena no populārākajām iežu fizikāli mehānisko un hidroģeoloģisko parametru datu bāzēm ir *Enviro-Base Pro*, kuru ir izstrādājis Amerikas uzņēmums *Waterloo Hydrogeologic Inc.* (*Enviro-Base_Pro*, 2011). Savukārt informācija par dažādu ķīmisko vielu īpašībām ir pieejama Amerikas Naftas institūta sagatavotajā brīvās fāzes šķidrums parametru datu bāzē (Beckett, Steven, 2003; Bondy et al., 2006).

Loti svarīgi ir parametri par gruntī esošo šķidrums, t.i. – ūdens un brīvās fāzes šķidrums kapilārajiem spēkiem un to mijiedarbību horizonta nepiesātinātajā, daļā. Šo parametru aprēķināšanai ASV Lauksaimniecības departamenta Pētījumu dienestā tika izstrādāta programma hidraulisko aprēķinu veikšanai ūdens nepiesātinātajām gruntīm – RETC (Genuthen et al., 1991).

Netieši saistīti, bet nozīmīgi promocijas darba rezultātu verificēšanai ir arī jaunākie tehniskie sasniegumi organisko vielu identificēšanai dažāda veida ģeoloģiskajos nogulumos. Šeit pirmkārt minama tāda ģeofizikāla pētījums metode kā lāzera izraisītās fluorescences (LIF) spektrometrija, kuras pielietojums pirmsākumi attiecināmi uz pagājušā gadsimta deviņdesmitajiem gadiem.

Pirmos darbus LIF iekārtas izveides un tās pilnveidošanas jomā veica ASV Jūras pētniecības, attīstības, pārbaudes un novērtēšanas nodaļa (*Naval Research, Development, Test, and Evaluation Division – NRaD*) sadarbībā ar ASV Armijas ūdensceļu un izmēģinājums staciju (*Waterways Experimental Station – WES*) un Ziemeļdakotas uzņēmums (*Dakota Technologies, Inc. – DTI*). ASV Gaisa spēku atbalstīto LIF projektu realizēja G. D. Gillispie kopā ar kolēģiem no Ziemeļdakotas Valsts Universitātes un Dakotas Tehnoloģiju uzņēmums DTI (Gillispie, 1993).

Vairāku institūciju un uzņēmums sadarbības rezultātā tika izstrādāta komerciāla LIF iekārta, kas pazīstama kā *Rapid Optical screening tool* (ROST) sistēma. Iesākumā Amerikas Savienotajās Valstīs bija septiņas šādas ROST LIF sistēmas, no kurām divas piederēja ASV Gaisa Spēkiem. No atlikušajām piecām iekārtām, tikai vienas īpašnieks – Dakotas Tehnoloģiju uzņēmums bija pieejams pētniecībai. ROST sistēma šajā laikā bija paredzēta divu gredzenu aromātiskos ogļūdeņražus noteikšanai (Aldstadt et al., 2002).

Pašlaik šī iekārta ir būtiski modernizēta un tā saucas UVOST® (*Ultra-Violet Optical Screening Tool*). Bez ASV tā ir pieejama arī citās valstīs. Pavisam pasaulē ir 14 šādas iekārtas. Eiropā divas iekārtas ir Vācijā, viena Lielbritānijā un viena Latvijā. Pēdējās sertificēts pakalpojumu sniedzējs ir SIA VentEko (Aleksans, 2009).

VentEko iekārta tiek plaši pielietota naftas produktu piesārņojuma noteikšanai Latvijā un arī citās Eiropas valstīs (Igaunija, Lietuva, Austrija, Vācija). Apjomīgi lāzera izraisītās fluorescences pētījumi veikti arī promocijas darba eksperimentālajā laukumā (Kalpišs, 2010), kuri vēlāk sekmīgi izmantoti autora pētījumā iegūto datu un aprēķinu rezultātu verificēšanai uz vietas objektā.

Brīvās fāzes šķidrums slāņa klātbūtnes gruntsūdens horizontā noteikšanai bez lāzera izraisītās fluorescences metodes ir veikti arī cita veida ģeofizikālie pētījumi, tajā skaitā arī Latvijā (Markulis et al., 2007). Šeit kā viens no perspektīvākajiem šāda veida pētniecības virzieniem ir minama radiolokācijas zondēšana. Tomēr, atšķirībā no LIF metodes, radiolokācijas paņēmiens ir vairāk piemērots brīvās fāzes šķidrums veidojošās vielas adsorbētās frakcijas noteikšanai gruntī un mazāk noderīgs šī šķidrums peldošā slāņa pētījumiem. Turklāt arī šīs metodes izšķirtspēja ir salīdzinoši zemāka, lai to pielietotu precīzos aprēķinos (Markulis et al., 2007).

2. PĒTĪJUMA TERITORIJAS RAKSTUROJUMS

2.1. Pētījuma vietas izvēle un pētījuma priekšmeta detalizācija

Promocijas darba realizācijai sākuma posmā tika izvēlēta atbilstoša pētījuma vieta ar Latvijas teritorijai raksturīgiem ģeoloģiskiem un hidroģeoloģiskiem apstākļiem, kuros veidojas pētītā divfāzu šķidrums plūsma. Kā viens no objektīvākajiem informācijas avotiem šādas pētījumu vietas kritēriju noteikšanai ir Latvijā izveidotā un internetā publiski pieejamā datu bāze: Piesārņoto un potenciāli piesārņoto vietu reģistrs (LVĢMC, 2006). Šī datu bāze satur 3567 ierakstus, no kuriem 2655 jeb 74% ir potenciāli piesārņotas vietas, kuras izdalītas, balstoties uz netiešu, ar laboratorijas analīzēm vai speciāliem pētījumiem neapstiprinātu informāciju. Savukārt 669 datu bāzē izdalītās vietas (19%) ir klasificētas kā potenciāli nepiesārņotas, bet 243 (7%) vietas - kā piesārņotas, ko apstiprina šeit veikto ģeoloģisko un hidroģeoloģisko pētījumu laikā noņemto grunts un gruntsūdens paraugu laboratorijas analīžu rezultāti. No šīm 243 piesārņotajām vietām 192 gadījumā, jeb 78% gruntī vai gruntsūdenī esošajā piesārņojumā ir konstatēta naftas produktu klātbūtne un tikai 51 vietā (22%) – cita veida piesārņojums (dati apkopoti situācijai uz 2010. gadu).

Lai noteiktu pētījumu vietas svarīgākos izvēles kritērijus, kas šo vietu raksturotu kā Latvijas apstākļiem raksturīgu divfāzu šķidrums plūsmas objektu, promocijas darba ietvaros tika detalizēti analizētas datu bāzē esošā 192 piesārņotā vieta, kas tika izvēlēta pēc vairāku kritēriju summas:

- vismaz viena no piesārņojošajām vielām ir naftas produkti,
- naftas produktiem ir jābūt izveidojušiem virs gruntsūdens peldošu brīvās fāzes šķidrums slāni vai arī tas var potenciāli šeit veidoties vēlāk, ilgākā laika periodā.

Datu bāzes analīze norādīja, ka ir zināmas 49 vietas (26%), kurās naftas produkti ir izveidojuši virs gruntsūdens peldošu brīvās fāzes šķidrums slāni un 143 vietas (jeb 74%), kurās šāds slānis var potenciāli veidoties vēlāk, ilgākā laika periodā.

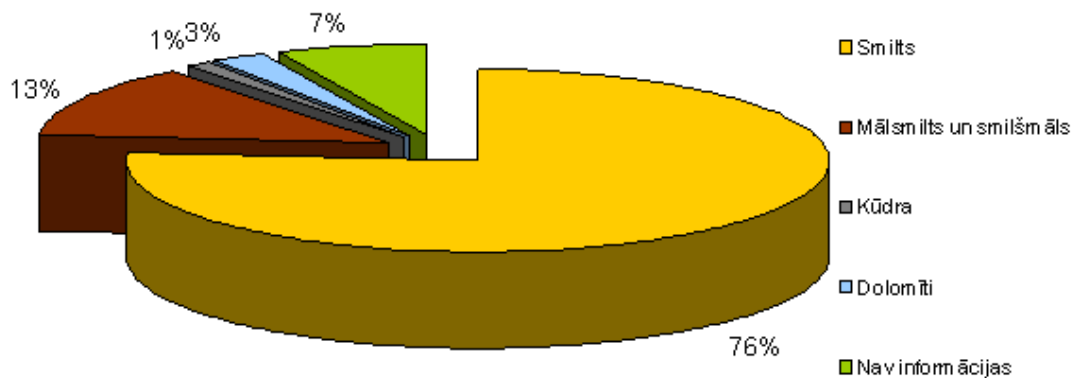
Pētījuma vietas izvēlē kā papildus kritērijs tika izvirzīta prasība, lai brīvās fāzes šķidrums slānis atrastos tādā pazemes ūdeņu horizontā, kurā visbiežāk ir sastopama divfāzu plūsma Latvijas ģeoloģiski hidroģeoloģiskajos apstākļos. Ir zināms, ka brīvās fāzes šķidrums slānis var atrasties gandrīz jebkurā ūdens horizontā, tomēr, ņemot vērā to, ka Latvijas apstākļos gruntsūdens ir vismazāk dabiski aizsargāts, tad tieši šis horizonts ir visvairāk pakļauts naftas produktu piesārņojumam (Semjonovs, 1997). To apstiprina arī veiktā piesārņoto un potenciāli piesārņoto vietu datu bāzes analīze (LVĢMC, 2006), kas norāda, ka no visām 192 reģistrā fiksētajām ar naftas produktiem piesārņotajām vietām tikai 5 gadījumos (3%) šis piesārņojums ir konstatēts dziļākos (t. sk. arī pamatiežu) horizontos. No 6 datu bāzē reģistrētajām naftas produktu piesārņotajām vietām ģeoloģiskā informācija nav pieejama, tomēr salīdzinoši droši var konstatēt, ka dziļāk par gruntsūdeni esošo ūdens horizontu piesārņošanās ar naftas produktiem Latvijas ģeoloģiskajos apstākļos caurmērā nepārsniedz 5-6% no kopējā šī piesārņojuma objektu skaita.

Nākamais svarīgais faktors virs gruntsūdens peldoša brīvās fāzes šķidrums slāņa veidošanās mehānismā ir ūdeni saturošo nogulumu litoloģiskais sastāvs, jeb precīzāk – šo nogulumu kapilārās īpašības, kas faktiski arī nosaka divu nesajaucos šķidrums vertikālā sadalījuma raksturu gruntsūdens horizontā (API-No.4760, 2007). Jo mālaināki ir nogulumi, jo lielāki kapilārie spēki darbojas un mazāka iespēja pastāv, ka šeit veidosies divfāzu šķidrums plūsma, tā kā šajos nogulumos esošais šķidrums ir aizturēts porās vai arī tas ir cieši saistīts (adsorbēts) ar minerālu graudu virsmu (Luckner et al., 1989). Minēto apstiprina piesārņoto un potenciāli piesārņoto vietu datu bāzē esošās informācijas analīzes rezultāti. No 49 objektiem, kuros ir konstatēts virs gruntsūdens peldošs brīvās fāzes

šķidrums slānis (26% no 192 datu bāzē fiksētajām ar naftas produktiem piesārņotajām vietām), 47 vietās (jeb 94% gadījumos) ūdens horizontu veido smilšainie nogulumu un tika 3 vietās citi ieži (pa vienai: kūdrā, dolomītos un morēnas mālsmilts).

Piesārņoto un potenciāli piesārņoto vietu datu bāzes analīzes rezultāti norāda, ka tieši smilšaino nogulumu gruntsūdens horizonts ir viens no mazāk aizsargātākajiem pret naftas produktu piesārņojuma iekļūšanu tajā (2.1. att.). Par to liecina sekojošie iegūtie dati:

- no 192 ar naftas produktiem piesārņotajām vietām 146 gadījumos (jeb 76% vietu) ir piesārņota smilts;
- 25 vietās (13%) – mālsmilts un smilšmāls,
- 2 (1%) – kūdra,
- 5 (3%) – pamatiežu dolomīti,
- bet 13 (7%) gadījumos piesārņoto iežu litoloģiskais sastāvs nav zināms (tas nav uzrādīts datu bāzē).



2.1. attēls. Ar naftas produktiem piesārņoto iežu procentuālais sadalījums pēc to litoloģiskā sastāva

Figure 2.1. Petroleum-contaminated rock percentage depending of its lithological composition

Kā papildus kritērijs pētījuma vietas izvēlei tika izvirzīts nosacījums piesārņojošajai vielai. Pētījuma vajadzībām bija svarīgi izvēlēties tādu objektu, kurā divfāzu šķidrums plūsmu veido heterogēnu (neviendabīgu) divu nesajaucos šķidrumu maisījums, kurā viens šķidrums ir gruntsūdens ar dabiskās mineralizācijas pakāpi $<1.0 \text{ mg} \times \ell^{-1}$, bet otrs – kāda no vielām, kas naftas produktu piesārņojuma vietās sastopama visbiežāk. Šāds nosacījums tika izvirzīts, lai, pirmkārt, eksperimenta gaitu mazāk ietekmētu dažādi blakus faktori (piem., paaugstināta ūdens mineralizācija) un, otrkārt, lai tas būtu Latvijas apstākļiem tipisks piesārņojums, kas nodrošinātu pētījuma eksperimentam reprezentativitāti.

Datu bāzē pieejamās 192 naftas produktu piesārņotās vietas analīze parādīja, ka 108 gadījumos, jeb 57% piesārņojuma cēlonis šajās vietās tādā vai citādā veidā ir benzīns un/vai dīzeldegviela, 11 gadījumos (6%) – tie ir citi naftas produkti (mazuts, petroleja jēlnafts, eļļas u.c.), bet 72 vietām (37%) datu bāzē konkrēta piesārņojošā viela nav

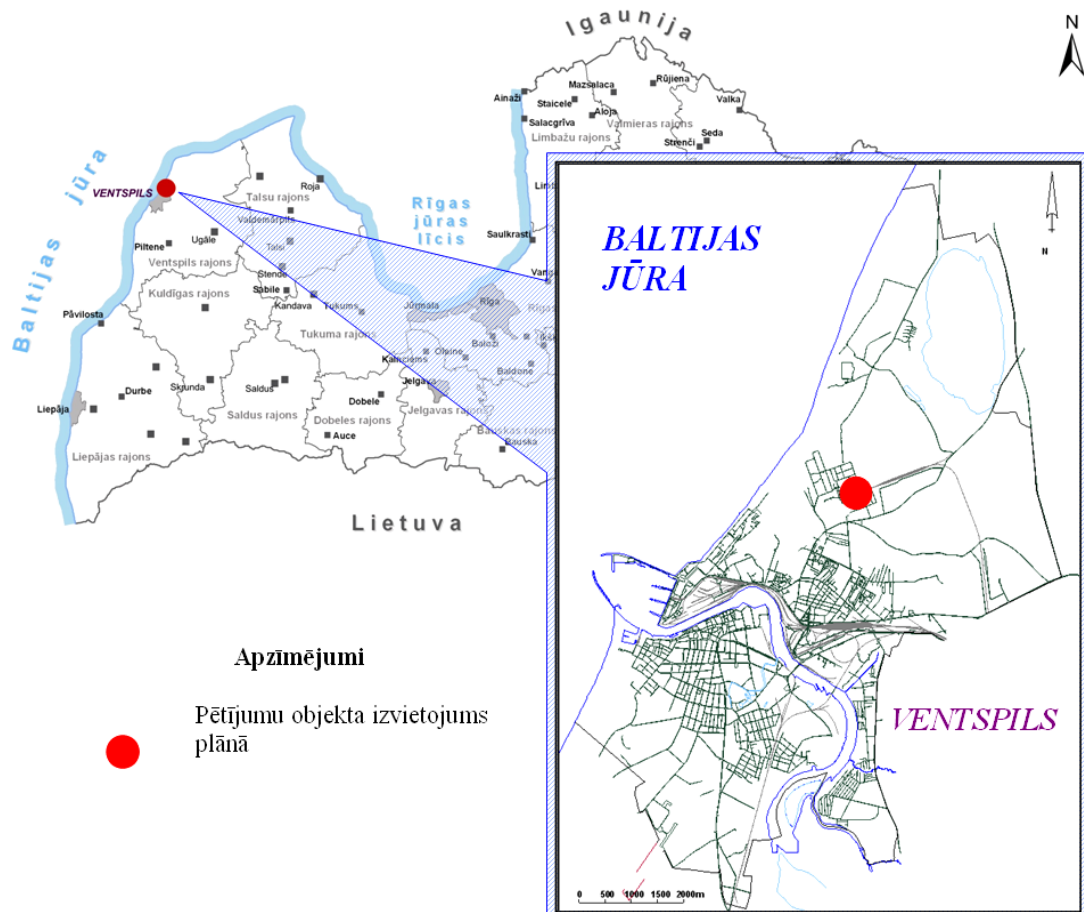
uzrādīta, kaut gan visticamāk arī šeit aptuveni 50% tas ir vai nu benzīns vai dīzeļdegviela, vai arī šo vielu maisījums.

Pētījuma sekmīgai realizācijai īpaši svarīgi bija noteikt nepieciešamo detalizācijas pakāpi, kas būtu pietiekama korektu secinājumu izdarīšanai, kā arī – kvalitatīvai to verifikācijai. Iepriekšēji novērtējumi norādīja, ka iegūto datu statistiskajai analīzei bija nepieciešami vismaz 25-30 novērojuma punkti, kuros veikto mērījumu rezultāti varētu tikt salīdzināti un matemātiski izanalizēti. Svarīgs bija arī pašu novērojumu ilgums un to regularitāte.

Sistemātiski novērtējot tās vai citas teritorijas atbilstību iepriekšēji 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).

2.2. Ventspils eksperimentālais laukums

Pētījumu objekts izvietots 16 ha lielā platībā Ventspils pilsētas rūpnieciskajā zonā Baltijas jūras piekrastes zonā (2.2. att.).



2.2. attēls. Pētījumu objekta izvietojuma shēma

Figure 2.2. Study site location scheme

Objekta vietas izvēli noteica vairāki faktori, starp kuriem trīs galvenie ir:

- 1) vietas vispusīga izpēte (vairāk kā 100 ģeoloģiskie urbumi);
- 2) plašais pētījumu faktu materiāls;
- 3) salīdzinoši ilgstošs (vairāk kā 20 gadi) hidroģeoloģisko novērojumu periods.

2.2.1. Pētījumu teritorijas ģeoloģiskā uzbūve

Pētījumu objekts izvietojas plakanā līdzenumā bijušās Litorīnas lagūnas ziemeļu daļā. Zemes virsma darbu teritorijā ir 10-14 m augstāka par pašreizējo jūras līmeni. Gar Baltijas jūru izvietojas kāpu josla, kuras kopējais platums ir ap 0,5-0,7 km. Ziemeļu virzienā šīs joslas platums pieaug, daļēji ietverot arī pētījumu objektam piegulošo teritoriju. Kāpu joslas zemāko vietu absolūtais augstums ir ap 10 m v.j.l., augstāko kāpu virsotnes sasniedz 25-30 m v.j.l., bet to relatīvais augstums ir līdz 10-15 m (Juškevičs et al., 1998).

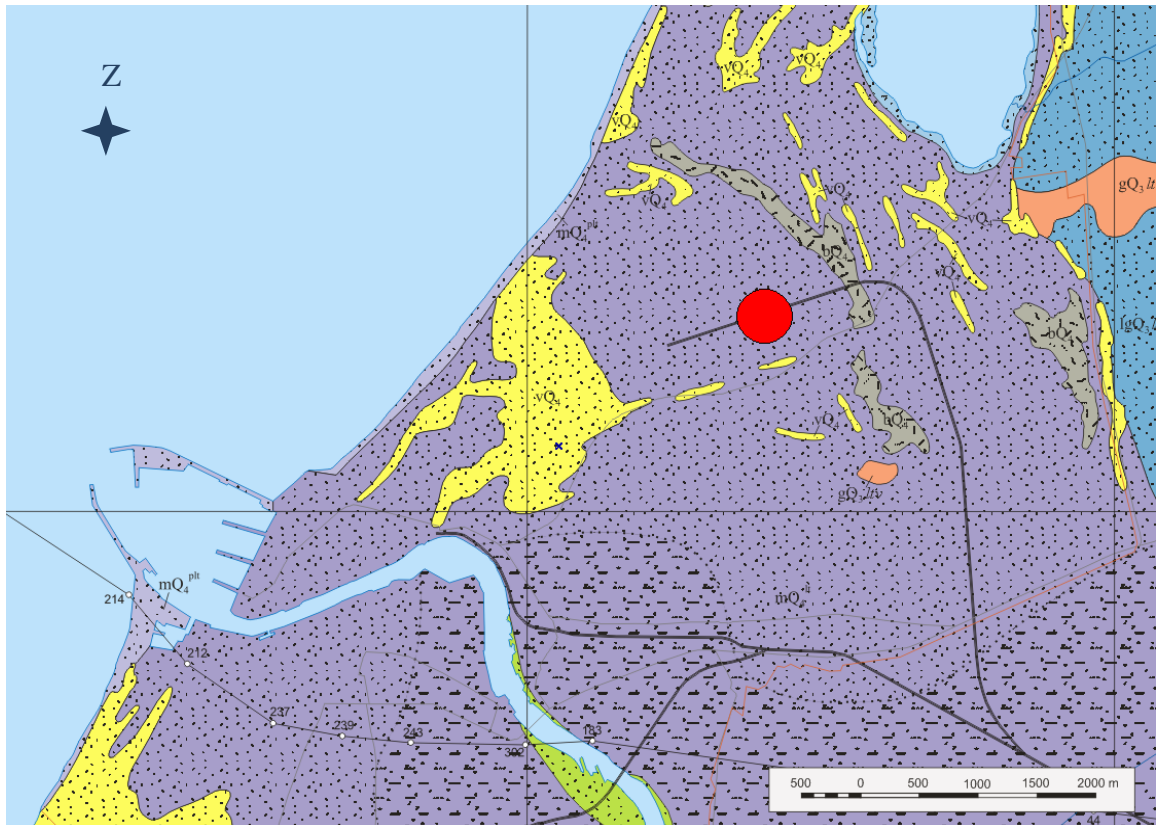
Pētījumu objekta un tā apkārtnes ģeoloģisko griezumumu veido dažāda vecuma un sastāva nogulumiežu sega (2.3. att.). Kvartāra nogulumu ir visjaunākie un to veidošanās turpinās arī mūsdienās. Visā teritorijā kvartāra nogulumu nepārtrauktas (vienlaidu) segas veidā pārklāj dziļāk gulošos vidusdevona Narvas svītas iežus. Kvartārsegas nogulumu biežums ir nevienmērīgs un tā izmaiņas galvenokārt ir saistītas ar devona iežu virsmas reljefa īpatnībām. Pētījumu objekta izvietojuma rajonā devona iežu virsmas absolūtās atzīmes atrodas 20-50 m z.j.l.

Kvartāra nogulumu segu veido atšķirīga vecuma un ģenēzes ieži (2.3. att.) un tos ģeoloģiskajā griezumā, pēc sastāva un saguluma apstākļiem nosacīti var sadalīt divās daļās – apakšējā un augšējā slāņkopā. Apakšējā slāņkopa, kas tieši pārklāj devona iežus, sastāv no Latvijas un Kurzemes ledus laikmeta nogulumiem, tās galvenokārt ir dažāda sastāva morēnas (Juškevičs et al., 1998; Juškevičs, 1999). Savukārt, nogulumu augšējās slāņkopas lielāko daļu veido māls ar mālaina aleirīta un aleirīta starpkārtām, kuras zemes virspusē pārklāj dažādgraudaina (pārsvarā smalkgraudaina vai aleirītiska) smilts. Kvartāra nogulumu kopējais biežums pētījumu objektā un tam piegulošajā teritorijā mainās no 20 līdz 60 metriem (Juškevičs et al., 1998; Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al., 1969). Turpmāk tekstā raksturīgākie nogulumu un to saguluma apstākļi tiks raksturoti hidroģeoloģiskos pētījumos vispārpieņemtajai praksei – apskatot tos no jaunākajiem līdz senākajiem.

Pētījumu objekta teritorijā ģeoloģiskā greizuma pašu augšējo daļu veido zemes virspusē atrodošies tehnogēnie nogulumu, kas izveidojušies cilvēka saimnieciskās darbības rezultātā. Šie nogulumu ir ļoti atšķirīgi gan pēc sastāva, gan biežuma, tā arī pēc to veidošanās apstākļiem. Tehnogēno nogulumu biežums šeit caurmērā nepārsniedz 2-3 metrus.

Teritorijā purvu nogulumu aizņem atsevišķas zemākās ieplakas starp kāpām, kā arī līdzenuma pazeminātos iecirkņus. Kūdras biežums parasti nepārsniedz 2-3 m, izņēmums ir Ventas bijušās attekas gultne pētījumu objektam piegulošajā ziemeļaustrumu daļā, kur kūdras biežums palielinās līdz pat 8 m. Šeit kūdra sastāv no zāļu, retāk no sūnu un koku, atliekām, tās sadalīšanās pakāpe ir laba vai vidēja (Juškevičs et al., 1998).

Eolie nogulumu pētītajā teritorijā veido kāpas un kāpu masīvus gar Baltijas jūras krastu un tās ir izveidojušās vējam pārpūšot Litorīnas jūras smilšainos nogulumus. Kāpas sastāv no viendabīgas, labi šķirotas smalkgraudainas smilts ar nelielu vidēji graudainas smilts piemaisījumu.



APZĪMĒJUMI

HOLOCĒNS			
bQ_4	Purvu nogulumi. Kūdra		Smilts
lQ_4	Ezeru nogulumi. Smilts, kūdraina smilts		Smilts ar granti
aQ_4	Aluviālie nogulumi. Smilts		Smilts aleirītiska
vQ_4	Eolie nogulumi. Smilts		Smilts kūdraina
mQ_4^{pl}	Pēclitorīnas jūras nogulumi. Smilts, aleirītiska smilts		Aleirīts
mQ_4^{lt}	Litorīnas jūras nogulumi. Smilts, aleirītiska smilts, aleirīts		Aleirīts mālains, māls aleirītisks
mQ_4^{y+an}	Litorīnas jūras nogulumi. Smilts, aleirītiska smilts, aleirīts, mālains aleirīts, aleirītisks māls (tikai griezumos)		Māls
AUGŠPLEISTOCĒNS			Kūdra
Latvijas svīta			Morēnas mālsmilts un smilšmā
$lgQ_3^{ltv^b}$	Baltijas ledus ezera nogulumi. Smilts, aleirītiska smilts, aleirīts, mālains aleirīts, aleirītisks māls		Pētījuma objekta novietojums plānā
lgQ_3^{ltv}	Limnoglaciālie nogulumi. Smilts, aleirīts, māls (tikai griezumos)		
gQ_3^{ltv}	Glaciģenie nogulumi. Morēnas mālsmilts un smilšmā		

2.3. attēls. Pētījumu teritorijas ģeoloģiskā karte (Juškevičs et al., 1998)

Figure 2.3. Geological map of study site (Juškevičs et al., 1998)

Eolās smilts biežums atkarīgs no kāpu relatīvā augstuma un tas mainās no 0,5-2 m priekškāpu zonā līdz 10 m un vairāk kāpu masīvos (Juškevičs et al., 1998; Podgurskis et al., 1985; Juškevičs, 1999).

Salīdzinoši jaunie Pēclitorīnas jūras nogulumu lielās platībās izklāj jūras gultni un veido tās pludmali. Šo nogulumu sastāvs ir daudzveidīgs: dažādgraudaina smilts ar nelielu grants un oļu piemaisījumu, oļi un grants, vietām smilšaina grants. Nogulumu biežums parasti nepārsniedz 1 m, savukārt, zemūdens nogāzes augšdaļu pārklāj dažādgraudaina smilts, bet dziļāk par 10-20 m to nomaina aleirītiska smilts.

Ģeoloģiskajā griezumā zem Litorīnas jūras nogulumiem atrodas māla un aleirītu slāņkopa, kas ietver Ancilus ezera, Joldijas jūras un Baltijas ledus ezera veidojumus. Tos veido zilganpelēka un pelēka, mīksti plastiska vai pat plūstoša māla, mālaina aleirīta un aleirīta ar smalkgraudainas vai aleirītiskas smilts starpkārtām slāņkopa, kuras augšdaļu veidojošie Ancilus ezera māls un aleirīts nereti satur paaugstinātu organisko vielu piemaisījumu un šo nogulumu kopējais biežums pētījuma teritorijā nepārsniedz 3-5 m.

Salīdzinoši izplatītie glaciolimniskie nogulumu pētījuma teritorijā ir brūni blīvi un dispersi māli, kas veido nepārtrauktu līdz pat 20 m biezu slāni. Ģeoloģiskajā griezumā tie atdala dažādo Baltijas jūras stadiju veidojumus no dziļāk gulošajiem glaciogēnajiem nogulumiem.

Latvijas ledus laikmeta glaciogēnie nogulumu sastāv no brūna vai pelēkbrūna, retāk pelēka vai zilganpelēka vidēji blīva morēnas smilšmāla ar nevienmērīgu grants un oļu piemaisījumu. Morēna ir neviendabīga, tā bieži satur smilts, grants un māla starpkārtas un ieslēgumus, kuru biežums parasti nepārsniedz 1-2 m. Uz austrumiem no pētījuma objekta Baltijas ledus ezera līdzenumā šī morēna veido gandrīz nepārtrauktu slāni, kas tieši pārklāj dziļāk gulošos devona iežus. Pētījuma objekta un tam piegulošās teritorijas robežās morēna bieži ir erodēta un tā saglabājusies tikai atsevišķu izolētu laukumu veidā, galvenokārt, senās lagūnas nomalēs, kur tās biežums reti pārsniedz 5m.

Zem Latvijas morēnas iegul Kurzemes ledus laikmeta glaciolimniskie nogulumu. Tos veido no dažiem līdz divdesmit metrus bieža smalkgraudaina (slāņa apakšdaļa aleirītiska) smilts ar retām aleirīta starpkārtām. Šie nogulumu pārklāj dziļāk iegulošo Kurzemes morēnu vai devona iežus.

Kurzemes ledus laikmeta glaciogēnie nogulumu sastopami gandrīz visā teritorijā, izņemot atsevišķus iecirkņus. Tos veido zilganpelēks un pelēks, blīvs, samērā viendabīgs morēnas smilšmāls ar salīdzinoši zemu grants, oļu un smilts materiāla saturu. Morēnas virsma atrodas vidēji ap 20 m z.j.l., bet morēnas biežums pētījuma teritorijā mainās no dažiem līdz piecpadsmit metriem. Veiktie pētījumi norāda, ka teritorijas atsevišķās vietās morēna var būt arī erodēta (Juškevičs et al., 1998; Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al., 1969).

Devona ieži lielākajā 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 dolomītmerģelis ar mālaina dolomīta starpkārtām. Svītas apakšējā daļā sastopamas arī ģipša starpkārtas. Narvas svītas ieži atdala kvartāra nogulumus no dziļāk gulošajiem vidusdevona Pērnavas un apakšdevona Ķemeru svītas un Gargždu sērijas smilšakmeņiem.

2.2.2. Pētījumu rajona hidroģeoloģiskie apstākļi

Pētījumu teritorijas un tās apkārtnes hidroģeoloģiskie apstākļi ir cieši saistīti ar ģeoloģiskās uzbūves īpatnībām un nogulumu sastāva izmaiņām, daļēji tos ietekmē arī šeit notiekošā saimnieciskā darbība (Juškevičs, 1999; Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al., 1969).

Gruntsūdens horizonts ir saistīts ar zemes virspusē gulošajiem dažāda vecuma, ģenēzes un sastāva smilšainajiem (pārsvarā, Litorīnas jūras) nogulumiem. Gruntsūdens līmeņa dziļums galvenokārt ir atkarīgs no mūsdienās vērojamā reljefa rakstura un ūdeni saturošo nogulumu biezuma, kā arī nokrišņu daudzuma un tā sadalījuma gada griezumā. Pētījumu teritorijas lielākajā daļā gruntsūdens līmenis atrodas salīdzinoši nelielā – tikai 1,0-1,5 m dziļumā no zemes virsmas, ko nosaka zemes virsas līdzenais reljefs un tā zemās absolūtās atzīmes. Piekrastes kāpu joslā gruntsūdens līmenis var atrasties arī dziļāk – nereti 3-5 metrus no zemes virsmas vai pat vairāk.

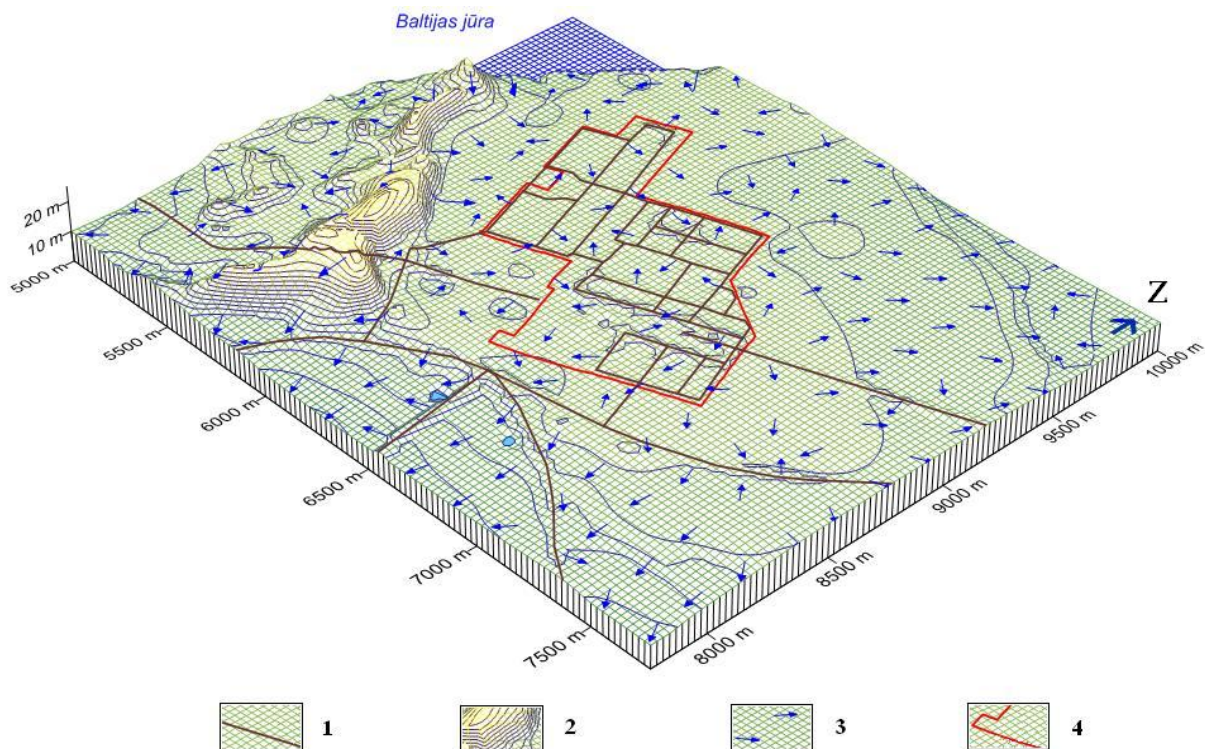
Atsevišķās vietās vērojama gruntsūdens līmeņa paaugstināšanās, ko sekmē dzīvojamo masīvu, rūpnīcu, ielu, ceļu, dažādu komunikāciju un krasta nostiprinājumu izbūve, kā rezultātā tiek traucēta dabiskā notece. Gada mitrajās sezonās nereti novērojama gruntsūdeņu uzkrāšanās reljefu pazeminājumos un īpaši maģistrālo komunikāciju līniju tuvumā (Ališauskas, 1997).

Dažādu pētījumu gaitā (Aleksāns, 1998; Ališauskas, 1997; Aleksāns, 2001) ir konstatēts, ka atmosfēras nokrišņu infiltrācijas ietekmē pētījumu teritorijas centrālajā daļā veidojas kupolveidīgs gruntsūdens līmeņa paaugstinājums, bet perifērijas zonā (izņemot kāpu rajonu) šis līmenis ir ievērojami zemāks (2.4. att.). Gruntsūdens plūsmai ir sarežģīts raksturs, kam par pamatu ir blīvais pazemes komunikāciju tīkls un teritorijas intensīvais industriālais noslogojums. Lielu lomu uz pazemes plūsmu atstāj arī drenāžas sistēmas darbība. Tomēr kopumā pētījumu teritorijā izšķiroša ietekme uz pazemes ūdens plūsmu gruntsūdens horizontā ir Baltijas jūrai un Ventas upei, kuru virzienā arī galvenokārt drenējas pazemes ūdeņi. Daudz vājāka šī plūsma ir uz ziemeļaustrumiem, kur starppauguru iepakā izvietojas purvs.

Gruntsūdens papildinās (barojas) galvenokārt no atmosfēras nokrišņiem. Tā līmeņa svārstību amplitūda pētījumu teritorijā sasniedz 0,5-1,0 m, atsevišķās vietās – līdz pat 1,5 m (2.5. att.). Zemākais gruntsūdens līmenis novērojams vasaras otrajā pusē, augstākais – novembrī, decembrī un aprīlī (Ališauskas, 1997). Daudzgadīgajā griezumā tāpat ir vērojama periodiska gruntsūdens līmeņa paaugstināšanās un pazemināšanās tendences, kas galvenokārt ir saistīta ar drenāžas sistēmas darbību (Ludāns, 2010).

Ventspils apkārtņē gruntsūdeni visbiežāk izmanto nelielu privātmāju un zemnieku saimniecību ūdensapgādei. Šo ūdeņu ķīmiskais sastāvs detalizēti līdz šim nav pētīts un galvenokārt ir novērtēts atsevišķu objektu teritorijās sakarā ar piesārņojuma izpēti. Gruntsūdens pārsvarā ir hidrokarbonātu kalcija-magnija vai kalcija-nātrija tipa ar mineralizāciju no 0,1 līdz 0,4 g×ℓ⁻¹. Nereti ir konstatēts paaugstināts hlorīdu saturs, bet atsevišķās vietās gruntsūdenim piemīt ogļskābā agresivitāte pret normāla blīvuma betonu (Juškevičs et al., 1998; Podgurskis et al., 1985; Tracevskis et al., 1969).

Ļoti bieži gruntsūdeņi ir piesārņoti, bet piesārņojuma intensitāte un raksturs dažādos Ventspils pilsētas rajonos ir atšķirīgs. Tā blakus dabīgam piesārņojumam, ko nosaka paaugstinātais hlorīdu un organisko vielu atlieku saturs Litorīnas jūras nogulumos, ir konstatēts gruntsūdens piesārņojums ar naftas produktiem, nitrātiem un nitrītiem, kā arī fiksēta fenolu, fosfora un sulfātu klātbūtne (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998). Minētie pētījumi norāda, ka galvenie piesārņojuma avoti visbiežāk ir rūpniecības objekti.



2.4. attēls. Pētījumu objekta teritorijas telpiskais modelis ar gruntsūdens plūsmas virzieniem

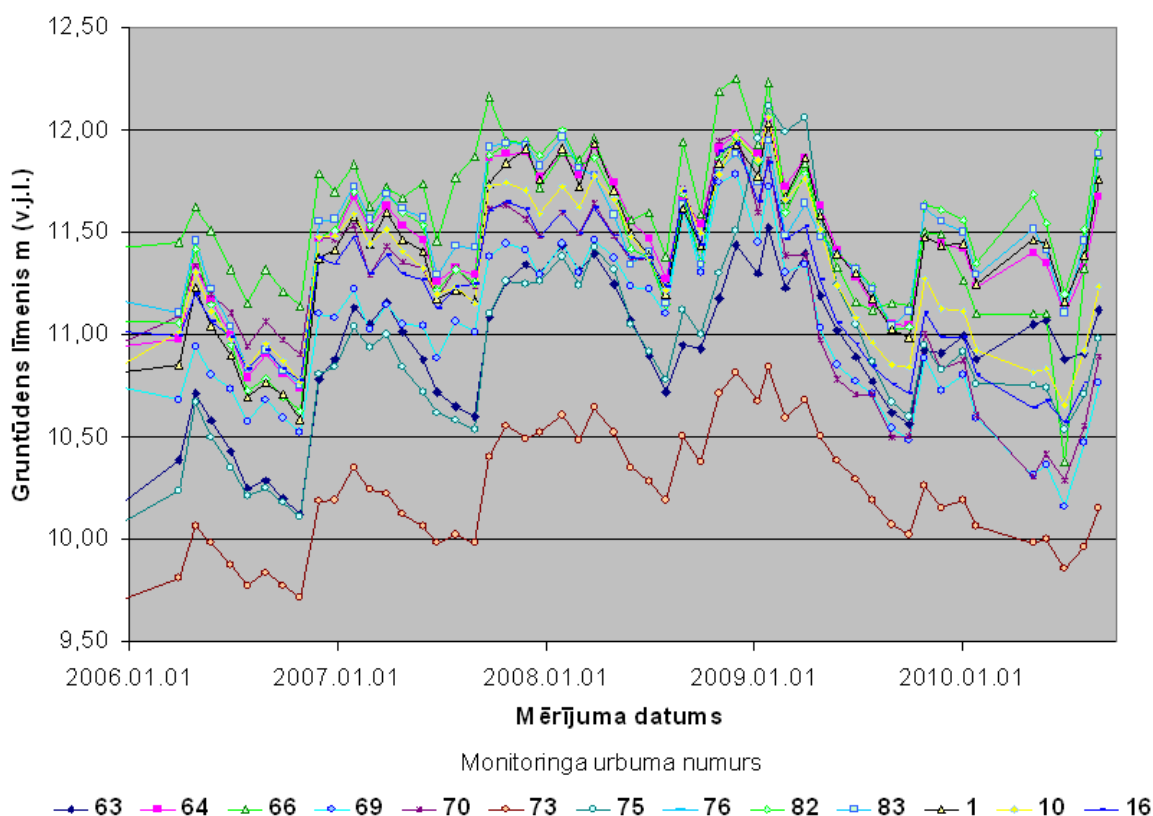
APZĪMĒJUMI. 1 - ceļš, 2 - reljefa virsmas izolīnija, 3 - gruntsūdens plūsmas virziens, 4 - pētījumu objekta teritorija.

Figure 2.4. Spatial model of study area and groundwater flow directions

LEGEND. 1 – road, 2 – geometric trace of land surface, 3 – direction of ground water flow, 4 – study area.

Teritorijas hidroģeoloģiskajā griezumā zem gruntsūdeni saturošajiem nogulumiem atrodas starpmorēnu ūdens horizonts, kas saistīts ar dažāda vecuma un ģenēzes smilšainajiem ieslēgumiem vai starpslāņiem kvartāra nogulumu segas apakšējā daļā. Šī horizonta ūdeņu izplatība ir sporādiska. Tie pieder spiedienūdeņiem, bet to statistiskie līmeņi atrodas tuvu zemes virsmai. Ūdeņu sastāvs ir tuvs gruntsūdeņiem un to mineralizācija nepārsniedz $0.3-0.5 \text{ g} \times \ell^{-1}$ (Juškevičs et al., 1998). Ūdeni satur pārsvarā smalkgraudaina vai aleirītiska smilts un smilšains aleirīts, tāpēc šo nogulumu ūdens atdeves spēja ir neliela.

Pamatiežu ūdens horizonti pētījumu teritorijā atrodas relatīvi lielā dziļumā. Pirmais (no pamatiežu virsmas) ir minerālūdeņus saturošais Pērnavas, Ķemeru un Gargždu spiedienūdens horizonts, kas atrodas aptuveni 160-170 m dziļumā (Podgurskis et al., 1985; Juškevičs et al., 1998). Ar minētajiem horizontiem saistīto minerālūdeņu statistiskais līmenis atrodas tuvu zemes virspusei vai pat virs tās. Pēc ķīmiskā sastāva (Podgurskis et al., 1985; Juškevičs et al., 1998) tie ir hlorīdu-nātrija tipa, to mineralizācija sasniedz $3,3 \text{ g} \times \ell^{-1}$, cietība - $28,6 \text{ milimoli} \times \ell^{-1}$. Pērnavas horizonta ūdeņu mineralizācija ($2,6 \text{ g} \times \ell^{-1}$) ir nedaudz zemāka, bet galveno anjonu un katjonu saturs ir sekojošs: Cl $1400 \text{ mg} \times \ell^{-1}$, Na+K $536 \text{ mg} \times \ell^{-1}$, Ca $212 \text{ mg} \times \ell^{-1}$, Mg $145 \text{ mg} \times \ell^{-1}$, S04 $195 \text{ mg} \times \ell^{-1}$, HCOs $146 \text{ mg} \times \ell^{-1}$. Horizonts ir dabiski labi aizsargāts, ko nodrošina reģionālā sprosts slāņa - Narvas horizonta ievērojamais biezumu un minerālūdeņu augstais statistiskais līmenis.



2.5. attēls. Pētījumu teritorijas gruntsūdens līmeņa sezonālo svārstību grafiki (Ludāns, 2010)

Figure 2.5. The study area groundwater level seasonal fluctuations time schedules (Ludāns, 2010)

2.3. Pētījumu objekta raksturojums

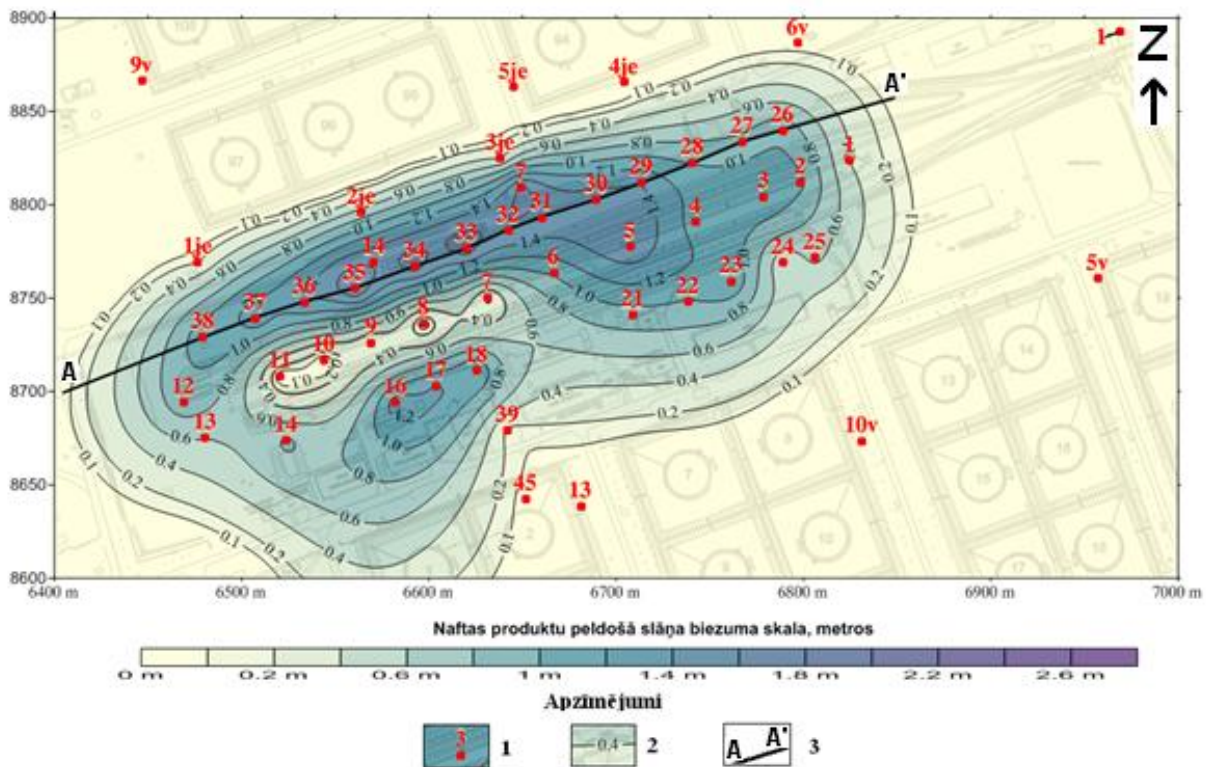
Pētījuma objekts atrodas Ventspils pilsētas industriālā zonā naftas produktu pārkrašanas ceha teritorijā. Uzņēmuma darbība tika uzsākta jau pagājušā gadsimta 60-to gadu sākumā. Tā kopējā teritorija ir 81 ha (2.4. att.), kurā ir izvietoti trīs rezervuāru parki, četras dzelzceļa estakādes naftas produktu noliešanai, sūkņu stacijas un citas tehnoloģiskās būves (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998). Pētījumu objekts aptver trīs no četrām pārkrašanas ceha dzelzceļa estakādēm un tā platība ir aptuveni 6 ha (2.6. att.).

Lielāko daļu pārkraujamo produktu apjoma veido jēlnafta un dīzeļdegviela, tiek pārkrauts arī benzīns un reaktīvā degviela. Pārkrautās jēlnaftas un naftas produktu sadalījums dažādos gados ir mainīgs un tas variē robežās: jēlnafta 60-70%, dīzeļdegviela 25-30%, benzīns 3-4% un reaktīvā degviela aptuveni 1% no kopējā pārkrautā naftas produktu apjoma (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998).

Pirmos pazemes ūdeņu pētījumus šajā teritorijā 1990. – 1992. gadā uzsāka Latvijas ģeoloģijas pārvalde (Levins, Krutofal, 1992), vēlāk - 1995.g. 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 arī 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, tajā skaitā arī estakādes rajonā (Aleksāns, 1998).

Naftas produktu pārkraušanas dzelzceļa estakādes ekspluatācijas rezultātā pētījumu objekta teritorijas smilšaino nogulumu masīva virsējā daļā gadu gaitā bija izveidojies ievērojams grunts un gruntsūdens piesārņojuma areāls. 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 bieža peldošā brīvās fāzes slāņa veidā atrodas vismaz 3000 m^3 naftas produktu (Aleksāns, 1998; Aleksāns, 1999). Brīvās fāzes šķidrums slāņa izplatības karte un urbumu izvietojums pētījumu objektā skatāms 2.6. attēlā.



2.6. 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 griezumā līnija.

Figure 2.6. 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.

Pētījumos tika konstatēts (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998), ka grunts un gruntsūdens piesārņojumu galvenokārt veido dīzeļdegviela un benzīns, bet dzelzceļa estakādes teritorijas dienvidrietumu daļā naftas produktu peldošajā slānī tika konstatētas arī

smagākas ogļūdeņražu frakcijas – bioloģiski degradēta tehniskā petroleja un jēlnafta. Kā svarīgs konstatējums atzīmējams, ka virs gruntsūdens peldošajā naftas produktu slānī visas minētās frakcijas atrodas maisījumā (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998).

Brīvās fāzes šķidrums slāņa izplatības areāla izmēri un tā iegulas dziļums lielā mērā ir atkarīgs no gruntsūdens horizontu veidojošo iežu fizikālajām un mehāniskajām īpašībām. Saskaņā ar SIA ATW veiktajiem pētījumiem (Švēde, 1998) dzelzceļa estakādes teritorijas ģeoloģiskajā griezumā var izdalīt četrus dažāda litoloģiskā sastāva smilšaino nogulumu slāņus (2.9. att.).

- 1) Uzbērta grunts – dažāda rupjuma smilts ar nelielu organiskas piejaukumu, ar granti, oļiem un būvgružu piemaisījumu, nesablīvēta.
- 2) Grantaina smilts ar oļiem – ar smalkas un vidēji rupjas smilts pildījumu, brūni pelēka līdz zilganpelēkai, vidēji blīva, tuvāk pamatnei – blīva, ar naftas produktu piesārņojuma pazīmēm.
- 3) Vidēji rupja smilts – ar smalko daļiņu piejaukumu, atsevišķās vietās slāņa virspusē vāji cementēta ar dzelzs oksīdu, augšējā daļā sarkanbrūna, dziļāk – dzeltenbrūna, vietām ar grants un oļu ieslēgumiem (līdz 10%), vidēji blīva.
- 4) Smalka smilts – ar nelielu vidējo daļiņu piejaukumu un retiems grants graudiem, palielinoties dziļumam – ar putekļaino daļiņu piejaukumu, gaiši pelēka, vidēji blīva.

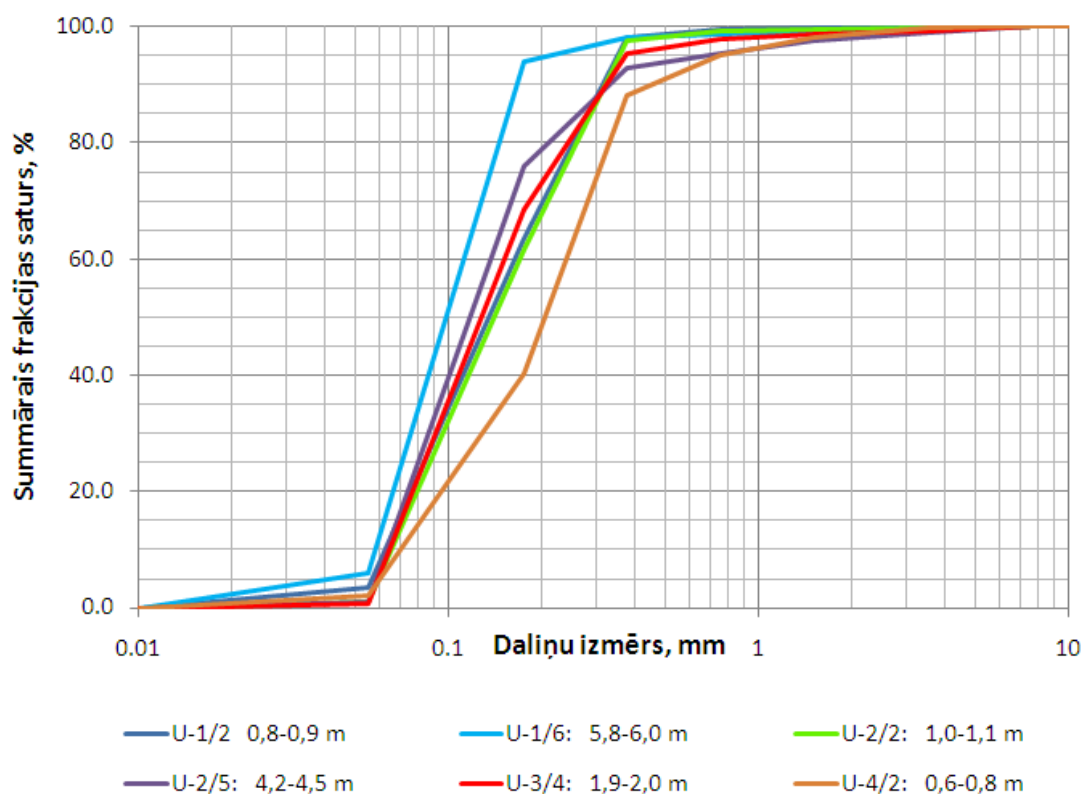
Pētījumu laukumā esošo smilšaino nogulumu granulometriskā sastāva testēšanas rezultāti dažādiem šo nogulumu dziļumiem doti 2.1. tabulā.

2.1. tabula. Smilts daļiņu procentuālais saturs un smilts filtrācijas koeficients

Table 2.1. Percentage content of sand particles and sand permeability coefficient

Urbuma/pa- rauga Nr.	Dziļums, m	Granulometriskais % sastāvs, daļiņu izmērs, mm								Filtrācijas koefic, $m \times d_{nn}^{-1}$.
		Oļi >10	Grants		Smilts				Pute- kļi <0,1	
			10,0 – 5,0	5,0 – 2,0	2,0 – 1,0	1,0 – 0,5	0,5 – 0,25	0,25 – 0,1		
U-1/2	0,8-0,9	0	0,1	0,1	0,3	1,3	34,6	60,2	3,4	–
U-1/6	5,8-6,0	0	0,2	0,6	0,6	0,4	4,2	88,1	5,9	1,83
U-2/2	1,0-1,1	0	0,3	0,1	0,3	1,7	36,1	60,6	0,9	–
U-2/5	4,2-4,5	0	1,1	1,3	2,3	2,5	16,8	74,9	1,1	–
U-3/4	1,9-2,0	0	0,9	0,3	0,9	2,6	26,8	67,8	0,7	5,19
U-4/2	0,6-0,8	0	0,3	1,6	3,0	7,0	47,9	38,1	2,1	–

Pamatojoties uz 2.1. tabulā doto smilts daļiņu procentuālo saturu tika sagatavotas šo daļiņu procentuālā satura summārās (kumulatīvās) līknes puslogaritmiskā mērogā, kas skatāmas 2.7 attēlā.



2.7. attēls. Smilts daļiņu procentuālā satura summārās līknes

Figure 2.7. Cumulative curves of sand particle percentage content

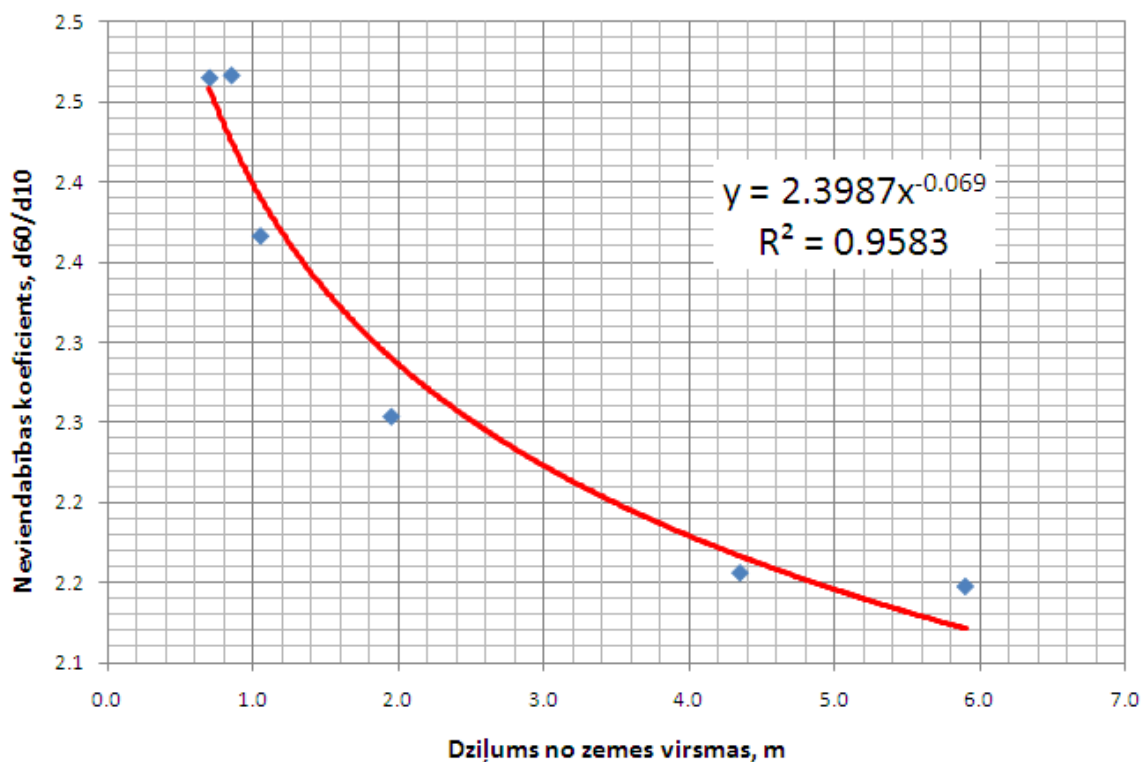
Izmantojot 2.7. attēlā dotās smilts daļiņu procentuālā satura summārās līknes, katram paraugam ir iespējams noteikt smilts efektīvo diametru d_{10} un smilts daļiņu 60% kumulatīvajai vērtībai atbilstošo diametru d_{60} . Zinot d_{10} un d_{60} var aprēķināt smilts heterogenitātes (neviendabības) koeficientu (k_n), kas ir vienāds ar d_{60}/d_{10} attiecību. Smilts nogulumu heterogenitātes koeficienta vērtības skatāmas 2.2. tabulā.

2.2. tabula. Smilts nogulumu heterogenitātes koeficients

Table 2.2. Sand sediment heterogeneity factor

Urbuma/parauga Nr.	Dziļums, m	10% diametrs, d_{10}	60% diametrs, d_{60}	Nevienādības koeficients, k_n
U-1/2	0,8-0,9	0,0682	0,1682	2,5
U-1/6	5,8-6,0	0,061	0,131	2,1
U-2/2	1,0-1,1	0,0732	0,1732	2,4
U-2/5	4,2-4,5	0,0692	0,1492	2,2
U-3/4	1,9-2,0	0,0718	0,1618	2,3
U-4/2	0,6-0,8	0,0794	0,1957	2,5

Analizējot 2.2. tabulā dotos datus, var konstatēt, ka smilšaino nogulumu vertikālajā griezumā vērojama izteikta likumsakarība – palielinoties dziļumam samazinās smilts heterogenitātes koeficients, ko labi ilustrē 2.8. attēls.



2.8. attēls. Smilšaino nogulumu nevien dabības (heterogenitātes) koeficienta izmaiņas vertikālajā griezumā

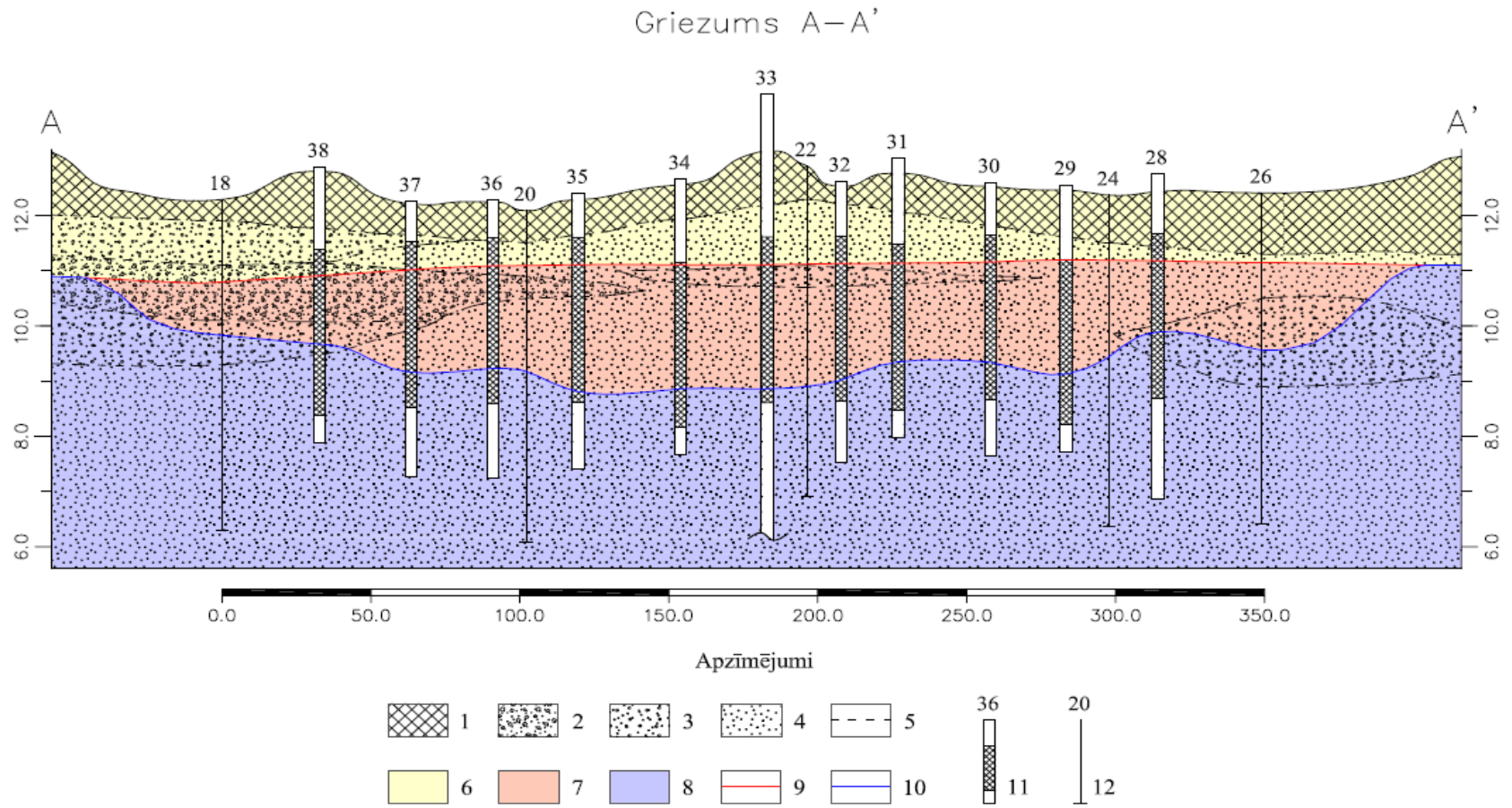
Figure 2.8. Sandy sediment heterogeneity factor changes in the vertical cross section

Pilns pētījumu teritorijas hidroģeoloģiskais griezumums skatāms 2.9. attēlā, kurā redzamas iežu litoloģiskā sastāva izmaiņas gan dziļumā, gan arī plānā. Šajā griezumā tāpat dots gruntsūdens līmeņa iegulas dziļums un pētāmā brīvās fāzes šķidrums slāņa izvietojums smilts nogulumos.

Gruntsūdens līmeņa dziļums pētījumu objektā caurmērā mainās no 1,2 m līdz 3,5 m no zemes virsmas (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998; Ludāns, 2009), bet vidējais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums pētījumu periodā teritorijā bija aptuveni 1,3 metri. Atkarībā no gruntsūdeni saturošo nogulumu granulometriskā sastāva, iežu filtrācijas koeficients mainās no 1,5 līdz 8,5 m \times dmn.⁻¹ (Aleksāns, 2002).

Gruntsūdens horizonts ir labi apūdeņots un urbumu atsūkņēšanas debits (ražība), atkarībā no filtra diametra, tā garuma un izvietojuma dziļuma, šeit svārstās no 0,03 līdz 0,67 $\ell \times s^{-1}$ (Aleksāns, 1998; Aleksāns, 2001; Spalviņš et al., 2009).

Brīvās fāzes šķidrums peldošā slāņa klātbūtne dzelzceļa estakādes rajonā piesārņo zem tā esošo gruntsūdeni tādējādi nelabvēlīgi iespaidojot tā kvalitāti. Naftas produktu izšķīdušās frakcijas piesārņojuma koncentrācija teritorijā pētījuma laikā mainījās no 0,5 mg $\times \ell^{-1}$ līdz 1,0 mg $\times \ell^{-1}$ (Aleksāns, 1998) un šāds piesārņojums uzskatāms par mērenu (Mandeika, Vircavs, 2008). Salīdzinoši nelielā gruntsūdenī izšķīdušo naftas produktu koncentrācija pētījumā (Aleksāns, 1998) tika skaidrota ar to, ka viss piesārņojuma areāls eksistē jau vairākus gadu desmitus, kuru laikā ievērojama daļa ūdenī šķīstošo naftas produktu jau ir izskaloti vai bioloģiski noārdīti.



2.9. attēls. Pētījumu objekta hidroģeoloģiskais griezum

APZĪMĒJUMI. 1 – uzbērums, 2 - smilts grantaina, 3 - smilts vidēji rupja, 4 - smilts smalka, 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 - atsūkņēšanas urbums un tā numurs, 12 - izpēte urbums un tā numurs.

Figure 2.9. Hydro geological 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.

3. MATERIĀLI UN METODEDES

3.1. Eksperimenta realizācijas procedūra

Veiktā pētījumā brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālā biezuma noteikšanas procedūra ir līdzīga pazemes ūdeņu atsūkņēšanas eksperimenta norisei, nosakot filtrējošo iežu hidroģeoloģiskos parametrus (Gruszczenski, 1987; Beckett, Lyverse, 2002). Eksperimenta realizācijas procedūrā var izdalīt trīs galvenos posmus:

- pētījuma plānojums;
- eksperimenta realizācija;
- analītiskās darbības.

Šajā sadaļā netiek skaidroti jautājumi, kas ir saistīti ar pētījuma vietas un eksperimenta laukuma izvēles nosacījumiem, jo tie ir aplūkoti šī darba 2.1. un 2.2. sadaļā.

3.1.1. Pētījuma plānojums

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. Viena daļa izvirzīto nosacījumu tika noteikta, balstoties uz agrāk veikto eksperimentu aprakstu literatūrā (Gruszczenski, 1987; Testa, Winegardner, 1991; Hughes et al., 1998; Beckett, Lyverse, 2002), bet otra daļa nosacījumu tika izvirzīta konkrēti autora realizētajam pētījumam. Tālāk tekstā dots galveno eksperimenta realizācijas nosacījumu uzskaitījums.

- Ģeoloģiskie apstākļi – vismaz 5 metrus un vairāk biezs labi filtrējošu nogulumu (piem., smilts) horizonts ģeoloģiskā griezumā augšējā daļā un ar vāji caurlaidīgu mālainu nogulumu slānis tā pamatnē.
- Hidroģeoloģiskie apstākļi – eksperimenta mērķiem neierobežots plānā, bezspiediena gruntsūdens horizonts ar iežu filtrācijas koeficientu ne mazāku par 1,0 metri dienaktī ($m \times dnn^{-1}$) un aptuvenu gruntsūdens līmeņa ieguluma dziļumu 1-3 metri no zemes virsmas.
- Daudzfāzu vide – nepieciešams nosacījums ir brīvās fāzes šķidrums slāņa klātbūtne gruntsūdens horizontā, vēlamais urbumā novērojama brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums ir vismaz 10 centimetri vai vairāk, maksimālais biezums, atkarībā no sagaidāmā gruntsūdens līmeņa pazeminājuma, nedrīkst pārsniegt 50-75% no urbuma filtra garuma.
- Tehniskās un tehnoloģiskās prasības – eksperimentālajiem urbumiem jāatrodas brīvās fāzes šķidrums slāņa izplatības areālā, bet tā konstrukcijai jāspēj nodrošināt brīvās fāzes šķidrums un ūdens pieplūdi urbumā tā atsūkņēšanas laikā; brīvās fāzes šķidrums slāņa augšējai virsmai eksperimenta laikā jāatrodas urbuma filtra intervālā, ārpus kura robežām tas nedrīkst atrasties gruntsūdens līmeņa pazemināšanas un tā atjaunošanās laikā.
- Instrumenti un aprīkojums - divu nesajaucamo šķidrumu saskares virsmas detektors brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma mērīšanai urbumā ar precizitāti ne mazāku par 1 cm, mazjaudīgs (ar jaudu $< 0.5 \text{ l} \times \text{s}^{-1}$) iegremdējams centrālās (vai analogs tam) sūkņa ar nepieciešamo aprīkojumu (šļūtenes, savienojumi), strāvas avots sūkņa darbināšanai.

- Blakus faktoru ietekme – nav pieļaujams, ka eksperimentu ietekmē dažādi blakus faktori, piemēram – tuvumā esoši ūdensapgādes urbumi, noplūdes no pazemes komunikācijām vai rezervuāriem, kā arī eksperimenta laikā atsūknētais šķidrums, kuru nedrīkst iefiltrēt atpakaļ gruntī pētījuma laukuma ietvaros. Tāpat ir nepieciešams izvairīties no blakus notiekošu eksperimentu savstarpējās mijiedarbības, kuras novēršanai nevajadzētu vienlaicīgi atsūknēt divus (vai vairākus) urbumus, starp kuriem attālums ir mazāks par 10 m, jo dažādos šajā teritorijā veiktajos pētījumos (Aleksāns, 1999; Aleksāns, 2001) ir konstatēts, ka viena urbuma ietekmes zona caurmērā nepārsniedz 5 m.

Ņemot vērā visus augstāk norādītos nosacījumus, atbilstoši eksperimenta prasībām pētījuma laukuma ietvaros tika pārbaudīti 46 novērošanas urbumi, no kuriem 31 tika atzīts par atbilstošiem izvirzītajiem kritērijiem. Visi urbumi atradās labi izpētīta (Kovaļenko, 1996; Aleksāns, 1998) naftas produktu (dīzeļdegvielas) piesārņojuma areāla ietvaros (2.6. att.). Urbumu dziļums caurmērā sasniedza 5-6 metrus, filtra kolonas diametrs izvēlētiem urbumiem bija dažāds: 89, 108 vai 127 mm. Visi urbumi bija aprīkoti ar 2,5-3,0 metrus garu misiņa sieta filtru izvietotu 2-5 metru dziļuma intervālā no zemes virsmas (2.9. att.).

Brīvās fāzes šķidruma (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.

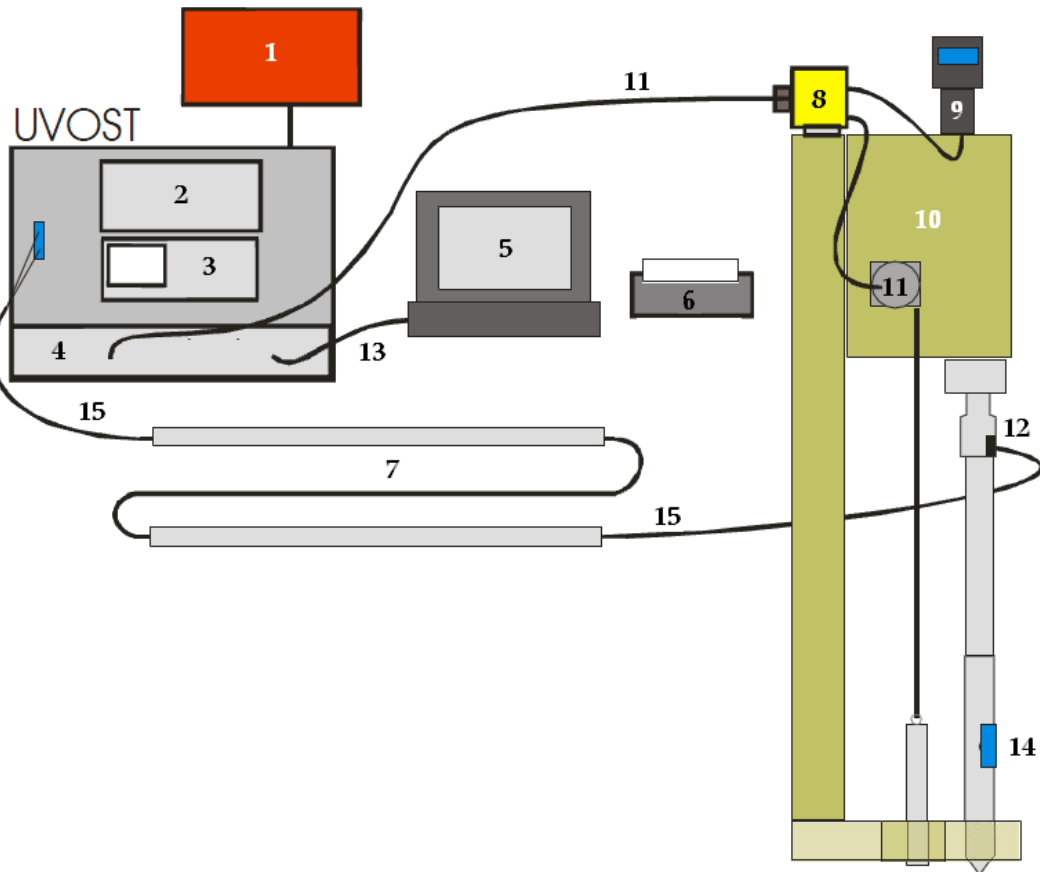
Šķidrumu atsūknēšanai no urbuma tika plānots izmantot virszemes centrālās sūkņi, kas tehniski spētu nodrošināt šķidrumu atsūknēšanu ar jaudu $0,3-0,5 \text{ l}\times\text{s}^{-1}$ pie līmeņa pazeminājuma urbumā līdz 7 m dziļumam no zemes virsmas. Atsūknēto šķidrumu (ūdens un naftas produktu maisījumu) paredzēja novadīt pētījuma vietai blakus esošajā rūpnieciskajā kanalizācijā, tādējādi izslēdzot tā ietekmi uz atsūknējamajiem urbumiem.

Līmeņu mērīšanai urbumos tika plānots izmantot SOLINST divu nesajaucošos šķidrumu saskares virsmas detektoru (*interface probe*), kas nodrošina gan pašas brīvās fāzes šķidruma vai ūdens virsmas mērīšanu, gan arī šo šķidrumu saskares virsmas dziļuma noteikšanu ar precizitāti līdz 1 centimetram divfāzu šķidruma apstākļiem urbumā. Tā ir viena no tehniski iespējamām metodēm augstas divfāzu šķidrumu saskares virsmas mērījumu precizitātes panākšanai ar šāda veida mērinstrumentiem (SOLINST, 2009).

Paralēli praksē plaši pielietotajai divu nesajaucošos šķidrumu saskares virsmas mērīšanas metodei ar dažāda veida detektoriem, pētījumā tika paredzēts pārbaudīt arī oriģinālu, autora izstrādātu (Aleksāns, 2008) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma noteikšanas metodi, izmantojot šim nolūkam trīs miniatūrus *DIVER* tipa sensorus. Tradicionāli šie sensori ir paredzēti šķidruma līmeņa izmaiņu mērīšanai urbumā, sākot ar 0,5 sekunžu intervālu un biežāk. Visi mērījumu dati tiek automātiski saglabāti sensoru operatīvajā atmiņā, no kurienes tos iespējams transformēt uz datoru un apstrādāt ar speciāli šim nolūkam izstrādātām instrumenta ražotāja programmām (ROTEK, 2011). Atšķirībā no tradicionālās *DIVER* tipa sensoru pielietošanas metodes, kad urbumā ar vienu sensoru tiek mērīts ūdens staba augstums virs šī sensora un ar otru atmosfēras spiediens, pētījuma eksperimentā vienā urbumā divu sensoru vietā tika paredzēts izmantot trīs, kas ļautu noteikt ne tikai ūdens līmeni urbumā un atmosfēras spiedienu, bet arī brīvās fāzes šķidruma slāņa biezumu. Vairāk par šo metodi ir aprakstīts LU 66. zinātniskās konferences referātu tēzēs (Aleksāns, 2008), kā arī sadaļā.

Brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma noteikšana ar *DIVER* sensoru metodi tika plānota, lai precizētu, kā mainās naftas produktu peldošā slāņa biezums atsūknēšanas eksperimenta laikā atkarībā no iesūknējamās caurules iegremdēšanas dziļuma, kā arī, lai noteiktu kādā veidā un cik ātri notiek naftas produktu brīvās fāzes slāņa atjaunošanās pirmajās minūtēs uzreiz pēc sūkņu darbības pārtraukšanas.

Paralēli 1991. gadā S. M. Testa un D. L. Vinegardners (Testa, Winegardner, 1991) piedāvātajam brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālā biezuma empīrisko aprēķina rezultātu verificēšanai uz vietas, ierīkojot šī slāņa izplatības areālā urbumus paraugu noņemšanai tieši no peldošā slāņa intervāla un to analīzi laboratorijā, šajā pētījumā tika izmantota jauna, inovatīva lāzera izraisītās fluorescences (LIF) zondēšanas metode. Šī metode ļauj iegūt eksperimenta empīrisko aprēķinu rezultātu verificēšanai nepieciešamos datus ar daudz augstāku precizitāti un ticamības pakāpi, salīdzinājumā ar agrāk izmantotajiem paņēmieniem. Iekārtas uzbūves un tās darbības principiālā shēma skatāma 3.1 attēlā.



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

APZĪMĒJUMI. UVOST – ultravioletā starojuma reģistrēšanas iekārta. 1 –ģenerators, 2 – lāzers, 3 – osciološkops, 4 – e-panelis, 5 – personālais dators, 6 – printeris, 7 – zondēšanas stieņi, 8 – komunikators, 9 – pārnēsājama 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.

Figure 3.1. 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.

Iekārtas darbības princips ir sekojošs. Ar statiskās zondēšanas paņēmieni, gruntī tiek ievadīta (iespiesta) speciāla zonde, caur kuru notiek nepārtraukta grunts apstarošana ar

lāzera staru. Ja nogulumos, caur kuriem iet zonde, ir organisko vielu klātbūtne (t.sk. arī naftas produktu) lāzera starojums izraisa šo vielu fluorescēšanu. Fluorescēšanas intensitāte rāda, cik liela ir organisko vielu koncentrācija gruntī, bet tās spektrs – kāds ir šī piesārņojuma sastāvs. Visi dati reālā laika (*on-line*) režīmā atainojas vizuāli uz datora monitora un tiek saglabāti tā atmiņā. Šos rezultātus jau lauku apstākļos iespējams apstrādāt un arī izdrukāt gatavas formas veidā.

Detalizētāks apraksts par LIF metodes priekšrocību un darbības principu atrodams LU 67. zinātniskās konferences (Aleksāns, Dimitrijevs, 2009) un SIA VentEko rīkotās starptautiskās konferences *Soil Degradation* (Aleksāns, 2009) referātu tēzēs.

Vēl viens svarīgs parametrs, kuru tika plānots noteikt lauku apstākļos ir gruntsūdens līmeņa sezonālo svārstību intervālā gruntī adsorbētais brīvās fāzes šķidrums apjoms, kas ir jāņem vērā eksperimenta skaitliskajos aprēķinos. Arī šajā gadījumā kā viena no perspektīvajām metodēm, ar kuru bija iespējams iegūt šādus datus, tika paredzēta lāzera izraisītās fluorescences (LIF) zondēšana (Aleksāns, Dimitrijevs, 2011).

3.1.2. Eksperimenta realizācija

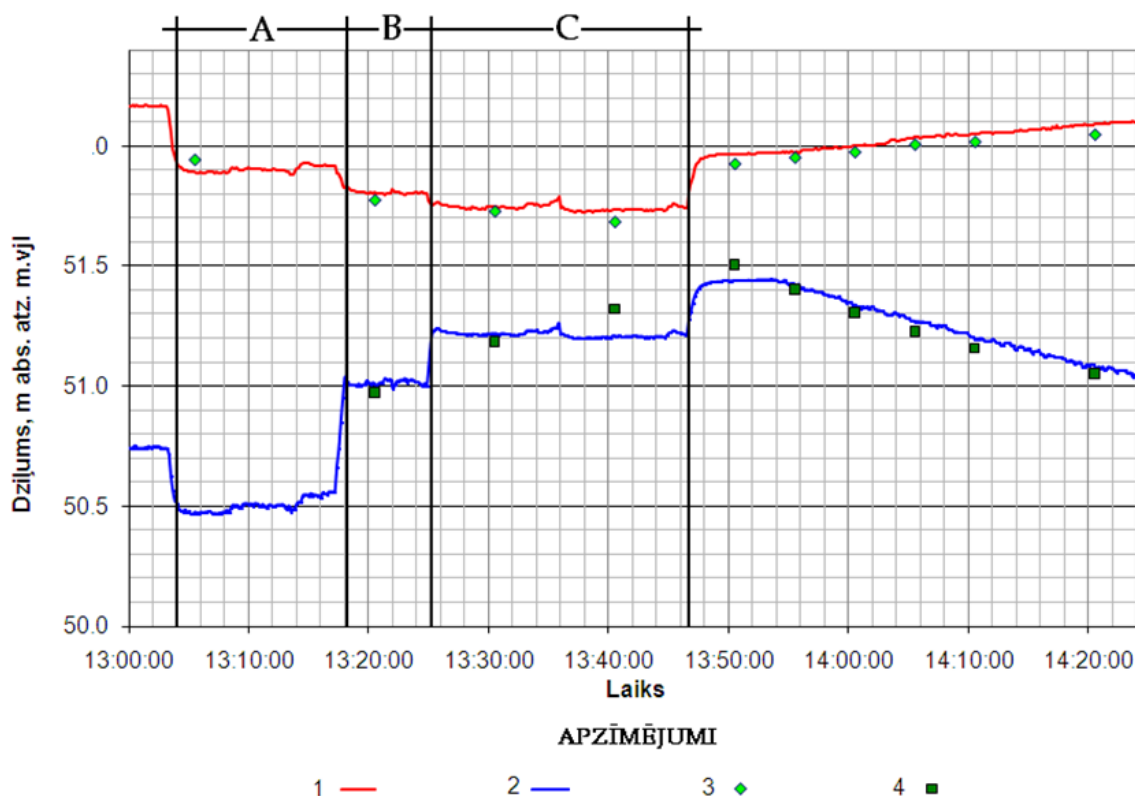
Pētījuma eksperiments realizēts sanācijas darbu ietvaros, kuru laikā tika veikta naftas produktu brīvās fāzes šķidrums atsūkņēšana no gruntsūdens horizonta. Urbumu sūkņēšanas ilgums, atkarībā no brīvās fāzes šķidrums apjoma un ūdens pieplūdes intensitātes atšķirīgiem urbumiem svārstījās no dažām dienām līdz pat vienam mēnesim un ilgāk. Kopējais pētījuma periods bija četri mēneši, kura laikā notika naftas produktu brīvās fāzes šķidrums slāņa parametru mērījumi urbumos. Saskaņā ar izvirzītajiem kritērijiem (skat. sadaļu 3.), pētījuma mērķiem piesārņojuma zonā tika atlasīts trīsdesmit viens urbums divfāzu šķidrums slāņa atjaunošanās dinamikas pārbaudei gruntsūdens horizontā (Aleksāns, 2007).

Katram urbumam eksperimenta realizācija notika divos posmos:

- 1) urbuma atsūkņēšanas laikā un
- 2) brīvās fāzes šķidrums slāņa atjaunošanās periodā.

Brīvās fāzes šķidrums atsūkņēšanai no urbuma tika izmantots virszemes centrālās sūkņi, ar atsūkņēšanas jaudu $0,3-0,5 \text{ l}\times\text{s}^{-1}$. Sūkņi tika izvēlēti tāds, kas spēja nodrošināt līmeņa pazeminājumu urbumā līdz 7 m dziļumam no zemes virsmas. Iesūkņējamā caurule sākumā tika iegremdēta urbumā nedaudz zemāk (apmēram 10 cm) par brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmu (Gruszczenski, 1987).

Atsūkņēšanas laikā, samazinoties brīvās fāzes šķidrums slāņa biezumam, iesūkņējamās caurules gals tika pakāpeniski celts uz augšu, jo brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmas dziļums urbumā mainījās (parasti virzienā uz augšu). Iesūkņēšanas caurules dziļuma regulēšana tika atkārtota vairākas reizes līdz tika panākts tas, ka sūkņēšanas laikā līmeņi stabilizējās un no urbuma pārsvarā tiek atsūkņēts brīvās fāzes šķidrums ar procentuāli nelielu (15-20%) ūdens piejaukumu tajā. Iesūkņējamās caurules iegremdēšanas dziļuma regulēšanas piemērs skatāms grafikā (skat. 3.2. attēlu), kas iegūts, izmantojot autora izstrādātu (Aleksāns, 2008) no trim automātiskiem *DIVER* tipa līmeņu mērītājiem sastāvošu sensoru sistēmu brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma noteikšanai urbumā nepārtrauktā mērīšanas režīmā ar automātisku datu reģistrēšanu un to saglabāšanu ierīces operatīvajā atmiņā. Papildus minētajai līmeņu mērīšanai automātiskā režīmā periodiski atsūkņēšanas eksperimenta laikā tika veikti arī manuāli mērījumi, kas bija nepieciešami automātisko mērījumu datu verificēšanai.



3.2. attēls. Iesūkņejamās caurules iegremdēšanas dziļuma regulēšanas piemērs, izmantojot triju automātisko *DIVER* tipa sensoru sistēmu

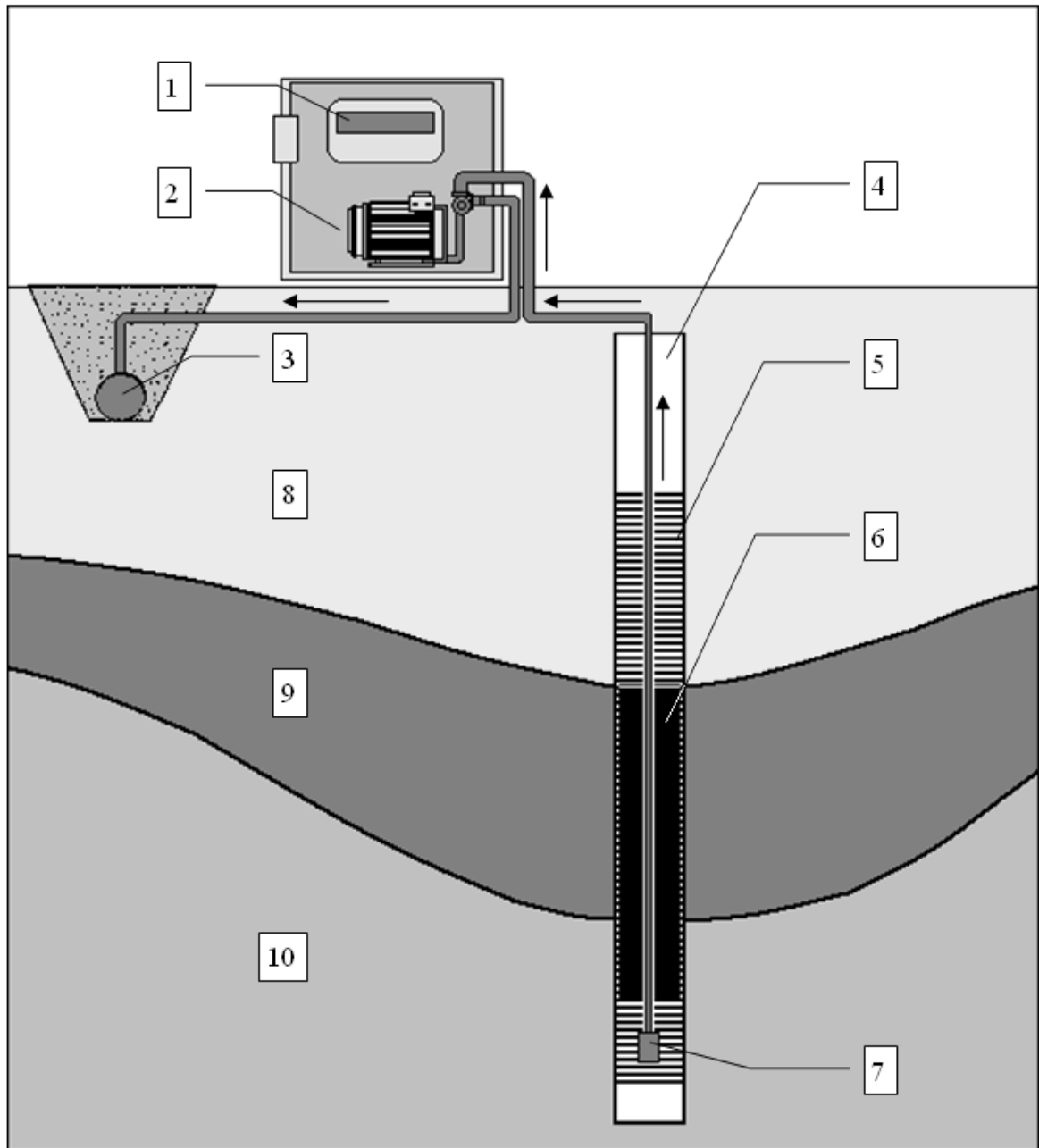
APZĪMĒJUMI. Ar triju *DIVER* tipa sensoru sistēmu urbumā mērītais: 1 – gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsmas līmenis, 2 – brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas līmenis. Manuāli nomērītais: 3 – gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsmas līmenis, 4 – brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas līmenis. 5 – grafikā: brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma un tā iegulas dziļums dažādiem iesūkņejamās caurules iegremdēšanas dziļumiem: A, B un C.

Figure 3.2. Example of pumping tube immersion depth adjustment, based on the three *-DIVER*-type level logger system measurements

LEGEND. By the three *-DIVER*-type logger system measured: 1 – an ambient air and free-phase fluid interface level, 2 – a free phase-liquid and groundwater interface level. Manually measured: 3 – air and free-phase liquid interface level, 4 – free-phase liquid and water interface level. 5 – free-phase liquid layer thickness and its location depth for different pumping tube immersion options: A, B and C.

Atsūkņēšanas posmā parasti tika sasniegts tāds līmeņa pazeminājums filtra intervālā, kas nodrošināja pakāpenisku brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma samazināšanos un tā pilnīgu izzušanu urbumā (Gruszczenski, 1987; Hughes et al., 1998). Tajos gadījumos, kad brīvās fāzes šķidruma pieplūde urbumā bija tik intensīva, ka nebija iespējam sasniegt peldošā slāņa pilnīgu izzušanu, atsūkņēšanu turpināja līdz tika panākts, ka urbumā mērāmās brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums ir stabilizējies.

Atsūkņētais šķidrums (ūdens un naftas produktu maisījums) saskaņā ar darbu realizācijas plānu tika novadīts pētījuma vietai blakus esošajā rūpnieciskajā kanalizācijā, tādējādi izslēdzot tā iefiltrēšanos atpakaļ gruntī un šādā veidā novēršot iesūkņētā šķidruma iespējamo nevēlamo ietekmi uz citiem tuvumā esošajiem eksperimentējamajiem urbumiem. Atsūkņēšanas sistēmas principiālā shēma vienam urbumam skatāma 3.3. attēlā.



3.3. attēls. Urbuma atsūkņēšanas eksperimentālās sistēmas principiālā shēma

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

Figure 3.3. 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.

Eksperimenta otrajā posmā – gruntsūdens un brīvās fāzes šķidrums slāņa atjaunošanās periodā, līmeņu mērījumi urbumos tika turpināti līdz brīdim, kad tika sasniegta to pilnīga stabilizācija.

Visā sūkņēšanas laikā eksperimentam izvēlētajos urbumos regulāri tika mērīts brīvās fāzes šķidrums slāņa augšējās virsmas iegulas dziļums, kā arī šī slāņa un gruntsūdens saskares virsmas dziļums urbumā. Gruntsūdens līmeņa pazemināšanas amplitūda sūkņēšanas gaitā dažādos urbumos mainījās salīdzinoši plašā diapazonā – no 0,30 m līdz 3,60 m, bet vidējais urbumā esošo šķidrumu līmeņa pazeminājuma rādītājs visa eksperimenta gaitā bija aptuveni 1,60 m.

Realizējot eksperimenta otro posmu, saskaņā ar jau iepriekš iegūto informāciju atsūkņēšanas laikā, metodiski svarīgi bija panākt to, lai pirmajā dienā pēc atsūkņēšanas pārtraukšanas vienā urbumā būtu iespējams veikt apmēram 3-4 līmeņa mērījumus. Precīzāk mērījumu skaits katram urbumam tika noteikts individuāli, atkarībā no līmeņu atjaunošanās ātruma gruntsūdens horizontā. Turpmākajā novērojumu periodā (pēc pirmās dienas) līmeņu izmaiņas novērošanas urbumos stabilizējās un nepārsniedza dažus centimetrus diennaktī, kā rezultātā mērījumu skaitu bija iespējams samazināt. Sākumā tas tika izmainīts līdz vienam mērījumam diennaktī, vēlāk – līdz vienam mērījumam divās dienās vai pat retāk.

Eksperimenta laikā iegūtie lauku mērījumu dati tika regulāri reģistrēti speciālā žurnālā, lai pēc tam tos varētu apkopot speciālā datu bāzē, kas bija nepieciešama iegūtās informācijas sistematizēšanai un rezultātu matemātiskajai analīzei.

3.1.3. Iegūto datu analīze un sistematizēšana

Realizētie lauku pētījumi, kas tika balstīti uz atsūkņēšanas eksperimenta mērījumu rezultātiem, deva iespēju iegūt augstas precizitātes informāciju par gruntsūdens līmeņa un brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma atjaunošanos laikā. Šī informācija tika apkopota un sistematizēta, bet pēc tam salīdzināta ar aprēķinu rezultātiem, kas tika iegūti neatkarīgi no lauku eksperimentiem.

Visi lauku mērījumu dati tika reģistrēti speciālā žurnālā un pēc tam apkopoti MS Office Excel datu bāzē, kas kopumā satur 113 ierakstus par 46 urbumiem. Visi dati izvietoti četrās Excel lapās/tabulās. Pirmā tabula satur lauku mērījumu pierakstus par līmeņu izmaiņām urbumos. Otrajā tabulā lauku mērījumu dati ir sistematizēti un matemātiski apstrādāti. Tām dienām, kurām kaut kādu iemeslu dēļ lauku mērījumi iztrūka, šie dati noteikti ekstrapolācijas ceļā no kopējās mērījumu vērtību rindas. Trešā tabula paredzēta novērojumu vērtību grafiku sastādīšanai pēc izstrādāta šablona. Ceturtajā tabulā atainoti lauku mērījumu statistiskie rādītāji katram novērojumu urbumam – minimālā, maksimālā un vidējā vērtība, kā arī šo vērtību izmaiņu amplitūda eksperimenta gaitā.

Tāpat atsevišķos MS Excel failos apkopoti dati par katra urbuma skaitliskajiem un empīriskajiem aprēķiniem, kā arī statistisko aprēķinu rezultāti. Daļa grafiskā materiāla glabājas arī MS Word un MathCad failu formātos.

Analītiskajiem aprēķiniem tika izmantotas vairākas Amerikas Naftas institūta mājas lapā pieejamās bezmaksas programmas, kas paredzētas divfāzu šķidrums apstākļu modelēšanai gruntsūdens horizontā. Eksperimenta datu analīzei kā viena no galvenajām tika izmantota uz Van Genuchtēna - Burdine divfāzu šķidrums sistēmas gruntsūdens horizontā fizikālo modeli balstīta programma (Burdine, 1953; Genuchten, 1980). Šī programma darbojas MS Excel vidē un ir paredzēta naftas produktu brīvās fāzes piesārņojuma attīrīšanas sistēmu projektēšanai nepieciešamo parametru aprēķināšanai (API-No.4729, 2003). Van Genuchtēna - Burdine modelis ļauj analizēt naftas produktu piesārņojuma izplatību porainā vidē vienam vai diviem savstarpēji izolētiem pazemes ūdeņu horizontiem.

Eksperimenta datu apstrādei tāpat tika izmantota arī *API Interactive LNAPL Guide* (API-Publication, 2004) pieejamā aprēķinu programma *NAPL Calculation Tools* (Huntley, Beckett, 2000). Ar šo programmu tika noteikti tādi parametri kā brīvās fāzes šķidrums piesātinājuma pakāpe un apjoms gruntī, tā mobilitāte, koncentrācijas un to izmaiņas laikā.

Lai salīdzinātu un arī kontrolētu aprēķinos izmantoto parametru atbilstību jau zināmiem un pārbaudītiem vidēji statistiskajiem rādītājiem tika pielietota vēl viena Amerikas naftas institūta izstrādātā programma - *LNAPL Distribution and Recovery Model*, jeb saīsināti – LRDM (API-No.4760, 2007). Šī programma tāpat kā Van Genuchtena - Burdine divfāzu šķidrums sistēmas gruntsūdens horizontā fizikālais modelis ļauj aprēķināt naftas produktu piesārņojuma izplatīšanās parametrus poraino nogulumu vidē.

Par cik pētījuma gaitā iegūto datu apstrādei un to sistematizēšanai bija nepieciešami arī atsevišķi speciāli parametri par dažādu ķīmisko vielu un iezu īpašībām, kurus nebija iespējams iegūt eksperimentu ceļā, turpmākajiem analītiskajiem aprēķiniem tika izmantoti vidēji statistiskie rādītāji, kas tika aizgūti no vairākām publiski pieejamām parametru datu bāzēm. Iezu fizikāli mehāniskie un hidroģeoloģiskie parametri tika iegūti no *Waterloo Hydrogeologic Inc.* izstrādātās datu bāzes *Enviro-Base Pro* (Enviro-Base_Pro, 2011), bet informācija par dažādu ķīmisko vielu īpašībām tika aizgūta no Amerikas Naftas institūta sagatavotās brīvās fāzes šķidrums parametru datu bāzes (Beckett, Steven, 2003; Bondy et al., 2006).

Lai kvantitatīvi aprakstītu divfāzu šķidrums plūsmu gruntsūdens horizontā, liela nozīme ir hidrauliskajiem parametriem, kas raksturo gruntī esošā šķidrums kapilārā pacēluma zonu horizonta augšējā, ūdens nepiesātinātajā daļā. Šo parametru aprēķināšanai tika izmantota vēl viena ASV Lauksaimniecības departamenta Pētījumu dienesta izstrādātā programma hidraulisko aprēķinu veikšanai ūdens nepiesātinātajām gruntīm – RETC (Genuthen et al., 1991).

Eksperimenta datu statistiskajai apstrādei un pētījuma izvirzītās hipotēzes pārbaudei tika sagatavota speciāla programma, kas darbojas MS Excel vidē un ir paredzēta atsūkņēšanas eksperimenta gaitā empīriski iegūto vērtību patiesuma novērtēšanai. Programma ļauj noteikt matemātiskas sakarības starp atsūkņēšanas eksperimentā empīriski iegūtajām un urbumā nomērītajām pētāmā parametra lieluma vērtībām.

Bez augstāk minētajām programmām iegūto datu sistematizēšanai, to analīzei un vizualizēšanai tika izmantotas arī citas programmas, tādas kā: SURFER – Golden Software Inc. datu interpolēšanas un ekstrapolēšanas programma karšu ģenerēšanai (SURFER, 2010); MathCAD – datu matemātiskās apstrādes un grafiku sastādīšanas programma (MathCad, 2011); 2x2 KALKULATOR – fizikālo lielumu un mērvienību konvertēšanas programma (Lobach D., 2004). Pēdējā no šīm programmām satur iebūvētu datu bāzi par dažādu ķīmisko vielu fizikālajām īpašībām un matemātisko aprēķinu praksē biežāk izmantojamajām konstantēm.

3.2. Pētījuma analītiskās metodes

Lai pārbaudītu zinātniskajā literatūrā (Aral, Liao, 2000; Lefebvre, 2006) aprakstīto divfāzu šķidrums plūsmas gruntsūdens horizontā hidroģeoloģisko parametru aprēķinu metožu pielietojamību Latvijas ģeoloģiskos un hidroģeoloģiskos apstākļos, tika veikta iepriekšēji zināmu likumsakarību un teorētisku pieņēmumu (API-No.4729, 2003) salīdzināšana ar autora realizēto oriģinālo lauku eksperimentu rezultātiem (Aleksāns,

2002). Šim nolūkam tika izmantotas vairākas metodes, starp kurām izdalāmas divas galvenās:

- 1) divfāzu šķidrums vertikālā sadalījuma gruntsūdens horizontā galveno raksturlielumu noteikšana ar skaitliskās analīzes metodi;
- 2) gruntsūdens horizontā esošās brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālā biezuma noteikšana, izmantojot lauku eksperimentu vērojumu datus (empīriskā metode).

3.2.1. Skaitliskās analīzes metode

Dabas zinātnēs lietišķos pētījumos darba hipotēžu pārbaudēs un lietišķu problēmu risināšanā plaši tiek pielietotas dažādas skaitliskās metodes, jeb skaitliskais eksperiments (SE). Skaitliska analīze balstās uz secīgi realizētu matemātiskā modeļa izstrādi, tā algoritmizēšanu, realizāciju uz datora un rezultātu analīzi. Algoritma metodes izstrāde ir viena no skaitliskā eksperimenta sastāvdaļām, kura shēmu savulaik ir piedāvājis akadēmiķis A. A. Samarskis (Samarskij, 1989).

A. A. Samarska shēmas pamatā ir pētāmais reālais objekts jeb parādība, tā izskaitļošanai ir vajadzīgs fizikālais modelis (FM), matemātiskais modelis (MM), skaitliskais algoritms (metode), atbilstoša programma, kas realizē šo algoritmu ar datora palīdzību, aprēķini un rezultātu analīze. Mūsdienu datori ļauj skaitlisko eksperimentu apskatīt kā vienu no galvenajiem līdzekļiem (instrumentiem) zinātnisku pētījumu veikšanai.

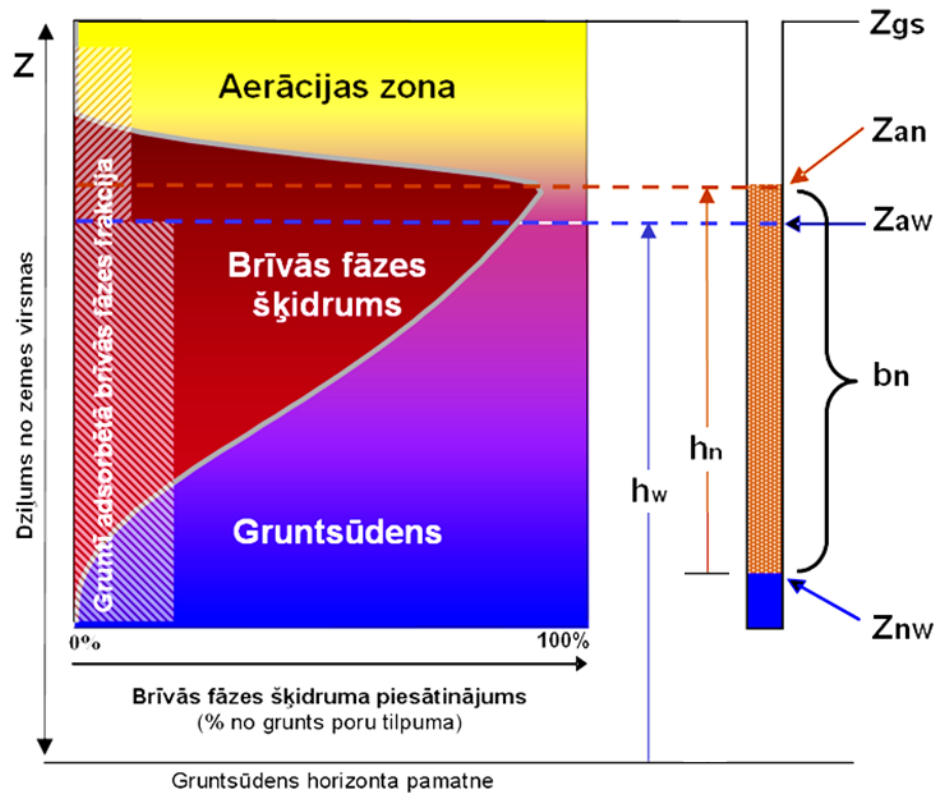
Svarīga skaitliskā eksperimenta sastāvdaļa ir noteikta funkcionālā triāde: reālais objekts → modelis → atrisinājums. Ņemot vērā iepriekšējo pieņēmumu, autora pētījumā veiktās skaitliskās analīzes realizācijas shēma tika veidota atbilstoši minētajam nosacījumam: pētījuma objekts – virs gruntsūdens līmeņa peldošs brīvās fāzes šķidrums slānis; skaitliskās analīzes modelis – pētījuma vajadzībām nedaudz papildināts Amerikas naftas institūta izstrādātais Genuhtena – Burdine modelis (API-No.4729, 2003; API-No.4760, 2007), bet risinājums – pēc mērījumu datiem matemātiski aprēķinātais virs gruntsūdens līmeņa peldošā brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālais biežums.

Pētījuma skaitliskais eksperiments tika balstīts uz divfāzu šķidrums sistēmas gruntsūdens horizontā fizikālo modeli, kas atspoguļots 3.4. attēlā. Attēlā redzamais FM raksturo divfāzu šķidrums vertikālā sadalījuma apstākļus homogēnai, neierobežotai platībā un griezumā poraino nogulumu videi gruntsūdens horizontā un šo šķidrums atbilstošu vertikālo sadalījumu novērošanas urbumā.

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

Minēto apliecina pētījuma objektā un citās vietās Latvijā veiktie lāzera izraisītās fluorescences (LIF) zondēšanas rezultāti, kuri līdz šim vēl nezināmā veidā apstiprina agrāk veikto pētījumu teorētiskos pieņēmumus un aprēķinus (Aral, Liao, 2000; Lefebvre, 2006; Aral, Liao, 1996; API-No.4760, 2007; Gruszczenski, 1987; Hughes et al., 1998). Šeit gan jāatzīmē, ka tāds klasisks, kā 3.4. attēlā redzamais, fizikālais modeļa gadījums dabā praktiski nav sastopams, jo reālos apstākļos uz brīvās fāzes šķidrums vertikālo sadalījumu gruntsūdens horizontā iedarbojas daudzfaktoru vide, kurai, atšķirībā no modelī pieņemtajiem konstantajiem parametriem, piemīt tendence lielākā vai mazākā mērā teorētiski izskaitļotos (modelētos) rezultātus „izkropļot”. Neskatoties uz šo atšķirību, LIF

zondēšanas rezultāti jebkurā gadījumā uzskatāmi apliecina pētījumā izvirzītās skaitliskās analīzes metodes pamatotību, par ko var pārliecināties aplūkojot 3.5. attēlu.



3.4. 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 (pjezometriskais) 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.

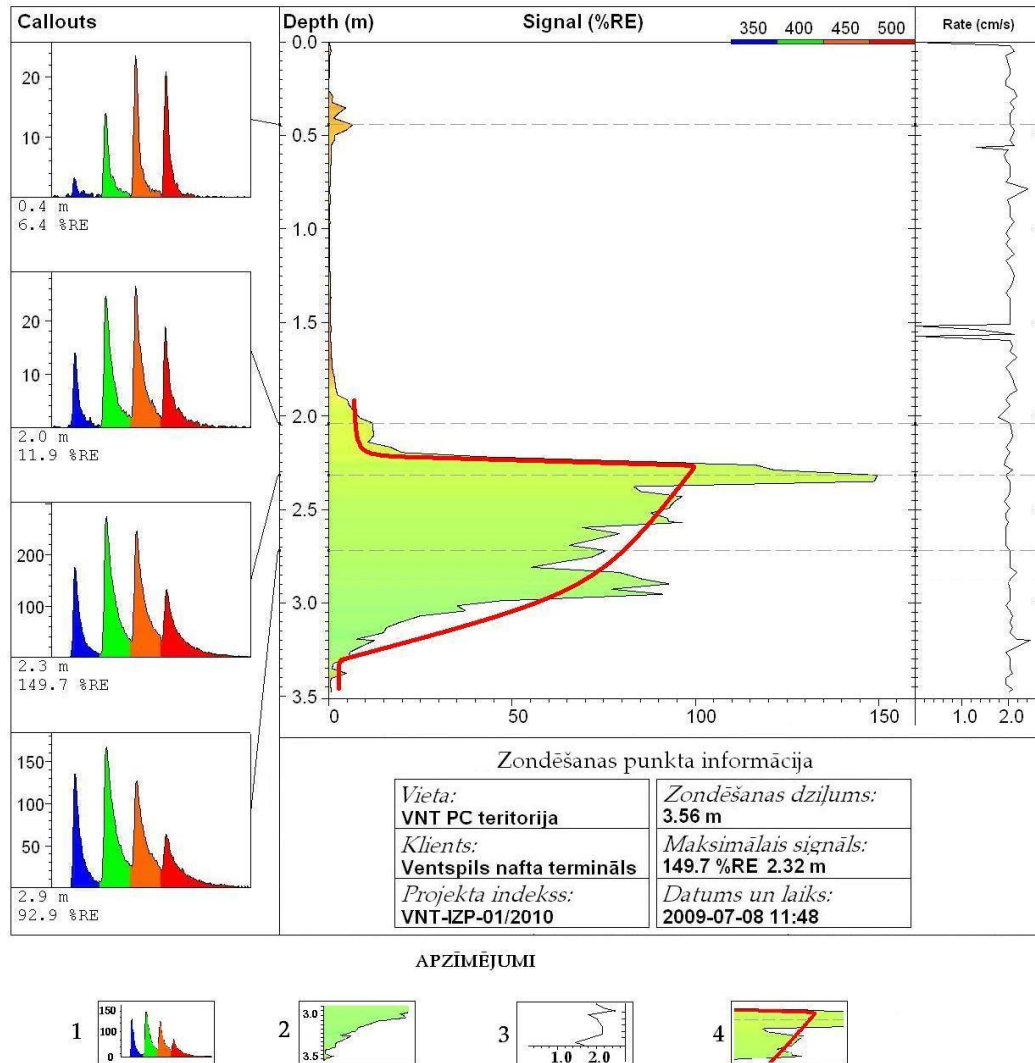
Figure 3.4. Physical model of two-phase liquid vertical distribution in the groundwater aquifer

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 groundwater interface.

No 3.4. un 3.5. attēla redzams, ka fizikālais modelis visai precīzi apraksta faktisko, ar lāzera izraisītās fluorescences metodi noteikto brīvās fāzes šķidruma vertikālo sadalījumu gruntsūdens horizontā.

Tomēr kā būtisku trūkumu lāzera izraisītās fluorescences metodei jāmin faktu, ka ar šo paņēmienu nav iespējams noteikt brīvās fāzes šķidruma saturs gruntī kvantitatīvos rādītājus (koncentrāciju), jo iekārta reģistrē tikai konkrētas brīvās fāzes šķidrumu veidojošās vielas emitēto starojumu (fluorescenci), kuru panāk šo vielu apstarojot ar noteikta viļņu garuma lāzeri. Dažādām vielām piemīt dažāda fluorescēšanas spēja pie viena un tā paša lāzera ierosinošā (inducētā) starojuma intensitātes. Atsevišķas vielas var

fluorescēt ļoti vāji vai pat nemaz. Detalizētāka informācija par LIF metodi skatāma iekārtas ražotājfirmas *Dakota Technologies* mājas lapā <http://www.dakotatechnologies.com>, vai arī attiecīgā literatūrā (Aldstadt et al., 2002; Aleksāns, Dimitrijevs, 2009).



3.5. attēls. Divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma gruntsūdens horizontālā profilis, noteikts ar lāzera izraisītās fluorescences (LIF) metodi

APZĪMĒJUMI. 1 – brīvās fāzes šķidruma emitētās (fluorescētā) gaismas viļņu formas, 2 – lāzera izraisītās fluorescences profils. 3 – zondēšanas ātrums no augšas uz leju ($\text{cm}\times\text{s}^{-1}$), 4 – modelētais (sarkanā līnija) un ar LIF metodi noteiktais (zaļais tonējums) brīvās fāzes šķidruma piesātinājums gruntī.

Figure 3.5. Two-phase liquid fluorescence–depth vertical profile for aquifer, detected by laser induced fluorescence (LIF) method

LEGEND. 1 – waveforms of free-phase liquid emitted (fluoresced) light, 2 - the total fluorescence–depth profile, 3 – probing rate from top to the depth ($\text{cm}\times\text{s}^{-1}$), 4 – match between measured (green area) and predicted by model (red line) free phase liquid saturation in the soil.

Divu nesajaucos šķidrumu vertikālā sadalījuma raksturu gruntsūdens horizonta porainajiem nogulumiem nosaka galvenokārt šiem nogulumiem piemītošās kapilārās īpašības un to porās esošā šķidruma izraisītais kapilārais spiediens (API-No.4760, 2007), kuru var aprēķināt, izmantojot Van Genuhtena kapilārā spiediena modeli (Genuchten, 1980).

Van Genuhtena kapilārā spiediena modelis divu nesajaucos šķidrumu vertikālā sadalījuma gruntsūdens horizontā ir balstīts uz sekojošu algoritmu (API-No.4760, 2007):

- 1) kapilārā pacēluma zonas augstuma aprēķins maksimālajam urbumā novērotajam brīvās fāzes šķidruma slānim (z_{\max});
- 2) brīvās fāzes šķidruma sākotnējā (maksimālā) vertikālā sadalījuma gruntsūdens horizontā noteikšana (S_{ni});
- 3) brīvās fāzes šķidruma neatgriežamā (gruntī adsorbētā/iesprostotā) apjoma vertikālā sadalījuma noteikšana;
- 4) brīvās fāzes šķidruma un ūdens vertikālā sadalījuma aprēķināšana gruntsūdens horizontam pēc urbumā piemērtā brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma.

Brīvās fāzes šķidruma slāņa maksimālo kapilārā pacēluma līmeni (z_{\max}) aprēķina, balstoties uz monitoringa lauku mērījumu gaitā novērošanas urbumos noteikto maksimālo brīvās fāzes šķidruma slāņa biezumu ($b_{n[\max]}$), pēc sekojoša vienādojuma (API-No.4760, 2007):

$$z_{\max} = \frac{\alpha_{an} z_{an} - \alpha_{nw} z_{nw}}{\alpha_{an} - \alpha_{nw}}, \quad (3.1)$$

kur,

- α_{an} – gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsmas spraiguma mijiedarbības faktors izteikts cm^{-1} un nosakāms pēc vienādojuma: $\alpha_{an} = \alpha \times \rho_n \times \sigma_{aw} \times \sigma_{an}^{-1}$ (API-No.4729, 2003), kur α - Van Genuhtena alfa-parametrs, cm^{-1} ; σ_{an} - gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsmas spraigums, $\text{dini} \times \text{cm}^{-1}$; σ_{aw} - gaisa un ūdens saskares virsmas spraigums, $\text{dini} \times \text{cm}^{-1}$; ρ_n – brīvās fāzes šķidruma blīvums, $\text{g} \times \text{cm}^{-3}$;
- α_{nw} – brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas spraiguma mijiedarbības faktors, cm^{-1} ; nosakāms pēc vienādojuma: $\alpha_{nw} = \alpha \times (1 - \rho_n) \times \sigma_{aw} \times \sigma_{an}^{-1}$ (API-No.4729, 2003), kur pārējie apzīmējumi ir iepriekšējie;
- z_{an} – gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsmas līmenis, cm ; aprēķina pēc vienādojuma $z_{an} = (1 - \rho_n) \times b_n$ (API-No.4729, 2003), kur b_n – urbumā novērojamais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums centimetros (skat. 3.4. att.);
- z_{nw} – brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas līmenis ko aprēķina pēc vienādojuma $z_{nw} = \rho_n \times b_n$, (API-No.4729, 2003), kur visi apzīmējumi iepriekšējie.

Veicot attiecīgas matemātiskās darbības ar sakarību (3.1), to var viegli pārveidot sekojošā brīvās fāzes šķidruma slāņa maksimālā kapilārā pacēluma līmeņa (z_{\max}) aprēķina vienādojumā (API-No.4760, 2007):

$$z_{\max} = z_{an} \frac{(1 - \rho_r)(\sigma_{an} / \sigma_{nw})}{\rho_r - (1 - \rho_r)(\sigma_{an} / \sigma_{nw})} b_n, \quad (3.2)$$

kur,

- ρ_r – brīvās fāzes šķidruma ρ_n un ūdens ρ_w blīvumu attiecība: $\rho_r = \rho_n \times \rho_w^{-1}$ (API-No.4729, 2003), bet visi pārējie apzīmējumi ir iepriekšējie.

Van Genuhtena alfa-parametrs (α) ir gaisa-ūdens šķidrums sistēmu raksturojošs lielums, kura vērtība ir apgriezti proporcionāla kapilārā pacēluma zonas biezumam. Saskaņā ar R.H. Brūka (Brook) un A.T. Koreja (Corey) pieņēmumu (Brooks, Corey, 1964), α -parametrs ir saistīts ar mitruma pārvirzes spiediena augstumu (Ψ_b) caur tuvinātu sakarību: $\alpha = \sim 1 \times \Psi_b^{-1}$.

Zemāk 3.1. tabulā ir apkopotas iežu kapilārās īpašības raksturojošo parametru vidēji statistiskās vērtības Van Genuhtena (VG) un Brūka-Koreja (BC) modelim, kas iegūts no Amerikas Naftas institūta izstrādātās brīvās fāzes šķidrums parametru datu bāzes (Beckett, Steven, 2003; Bondy et al., 2006).

3.1. tabula. Izplatītāko iežu kapilārās īpašības raksturojošo parametru vidēji statistiskās vērtības

Table 3.1. Average statistical values of parameters characterizing capillary properties of most common rocks

Iežu raksturojums	van Genuhtena modelis			Brūka-Koreja modelis	
	α , cm^{-1}	N (β)	S_{wr} , %	Ψ (P_d), cm	λ
Vāji šķirots grants-smilts maisījums	0,00815	2,75	44,0	37	0,63
Vāji šķirots smilts-grants maisījums	0,02540	2,88	35,3	40	0,80
Labi šķirots smilts-grants maisījums	0,07830	1,55	29,0	5,8	0,44
Labi šķirota smilts	0,01120	3,25	34,0	68	1,50
Vāji šķirota smilts	0,01850	3,17	20,9	62	1,88
Vāji šķirota smilts ar aleirītu	0,01380	3,55	19,0	44	1,41
Vāji šķirota smilts ar aleirītu	0,02050	2,28	18,4	53	0,98
Aleirītiska smilts	0,01650	2,55	34,4	89	1,00
Aleirīta-smilts slāņojums	0,00833	1,98	67,3	117	0,56
Smilšains aleirīts	0,00670	2,15	48,1	127	0,80
Aleirīts	0,00641	2,01	42,6	201	0,60
Mālaina smilts	0,00327	2,68	61,0	181	1,22
Māla-smilts slāņojums	0,00285	2,20	89,0	210	0,87

Brīvās fāzes šķidrums sākotnējo piesātinājuma vertikālo sadalījumu (S_{ni}) gruntsūdens horizonta līmenim (z) nosaka diviem gadījumiem pēc sekojošiem vienādojumiem (API-No.4760, 2007):

- 1) grunts piesātinātajam intervālam ($z < z_{an}$),

$$S_{ni}(z) = \frac{(1 - S_{wr})(1 - S_{e[w]}(z))}{1 - f_r S_{e[w]}(z)}, \quad (3.3)$$

2) grunts nepiesātinātajam intervālam ($z > z_{an}$),

$$S_{ni}(z) = \frac{(1 - S_{wr})(S_{e[t]}(z) - S_{e[w]}(z))}{1 - f_r(1 + S_{e[w]}(z) - S_{e[t]}(z))}, \quad (3.4)$$

kur,

S_{wr} – neatgriežamais (gruntī aizturētais) ūdens piesātinājums;
 f_r – brīvās fāzes šķidrums neatgriežamā (gruntī aizturētā) apjoma f-faktors;
 $S_{e[w]}(z)$ – efektīvais ūdens piesātinājums (z) līmenī.

Neatgriežamais ūdens piesātinājums (S_{wr} , skat. 3.1. tab.) norāda maksimālo ūdens apjomu gruntī, kas nevar izraisīt šķidrums plūsmu, jo tas ir iesprostots porās vai arī tas ir cieši saistīts (adsorbēts) ar minerālu graudu virsmu (Luckner et al., 1989). Formāli neatgriežamais ūdens piesātinājums var tikt definēts, kā virs gruntsūdens līmeņa kapilāro spēku ietekmē nogulumu porās aizturētais ūdens apjoms (kapilārā mitrumietilpība). Saskaņā ar Van Genuhtena (Genuthen, Nilson, 1985) un L. Luknera (Luckner et al., 1989) pieņēmumu šis parametrs (S_{wr}) pēc būtības ir empīriskā un bez īpašas fizikālas nozīmes iegūta konstante, kas raksturo grunts spēju noturēt ūdeni un ir detalizēti aprakstīta Brūka-Koreja pētījumā (Brooks, Corey, 1964).

Brīvās fāzes šķidrums apjoma f-faktors (f_r) ir atkarīgs kā no grunts tekstūras, tā arī no grunts piesātinājuma – tā ir pilnībā piesātināta ar šķidrumu (divfāzu sistēma – ūdens + nesajaucams šķidrums), vai arī grunts ir tikai daļēji piesātināta ar šķidrumu (trīs-fāzu sistēma – ūdens + nesajaucams šķidrums + gaiss). Saskaņā ar D.W. Vaddilla un J.C. Parkera modelēšanas rezultātiem (Waddill et al., 1997) ir ticis konstatēts, ka f-faktora vērtība caurmērā variē robežās no 0,2 līdz 0,5, bet praktiskām vajadzībām tika rekomendēts izmantot vidējo vērtību – vienādu ar 0,3.

Efektīvā piesātinājuma parametrs ($S_{e[w]}$) ūdenim un kopējam šķidrums apjomam ($S_{e[t]}$) nosakāms pēc van Genuhtena vienādojumiem (API-No.4760, 2007):

$$S_{e[w]}(z) = \frac{1}{\left(1 + (\alpha_{[nw]}(z - z_{nw}))^N\right)^M}, \quad (3.5)$$

$$S_{e[t]}(z) = \frac{1}{\left(1 + (\alpha_{[an]}(z - z_{an}))^N\right)^M}, \quad (3.6)$$

kur:

$S_{e[w]}$ – efektīvais ūdens piesātinājums;
 $S_{e[t]}$ – efektīvais kopējā šķidrums (ūdens + brīvā fāze) piesātinājums;
 z – līmenis, kuram nosaka šķidrums piesātinājumu (cm), pārējie apzīmējumi iepriekšējie, skat. 3.4. att.;
 N, M – modeļa parametri, kur $M = 1 - 1 \times N^{-1}$, bet $N = 1 \times (1 - M)^{-1}$.

Efektīvais ūdens piesātinājums ($S_{e[w]}$) ir bezdimensijas lielums, kura vērtība mainās robežās no 0 līdz 1 (API-No.4760, 2007). Parametrs N var tikt pielīdzināts Brūka-Koreja poru izmēra sadalījuma indeksam (λ) ar tuvinātu attiecību (API-No.4729, 2003) vienādu ar: $N = \lambda + 1$ (λ vērtības biežāk sastopamajiem nogulumiem dotas tabulā 3.1).

Brīvās fāzes šķidrums neatgriežamā (gruntī aizaurētā, adsorbētā) apjoma (S_{nr}) aprēķināšanai līmenim (z) izmantojams sekojošs vienādojums (API-No.4760, 2007):

$$S_{nr}(z) = f_r S_{nr}(z), \quad (3.7)$$

Turpinot aprēķinu brīvās fāzes šķidrums (S_n) un ūdens (S_w) vertikālā sadalījuma aprēķināšanu gruntsūdens horizontam veic pēc sekojošiem vienādojumiem:

$$S_w(z) = S_{wr} + (1 - S_{wr} - S_{nr}) S_{e[w]}(z), \quad (3.8)$$

$$S_n(z) = S_{nr} + (1 - S_{wr} - S_{nr})(S_{e[r]} - S_{e[w]}), \quad (3.9)$$

kur:

- $S_w(z)$ – vertikālais ūdens piesātinājuma sadalījums gruntsūdens horizonta apūdeņotajai zonai (z) līmenī;
- $S_n(z)$ – vertikālais brīvās fāzes šķidrums sadalījums gruntsūdens horizonta apūdeņotajai zonai (z) līmenī.

Savukārt brīvās fāzes šķidrums (S_n) un ūdens (S_w) vertikālo sadalījumu gruntsūdens horizonta piesātinātajai zonai ($z < z_{an}$) saista sakarība:

$$S_n(z) = 1 - S_w(z), \quad (3.10)$$

kur visi apzīmējumi ir iepriekšējie.

Aprakstīto brīvās fāzes šķidrums vertikālo sadalījumu griezumā uzskatāmi ilustrē 3.4. attēls.

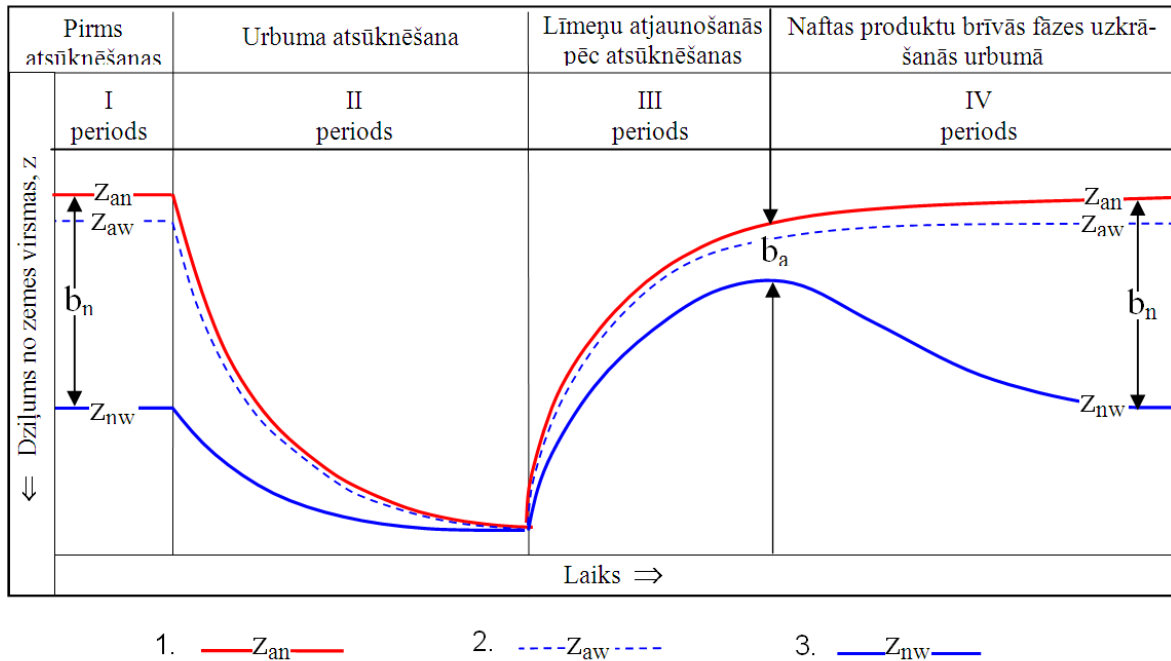
3.2.2. Empīriskā metode

Izvēlētās zinātniskās metodes pamatkonceptcija ir visu pierādījumu empīriskais pamatojums ar datiem, kas iegūti eksperimentu vai novērojumu ceļā, tāpēc promocijas darba pētījumā tieši empīriskie novērojumi iespējams ir labākais veids, kā nodrošināt realizēto pētījumu objektivitāti. Šajā nozīmē uz empīriskiem vērojumiem un pētījumiem balstīta atziņa ļauj izskaidrot notiekošos procesus pētījuma gaitā, kā arī prognozēt šādu procesu norisi līdzīgos objektos cituviet. Tomēr zināms (Mikuda, 2008), ka empīriskiem novērojumiem piemīt arī vairāki trūkumi, starp kuriem svarīgākie ir fragmentārisms, novērojumu skaita, laika un realizāciju ierobežojumi, atkārtamības ne viennozīmīgums, kā arī atbilstošas teorētiskās bāzes iztrūkums, kas neļauj veiktos novērojumus vispusīgi izvērtēt un interpretēt, zināmi arī citi trūkumi un nepilnības.

Ņemot vērā iepriekšēji minēto, uz šādiem ne vienmēr pietiekoši zinātniski pamatotiem un aprobētiem empīriskiem pētījumiem balstītas atziņas ļauj izskaidrot notiekošos procesus dabā realizēta eksperimenta gaitā, kā arī ļauj labāk izprast un prognozēt analogisku procesu norisi un iespējamus rezultātus citos līdzīgos pētījumu objektos.

Promocijas darba pētījuma empīriskās metodes piemērošanas pamatā ir urbumu atsūkšanās eksperimentos novērotā ūdens līmeņa atjaunošanās parādība (fenomens)

divfāzu šķidruma plūsmas apstākļiem gruntsūdens horizontā. Saskaņā ar šiem novērojumiem (Lefebvre, 2006; Aral, Liao, 2000; Gruszczenski, 1987; Aleksāns, Klimovičs, 2006) pēc atsūknēšanas eksperimenta pārtraukšanas, līmeņa atjaunošanās stadijā urbumā vienmērīgi paaugstinās gan brīvās fāzes augšējais līmenis (z_{an}), gan arī brīvās fāzes – ūdens saskares virsma (z_{nw}). Tomēr pēc kāda noteikta laika brīvās fāzes – 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 ilustrē pēc pētījuma poligonā atsūknēšanas eksperimentu mērījumu datiem izveidotais brīvās fāzes šķidruma un, uz konkrētiem zinātniskiem eksperimentiem balstīts, ūdens līmeņa izmaiņu vispārināts grafiks, kas skatāms 3.6. attēlā.



3.6. 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.

Figure 3.6 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) ground-water 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.

3.6. attēlā atainotais urbuma atsūknēšanas eksperimenta process ir sadalīts četros laika posmos, kas apzīmēti ar romiešu cipariem no I līdz IV:

- I. divfāzu šķidruma līmeņu stāvoklis urbumā pirms atsūknēšanas uzsākšanas;
- II. līmeņu izmaiņu dinamika urbumā tā atsūknēšanas laikā;
- III. līmeņu atjaunošanās dinamika urbumā pēc sūknēšanas pārtraukšanas līdz brīdim, kad brīvās fāzes – ūdens saskares virsma (z_{nw}) vairs nepaaugstinās;

IV. līmeņu izmaiņu dinamika pēc tam, kad brīvās fāzes – ūdens saskares virsma (z_{nw}) urbumā sāk pakāpeniski pazemināties un līdz pilnai abu līmeņu (z_{an} un z_{nw}) stabilizācijai urbumā.

Attēlā 3.6. redzamās parādības (fenomena) pamatā ir divfāzu šķidruma spiediena spēku līdzsvara stāvoklis, kas veidojas gaisa, brīvās fāzes un ūdens mijiedarbības rezultātā (Lefebvre, 2006). Novērojums rāda, ka līmeņu atjaunošanās stadijā gan urbumā, gan tam piegulošajā nogulumu slānī divu nesajaucos šķidrumu vertikālā spiediena spēku sadalījuma izmaiņu tendence sākuma periodā (3.6. attēla grafikā III periods) ir līdzīga, jo brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas līmeņa celšanās grunts horizontā apstieidz gruntsūdens kapilārās zonas veidošanos divu nesajaucos šķidrumu saskares zonā.

Pēc kāda laika brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas līmeņa stāvoklis horizontā stabilizējas, tomēr daļa ūdens kapilāro spēku ietekmē vēl turpina pārvietoties nogulumu mikroporās uz augšu. Tā rezultātā daļa brīvās fāzes šķidruma masas no poru telpas tiek izspiesta un tā pārvietojas tajā virzienā, kur kapilārais spiediens ir mazāks, tas ir – uz lielākajām porām un tukšumiem horizonta nogulumu slānī. Par cik novērošanas urbums pēc saviem fiziskiem parametriem ir viens no šādiem „tukšumiem” nogulumu horizontā, kura kapilārās īpašības praktiski ir vienādas ar nulli, tad brīvās fāzes šķidrums sāk uzkrāties urbumā. Rezultātā brīvās fāzes šķidrums ar savu masu sāk spiest un pārvietot ūdens līmeni uz leju (3.6. attēla grafikā IV periods).

Zinātniskajā literatūrā publicēto pētnieku darbi (Lefebvre, 2006; Gruszczenski, 1987; Aleksāns, Klimovičs, 2006), kā arī promocijas darba novērojumu rezultāti ļauj konstatēt, ka 3.6. attēlā redzamais brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas izmaiņu grafika līknes augšējais lūzuma punkts līmeņu atjaunošanās periodā (attēlā uz robežas starp III un IV periodu) raksturo nosacījumus pie kuriem brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums urbumā ir vienāds ar šī slāņa aktuālo biezumu gruntsūdens horizontā.

Apskatītajā gadījumā divfāzu šķidruma spēku sadalījuma grafiskais attēlojums novērošanas urbūmam dots 3.7. attēlā.

Attēla kreisajā pusē parādīts divu nesajaucos šķidrumu līmeņu pacēluma augstums (h) novērošanas urbūmā attiecībā pret brīvi izvēlētu atskaites punktu (z), bet labajā pusē – šķidruma spiediena (p) izmaiņu grafiks. Novērošanas urbūmā U-1 kreisajā pusē vērojams tikai ūdens līmenis (z_{aw}), jo urbuma filtra intervāls atrodas zem brīvās fāzes šķidruma slāņa. Savukārt attēla labajā pusē izvietotajā urbūmā, kura filtra intervāls aptver gan ūdeni, gan brīvās fāzes šķidruma slāni un daļu aerācijas zonas virs tā, veidojas gan brīvās fāzes šķidruma augšējais līmenis (z_{an}), gan arī tā saskares virsma ar ūdeni (z_{nw}).

Attēla labajā pusē esošajā urbūmā virsmai (z_{aw}) ir tikai hipotētiska nozīme, un tā uzskatāma par ūdens pjezometrisko līmeni, kurš, izvietojoties zem brīvās fāzes šķidruma slāņa, atrodas hidrauliskā spiediena stāvoklī. Saskaņā ar Gībena-Herberga teoriju (Chidley, Lloyd, 1977) un 3.7. attēlā redzamo grafiku var konstatēt, ka $h_w = z_{nw}$, bet $h_n = z_{an} + z_{nw}$, kur $z_{an} = z_{an} - z_{aw}$ un $z_{nw} = z_{aw} - z_{nw}$.

No 3.7 attēla redzams, ka divu nesajaucos šķidrumu saskares punktā (A) brīvās fāzes šķidruma un ūdens spiedieni ir vienādi:

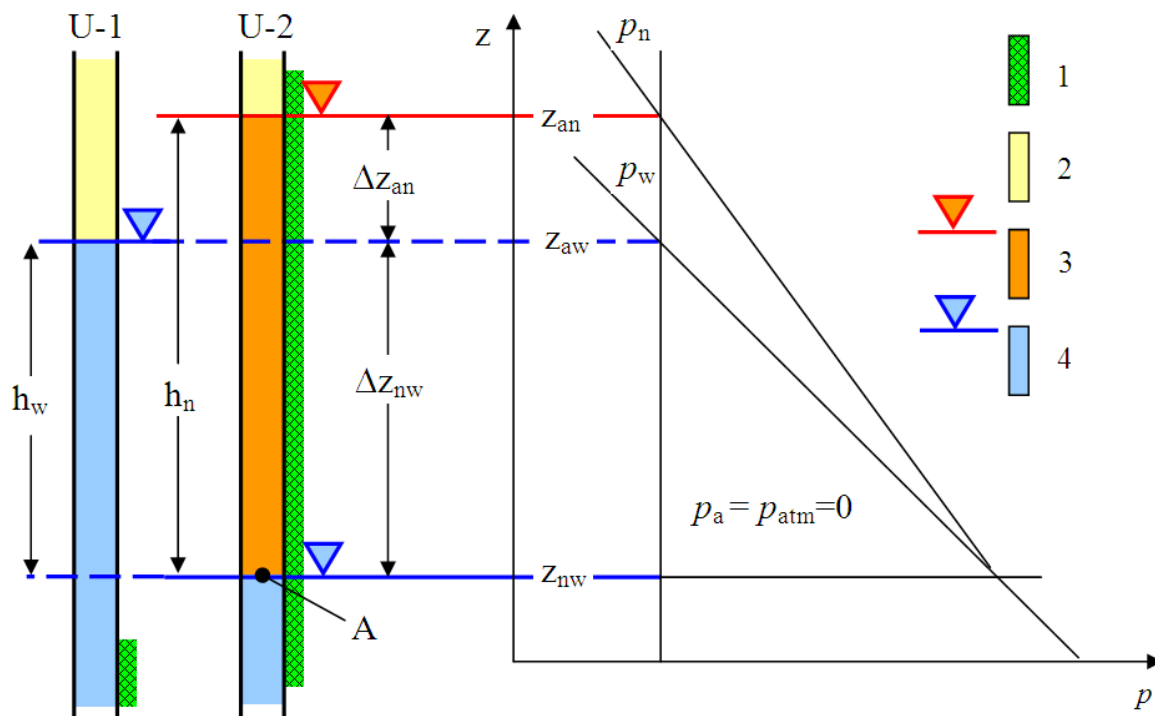
$$p_n = p_w, \quad (3.11)$$

Zinot ūdens blīvumu (ρ_w) un brīvās fāzes šķidruma blīvumu (ρ_n), vienādojumu (3.12) var pārrakstīt sekojošā veidā:

$$h_n \times \rho_n \times G = h_w \times \rho_w \times G, \quad (3.12)$$

kur:

- G – gravitācijas konstante ($G = 6,67259 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2 \times \text{kg}^{-2}$);
 ρ_n – brīvās fāzes šķidruma blīvums;
 ρ_w – ūdens blīvums gruntsūdens horizontā;
 – visi pārējie apzīmējumi iepriekšējie.



3.7. attēls. Divfāzu šķidruma spiediena spēku sadalījuma novērošanas urbumā shēma (Lefebvre, 2006)

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, A – brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares punkts.

Figure 3.7. The scheme of two-phase liquid pressure forces distribution in the observation well (Lefebvre, 2006)

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_{aw} - 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, A – free phase liquid and water interface point.

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

$$(\Delta z_{an} + h_w) \times \rho_n = h_w \times \rho_w, \quad (3.13)$$

Pārveidojot izteiksmi (3.13), iegūstam sakarību, kas pēc savas izteiksmes formas pilnībā atbilst Gībena-Hercberga vienādojumam (Chidley, Lloyd, 1977).

$$\Delta z_{an} \times \rho_n = (\rho_w - \rho_n) \times h_w = (\rho_w - \rho_n) \times \Delta z_{nw}, \quad (3.14)$$

$$\Delta z_{nw} = \Delta z_{an} \times \frac{\rho_n}{(\rho_w - \rho_n)}. \quad (3.15)$$

Saskaņā ar attēlu 3.7. redzamo izriet, ka brīvās fāzes šķidruma slāņa augstums urbumā ir vienāds ar $h_n = h_w + \Delta z_{an}$, bet tajā pat laikā tas ir vienāds arī ar $h_n = \Delta z_{nw} + \Delta z_{an}$, kas ļauj vienādojumu pierakstīt sekojoši (Lefebvre, 2006):

$$h_n = \Delta z_{an} \times \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_w - \rho_n} \right), \quad (3.16)$$

$$h_n = \Delta z_{an} \times \frac{\rho_n}{\rho_w - \rho_n}. \quad (3.17)$$

Tādējādi vienādojums (3.17) ir izmantojams divfāzu šķidruma sistēmas līmeņu augstuma aprēķināšanai novērošanas urbumā. Tomēr, kā norāda iepriekšēji veiktie pētījumi (Lefebvre, 2006), tas nav piemērojams šo līmeņu noteikšanai ģeoloģisko nogulumu horizontā, kur kapilāro spēku ietekmē veidojas pilnīgi atšķirīgs divu nesajaucos šķidrumu vertikālais sadalījums, kas atainots 3.8. attēla (B) grafikā un kura sastādīšanai izmantoti pētījuma gaitā iegūtie mērījumu dati no 36. urbuma.

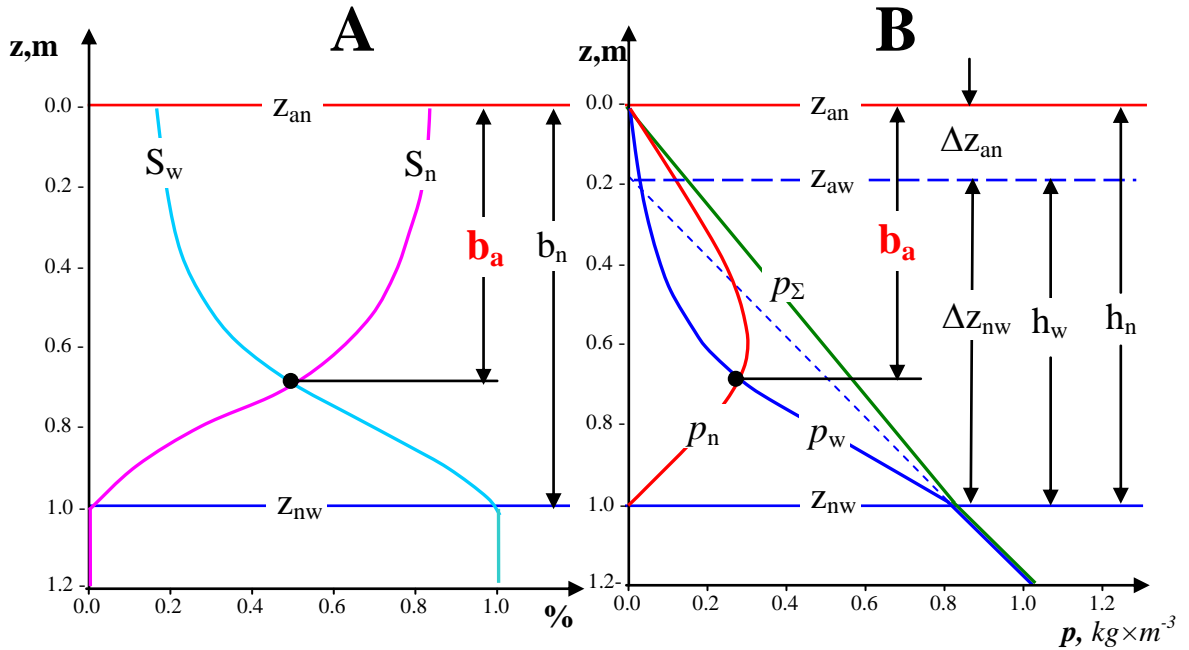
Divu nesajaucos šķidrumu vertikālā sadalījumu gruntsūdens horizonta nogulumos galvenokārt ietekmē ūdens un brīvās fāzes šķidruma piesātinājuma pakāpes procentuālā attiecība, kuru ar skaitlisko metodi nosaka pēc vienādojumiem (3.8) un (3.9). Ūdens (S_w) un brīvās fāzes šķidruma (S_n) piesātinājuma pakāpes procentuālās attiecības izmaiņu līknes vertikālā griezumā dotas 3.8. attēla (A) grafikā. Redzams, ka divfāzu šķidruma slāņa augšējā daļā līdz pat 80% dominē brīvās fāzes šķidrums, bet 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 šķidruma slāņa augšējā daļā nekad nav vienāds ar nulli, kur tā lielāku vai mazāku klātbūtni vienmēr nodrošina ūdens kapilārās zonas iespēšanās brīvās fāzes šķidruma slānī (Lefebvre, 2006), kas arī labi redzams 3.8. attēla grafikā (A).

Atkarībā no ūdens (S_w) un brīvās fāzes šķidruma (S_n) piesātinājuma pakāpes procentuālās attiecības izmaiņām vertikālā virzienā mainās arī ūdens (p_w) un brīvās fāzes šķidruma (p_n) spiediens gruntsūdens horizontā.

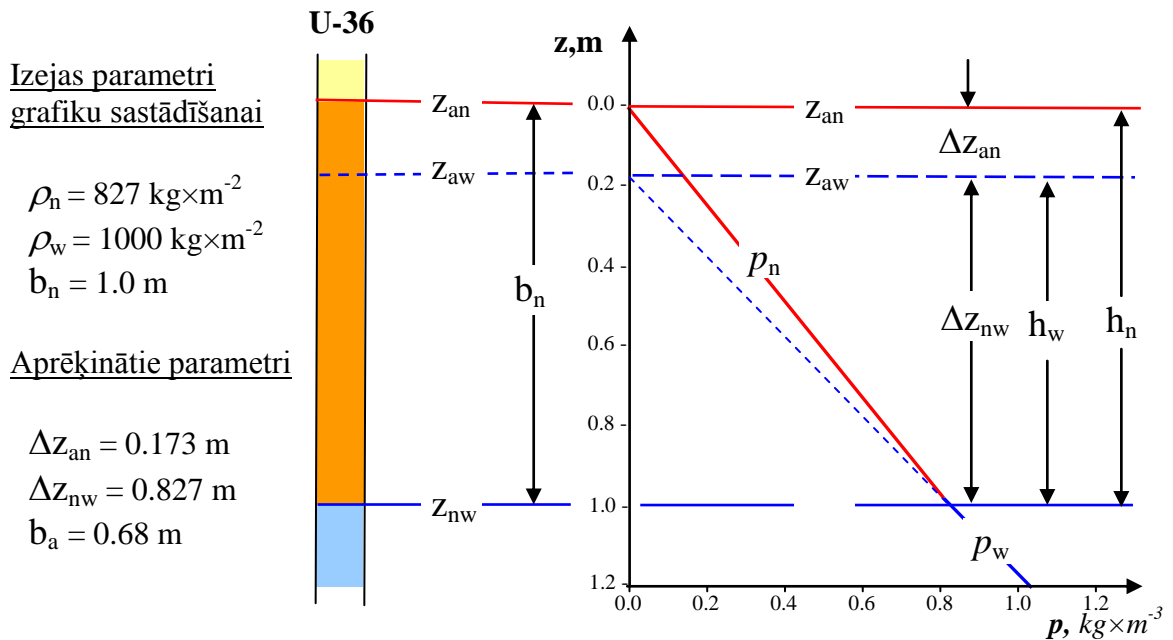
No 3.8. attēla (B) grafika redzams, ka spiediena izmaiņu līknēm ir sarežģīts raksturs – slāņa augšējā daļā dominē brīvās fāzes šķidruma, bet apakšā – ūdens spiediens. Tomēr, neskatoties uz šo līkņu sarežģīto raksturu, to summārais spiediens p_Σ ($p_\Sigma = p_n + p_w$) gruntsūdens horizontā (3.8. att., (B) grafiks) ir ekvivalents p_n un p_w spiedienam novērošanas urbumā (3.8. att., (C) grafiks), kas faktiski arī pierāda to, ka visa divfāzu šķidruma sistēma – gan urbumā, gan arī horizontā atrodas līdzsvarā (Lefebvre, 2006).

Gan (A) gan (B) grafikos redzams, ka tajos attēlotās līknes savā starpā krustojas, kas saskaņā ar promocijas darbā izvirzīto hipotēzi, varētu atbilst 3.6. attēlā redzamajam

punktam (b_a), kad līmeņu atjaunošanās stadijā urbumā brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas līmeņa celšanās līknē iestājas lūzuma punkts, pēc kura šķidrumu saskares virsma urbumā sāk iegrimt, bet brīvās fāzes slāņa biezums pieaug. Šo pieņēmumu apstiprina 36. urbūmam noteiktais brīvās fāzes šķidruma slāņa aktuālais biezums (b_a), kas tika noteikts gan ar analītiskiem aprēķiniem (3.8. att. A un B grafiki), gan arī ar empīrisko metodi (3.6. att.). Pirmajā gadījumā šis rādītājs ir 0,68 m, bet otrajā 0,69 m.



C



3.8. attēls. Divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma galveno parametru salīdzinājums gruntsūdens horizonta nogulumu slānim – A,B grafiki un novērošanas urbūmam – C grafiks (apzīmējumus skatīt 3.7. att.)

Figure 3.8. Two-phase liquid vertical distribution key parameters comparison for groundwater aquifer (A, B graphs) and observation well (C graph), (legend see in Figure 3.7.)

3.3. Datu statistiskā apstrāde

Veiktajā pētījumā kā zinātnisks pieņēmums tika izvirzīta hipotēze par jaunām, vēl neizpētītām brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālā biezuma noteikšanas iespējām, kas nākotnē varētu tikt attīstīta par pētniecības metodi, un šādas metodes ticamību, kā arī hipotēze par šādā veidā iegūto datu izmantošanas iespējām svarīgu hidroģeoloģisko parametru aprēķiniem divfāzu šķidrums plūsmas apstākļiem gruntsūdens horizontā. No statistiskā skatījuma izvirzītās hipotēzes ir jāsaprot kā pieņēmums, ka ar divām dažādām metodēm noteikto (empīriski un analītiski) divu parametru kopu vērtības ir patiesas (Geske, 2001). Tas nozīmē, ka atsūkšanās eksperimenta mērījumu rezultātu un analītisko aprēķinu dati adekvāti raksturo nosakāmā parametra skaitlisko vērtību un šī parametra variāciju (Sokal, Rohlf, 1981), kas turpmāk šos datus ļauj ar statistiski noteiktu ticamības pakāpi izmantot dažādiem hidroģeoloģiskiem aprēķiniem.

Veiktā pētījuma datu statistiskās apstrāde galvenie uzdevumi bija divi:

- 1) pārbaudīt atsūkšanās eksperimenta gaitā empīriski iegūtā (pētāmā) lieluma vērtību kopas patiesumu, un salīdzināt to ar skaitlisko (modelēto) aprēķinu ceļā teorētiski noteikto (zināmo) datu kopu;
- 2) noteikt regresijas funkcijas veidu, t.i. atkarības matemātisko formu starp atsūkšanās eksperimentā empīriski iegūtajām un urbumā nomērītajām pētāmā parametra lieluma vērtībām, kas turpmāk ļautu prognozēt viena gadījuma lieluma vērtības pie uzdotām otra gadījuma lieluma vērtībām (Aleksāns, 2009).

Datu statistiskai apstrādei tika izvēlēts sekojošs 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.

3.3.1. Pētījuma hipotēzes izvirzīšana

Pētījumā iegūto datu ticamības un to pielietojamības iespēju pārbaudei tika izvirzītas divas nulles hipotēzes. Pētījumā nulles hipotēze (H_0) ir tā, kura tika testēta (Geske, 2001).

Tika izvirzītas sekojošas divas nulles hipotēzes.

- 1) Pirmā nulles hipotēze H_{01} : starp urbumā noteiktajiem (nomērītajiem) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību gadījuma lielumiem X_1 un skaitliski noteiktajiem (modelētajiem) Y_1 eksistē sakarība – pieaugot neatkarīgā mainīgā lieluma X_1 vērtībām, lineāri pieaug atkarīgā mainīgā lieluma Y_1 vidējās vērtības un šīs sakarības regresijas līknei ir lineāra funkcija:

$$Y_1 = b0_1 + b1_1 X_1 , \quad (3.18)$$

kur:

- X_1 – urbumā nomērītā parametra vērtība;
- Y_1 – skaitliski aprēķinātā (modelētā) parametra vērtība;
- $b0_1$ – pirmās hipotēzes regresijas līknes brīvais loceklis;
- $b1_1$ – pirmās hipotēzes regresijas koeficients.

Pirmo nulles hipotēzi $H0_1$ apraksta izteiksme:

$$H0_1: b1_1 = 0 , \quad (3.19)$$

Ja izvirzītā nulles hipotēze $H0_1: b1_1 = 0$ ir spēkā, tad regresijas koeficients $b1_1=0$ un pazīmju variēšana ir pilnīgi neatkarīga, tas nozīmē, ka starp regresoru un regresentu nav būtiskas korelācijas un lineārās atkarības. Savukārt, ja izvirzītā nulles hipotēze $H0_1: b1_1 \neq 0$ nav spēkā, tad regresijas koeficients $b1_1 \neq 0$ un pazīmju variēšana ir atkarīga, kas nozīmē, ka starp regresoru un regresentu ir korelācijas un lineārās atkarības.

- 2) Otrā nulles hipotēze $H0_2$ nosaka, ka ar divām atšķirīgām metodēm (skaitlisko un empīrisko) noteiktā brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālā biežuma gadījuma lielumiem X_2 un atsūknēšanas eksperimentā empīriski noteiktajiem brīvās fāzes šķidrums slāņa biežuma gadījuma lielumiem Y eksistē sakarība – pieaugot neatkarīgā mainīgā lieluma X_2 vērtībām, lineāri pieaug atkarīgā mainīgā lieluma Y vidējās vērtības un šīs sakarības regresijas līknei ir lineāra funkcija:

$$Y_2 = b0_2 + b1_2 X_2 , \quad (3.20)$$

kur:

- X_2 – skaitliski aprēķinātā parametra vērtība;
- Y_2 – empīriski noteiktā (eksperimentā) parametra vērtība;
- $b0_2$ – otrās hipotēzes regresijas līknes brīvais loceklis;
- $b1_2$ – otrās hipotēzes regresijas koeficients.

Otro nulles hipotēzi $H0_2$ apraksta izteiksme:

$$H0_2: b1_2 = 0 , \quad (3.21)$$

Ja izvirzītā nulles hipotēze $H0_2: b1_2 = 0$ ir spēkā, tad regresijas koeficients $b1_2=0$ un pazīmju variēšana ir pilnīgi neatkarīga, tas nozīmē, ka starp regresoru un regresentu nav būtiskas korelācijas un lineārās atkarības. Savukārt, ja izvirzītā nulles hipotēze $H0_2: b1_2 \neq 0$ nav spēkā, tad regresijas koeficients $b1_2 \neq 0$ un pazīmju variēšana ir atkarīga, kas nozīmē, ka starp regresoru un regresentu ir korelācijas un lineārās atkarības.

3.3.2. Nozīmības līmeņa pieņemšana

Statistiski apstrādājot un analizējot datus, pētījumā izdarītajiem secinājumiem vienmēr piemīt varbūtības raksturs jeb īpašības (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 kuriem tāpēc ir sastādītas atbilstošas statistiskas tabulas (Carkova, 1979), tās 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.

3.3.3. Korelācijas analīze

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

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

Apriori tiek pieņemts, ka visu šo skaitlisko vērtību dažādība (variēšana) ir savstarpēji saistīta un to pazīmes ir atkarīgas (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004). Rezultatīvā, jeb aprēķināmā (atkarīgā) skaitliskā vērtība ir pētījuma eksperimentā noteiktais virs gruntsūdens peldošā brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālais biezums, ko apzīmē ar Y_i , bet variantes - $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}$.

Analītiski aprēķinātās un urbumā nomērītās šī parametra vērtības, kas nosaka rezultatīvās vērtības reakciju, līdzīgos zinātniskos pētījumos sauc par faktoriālajām vērtībām (pazīmēm) jeb faktoriem (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004) un apzīmē X_i , bet variantes $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$. Atkarīgo vērtību iedalījums rezultatīvajās un faktoriālajās vērtībās ir relatīvs un ir atkarīgs no pētniecības darba uzdevuma, ko noskaidro loģiskas analīzes rezultātā (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004). Veiktās korelācijas analīzes mērķis bija noteikt sakarību ciešumu starp faktoriālajām un rezultatīvajām virs gruntsūdens peldošā brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtībām.

Lai vizuāli noteiktu sakarības veidu un ciešumu starp faktoriālajām un rezultatīvajām brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtībām, tika izmantota korelācijas jeb izkliedes diagramma. Korelācijas diagrammā uz abscisas ass atliek faktoriālās (X) vērtības, bet uz ordinātas ass - atbilstošās rezultatīvās (Y) vērtības. Iegūto punktu izkliede ap iedomāto sakarības līkni raksturo korelācijas ciešumu (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004), bet iedomātās līknes forma – regresijas sakarības veidu.

Lineāras sakarības ciešumu raksturo lineārās korelācijas, jeb Pīrsona koeficients r (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004), kuru aprēķina pēc vienādojuma (3.22):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \cdot \bar{y} \cdot n}{(n-1) \cdot s_x \cdot s_y}, \quad (3.22)$$

kur:

n – x un y paraugkopas apjoms ($n_x = n_y = n$),

s_x, s_y – x un y paraugkopas standartnovirze $s = \sqrt{s^2}$ (s^2 – dispersija),

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (3.23)$$

\bar{x} , \bar{y} – x un y paraugkopas vidējais aritmētiskais,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (3.24)$$

x_i, y_i – x un y paraugkopas i -tās vērtības.

Rēķinot Pīrsona korelācijas koeficientu nav būtiski, kuru lieluma vērtību – faktoriālo vai rezultātīvo – norāda pirmo, jo korelācijas koeficients ir simetrisks attiecībā pret lieluma vērtībām X un Y , $r_{xy} = r_{yx}$ (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004).

Ja abas lieluma vērtības variē neatkarīgi viena no otras, tad $r = 0$. Jo ciešāka ir sakarība, jo r ir lielāks. Korelācijas koeficienta skaitliskā vērtība atrodas intervālā $-1 \leq r \leq +1$. Tas ir bezdimensijas lielums, kura aprēķināšana nav atkarīga no tā, kādās mērvienībās izteiktas lieluma vērtības variantes. Ja aprēķinātā korelācijas koeficienta absolūtā vērtība ir lielāka par 1, tas nozīmē, ka aprēķinos pieļauta rupja kļūda. Korelācijas koeficienta kvadrātu (r^2) sauc par determinācijas koeficientu R , ko apraksta sakarība $R=r^2$. Determinācijas koeficients norāda, cik lielu rezultātīvās lieluma vērtības izkliedes daļu izskaidro tās lineārā saistība ar faktoriālo pazīmi (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004).

Lai pārlicinātos par korelācijas koeficientu būtiskumu tika veikts tā vērtējums pēc t – kritērija (3.5).

$$t = \frac{r - \theta}{s_r}, \quad (3.25)$$

kur:

- θ – ģenerālkopas korelācijas koeficients,
- s_r – korelācijas koeficienta r reprezentācijas rādītājs.

Lai pārbaudītu, vai starp faktoriālo un rezultātīvo lieluma vērtību pastāv lineārā sakarība ģenerālkopā, izvirza nulles hipotēzi $H_0: \rho=0$, ka ģenerālkopas korelācijas koeficients ir vienāds ar nulli. Nulles hipotēze $H_0: \rho=0$ ir spēkā un korelācijas koeficients nav būtisks, ja $t < t_{\alpha, v}$, kur $t_{\alpha, v}$ ir Stjūdenta kritērija teorētiskā vērtība pie brīvības pakāpju skaita $v=n-2$.

Vienkāršākā metode korelācijas koeficienta būtiskuma noteikšanai ir tā empīriskās vērtības salīdzināšana ar kritisko vērtību $r_{\alpha, n}$, kuru, atkarībā no paraugkopas apjoma n un α , nolasa 3.2. tabulā.

3.2. tabula. Korelācijas koeficienta kritiskās vērtības $r_{\alpha, n}$ (Liepa I., 1974)

Table 3.2. The critical values $r_{\alpha, n}$ of correlation coefficient (Liepa I., 1974)

n	α		n	α		n	α	
	0,05	0,01		0,05	0,01		0,05	0,01
4	0,950	0,990	19	0,456	0,575	50	0,277	0,364
5	0,878	0,959	20	0,444	0,561	60	0,253	0,333
6	0,811	0,917	21	0,433	0,549	70	0,234	0,308
7	0,754	0,874	22	0,423	0,537	80	0,219	0,288
8	0,707	0,834	23	0,413	0,536	90	0,206	0,272
9	0,666	0,798	24	0,404	0,515	100	0,196	0,258
10	0,632	0,765	25	0,396	0,505	125	0,175	0,230

n	α		n	α		n	α	
	0,05	0,01		0,05	0,01		0,05	0,01
11	0,602	0,735	26	0,388	0,496	150	0,160	0,210
12	0,576	0,708	27	0,381	0,487	200	0,138	0,182
13	0,553	0,684	28	0,374	0,478	250	0,124	0,163
14	0,532	0,661	29	0,367	0,470	300	0,113	0,148
15	0,514	0,641	30	0,361	0,463	400	0,098	0,128
16	0,497	0,623	35	0,332	0,435	500	0,088	0,115
17	0,482	0,606	40	0,310	0,407	1000	0,062	0,081
18	0,468	0,590	45	0,292	0,384			

Korelācijas koeficienta vērtības var arī raksturot pēc 3.3. tabulas (Arhipova, Bāliņa, 2000).

3.3. tabula. Korelācijas koeficienta vērtības un tai atbilstošās sakarības ciešuma raksturojums

Table 3.3. Correlation coefficient value and corresponding characteristics of the relationship closeness

Korelācijas koeficienta vērtība	Lineārā sakarība
-1	Funkcionāla negatīva
0	Neeksistē
1	Funkcionāla pozitīva
$ r < 0.5$	Vāja
$0.5 < r < 0.8$	Vidēji cieša
$ r > 0.8$	Cieša

Korelācijas koeficientu kritiskās vērtības $r_{\alpha,n}$ tika noteiktas pēc 3.2. tabulas, kuras pēc tam tika salīdzinātas ar 3.3. tabulā doto šo vērtību gradācijas skalu lineārās sakarības ciešuma raksturošanai.

3.3.4. Regresijas vienādojuma izvēle

Korelācijas koeficienta interpretācija ir korekta tikai tad, ja pārbaudāmās paraugkopas atbilst normālajam sadalījumam. Pieņemot iespēju, ka veiktā 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).

Pāru regresiju uzskatāmi attēlo izkliedes diagramma. To iegūst, ja Dekarta koordinātu sistēmā uz abscisu ass atliek regresora (x_i) vērtības, bet uz ordinātu ass – regresenta (y_i) vērtības. Iegūto punktu kopa veido izkliedes diagrammu. Savienojot šos punktus ar taisnes nogriežņiem, iegūst līniju, kuru sauc par empīrisku regresijas līniju. Līniju, kas koordinātu sistēmā grafiski attēlo regresijas likumsakarību, sauc par teorētisko regresijas līniju jeb trendu (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004).

Vispārzināms, ka pareiza vienādojuma izvēle ir ļoti nozīmīgs pētījuma darba posms, jo no tās būtiski atkarīga kopējā regresijas analīzes efektivitāte. Par cik mūsu veiktā

pētījuma galvenais mērķis bija atrast paņēmieni, kā noteikt (prognozēt) brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālo biezumu gruntsūdens horizontā, balstoties uz šī slāņa biezuma mērījumiem urbumā, bija svarīgi atrast loģiski pamatotu regresijas vienādojumu, kas dotu iespēju aprēķināt (ekstrapolēt) regresenta (Y) vērtības arī tām regresora (X) vērtībām, kas atrodas aiz empīriskā intervāla robežām.

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 šķidrums 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 līknei ir lineāra funkcija:

$$Y = b_0 + b_1 X, \quad (3.26)$$

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).

3.3.5. Lineārās regresijas koeficientu noteikšana

Lineārās regresijas koeficientus b_0 (brīvais loceklis) un b_1 (regresijas koeficients) aprēķina pēc vienādojumiem (3.27) un (3.28):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \cdot \bar{y} \cdot n}{(n-1) \cdot s_x^2}, \quad (3.27)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}, \quad (3.28)$$

kur:

- s_x – regresora (x paraugkopas) standartnovirze,
- visi pārējie apzīmējumi ir iepriekšējie.

Lineārai sakarībai regresenta kopējā noviržu kvadrātu summa (Q) dalās divās komponentēs (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004): regresijas noviržu kvadrātu summa (Q_y) un atlikuma noviržu kvadrātu summa (Q_z), (3.29):

$$Q = Q_y + Q_z, \text{ vai } Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad (3.29)$$

Regresenta kopējā noviržu kvadrātu summa (Q) raksturo visu regresenta vērtību izkliedi ap vidējo aritmētisko $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ un atbilst kopējai noviržu kvadrātu summai dispersijas analīzē (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004) un to aprēķina pēc sakarības (3.30),

$$Q = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} = s_y^2(n-1), \quad (3.30)$$

kur:

s_y^2 – regresenta dispersija.
– visi pārējie apzīmējumi ir iepriekšējie.

Atlikuma noviržu kvadrātu summa (Q_z) raksturo regresenta vērtību izkliedi ap regresijas taisni $Q_z = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$, t.i. novirzes, kas ir radušās gadījuma faktoru (fona) ietekmes rezultātā, un atbilst Q_z dispersijas analīzē (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004). Šis izkliedes rādītājs tika izmantots regresijas novērtēšanai. Ja vienai datu kopai aprēķināti atšķirīgi regresijas vienādojumi, tad labākam regresijas vienādojumam ir mazāka atlikuma noviržu kvadrātu summa Q_z . Tāpēc Q_z aprēķināšana ir ļoti nozīmīga un to izpilda pēc sakarības (3.31):

$$Q_z = \sum_{i=1}^n y_i^2 - b_0 \sum_{i=1}^n y_i - b_1 \sum_{i=1}^n x_i y_i, \quad (3.31)$$

Regresijas noviržu kvadrātu summa ($Q_{\hat{y}}$) raksturo regresijas līnijas punktu izkliedi ap \bar{y} : $Q_{\hat{y}} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ un atbilst faktora A (pirmā faktora) izraisītajai noviržu kvadrātu summai viena faktora dispersijas analīzē. $Q_{\hat{y}}$ aprēķina pēc sakarības (3.32):

$$Q_{\hat{y}} = Q - Q_z, \quad (3.32)$$

Punktu izvietojumā blīvuma mērīšanai bija nepieciešams noteikt regresijas standartnovirzi ($s_{y \cdot x}$). Regresijas standartnovirze ir nosaukts skaitlis, kas izteikts regresenta vienībās (Sokal, Rohlf, 1981; Pospelova, 2004). Regresijas standartnovirzes iespējamās vērtības atrodas intervālā $0 \leq s_{y \cdot x} \leq s_y$. Funkcionālai sakarībai visi punkti atrodas uz regresijas līnijas, tātad $Q_z=0$ un līdz ar to arī $s_{y \cdot x}=0$. Ja starp abām pazīmēm nav korelācijas, tad punktu izkliede ap regresijas līniju ($s_{y \cdot x}$) ir maksimāla un vienāda ar regresenta standartnovirzi (s_y): $s_{y \cdot x}=s_y$, savukārt $s_{y \cdot x}^2$ – ar regresijas dispersiju. Regresijas standartnovirzi aprēķina pēc vienādojuma (3.33):

$$s_{y \cdot x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-k}} = \sqrt{\frac{Q_z}{n-k}} = \sqrt{\frac{Q_z}{v_z}}, \quad (3.33)$$

kur:

$v_z = n-k$, – atlikuma brīvības pakāpju skaits,
 k – regresijas koeficientu skaits.

Regresijas standartnovirzi lieto regresijas zonu (ticamības intervālu) aprēķināšanai pēc sakarības (3.34):

$$b0 + b1 x_i - t_{\alpha, v} s_{y \cdot x} < y < b0 + b1 x_i + t_{\alpha, v} s_{y \cdot x}, \quad (3.34)$$

kur:

$t_{\alpha, v}$ – t-kritērija kritiskā vērtība,

$v = n - k$ – datu kopas brīvības pakāpju skaits

Uz grafika regresijas ticamības intervāls parāda apgabalus, kurā varianšu normāla sadalījuma gadījumā atrodas $(1 - \alpha) \cdot 100\%$ no visiem punktiem. Ja $\alpha = 0.05$, (pētījuma variantā) tad atbilstošajā ticamības intervālā varianšu normāla sadalījuma gadījumā būs 95% no visiem novērojumiem. Ja $\alpha = 0.01$, tad atbilstošajā ticamības intervālā būs 99% no visiem novērojumiem (Krumbein, Graybill, 1965).

3.3.6. Regresijas būtiskuma analīze izvirzītās hipotēzes pārbaudei

Pētījuma datu apstrādē izmantota regresijas būtiskuma pārbaude pēc Stjūdentu kritērija. Regresijas līnijas stāvokli ģenerālkopā nosaka regresijas vienādojuma koeficientu reprezentācijas rādītāji. Lineārai atkarībai to nosaka koeficienta $b1$ reprezentācijas rādītājs s_{b1} , kuru aprēķina pēc vienādojuma (3.35). Koeficientu $b1$ raksturo tā reprezentācijas rādītājs $b1 \pm s_{b1}$

$$s_{b1} = \frac{s_{y \cdot x}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} = \frac{s_{y \cdot x}}{s_x \sqrt{n - 1}}, \quad (3.35)$$

kur:

$s_{y \cdot x}$ – regresijas standartnovirze,

s_x – regresora standartnovirze,

n – paraugkopas apjoms.

Ja koeficients $b1 = 0$, 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 $H_0: b1 = 0$, ka $b1$ koeficients būtiski neatšķiras no nulles, pārbauda ar Stjūdentu kritēriju pēc sakarības (3.36).

$$|t| = \frac{b1}{s_{b1}}, \quad (3.36)$$

Nulles hipotēze $H_0: b1 = 0$ ir spēkā un regresija nav būtiska, ja $t < t_{\alpha, v}$. $t_{\alpha, v}$ – Stjūdentu kritērija teorētiskā vērtība, bet $v = n - k$, kur k – regresijas vienādojuma koeficientu skaits, α – būtiskuma līmenis.

4. REZULTĀTI

4.1. Skaitliski noteiktais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums

Pētījuma skaitliskais eksperiments tika balstīts uz Amerikas naftas institūta izstrādāto Van Genuchtena–Burdine (API-No.4729, 2003; API-No.4760, 2007) divfāzu šķidrums sistēmas gruntsūdens horizontā fizikālo modeli (skat. 3.4. att.). Modelēšanai izmantotie izejas parametri apkopoti 4.1. tabulas kreisajā pusē, bet labajā pusē skatāmi galvenie parametri, kas jau iegūti ar modeli aprēķinu ceļā, izmantojot 3.2.1. sadaļā aprakstītās skaitliskās analīzes metodes vienādojumus.

4.1. tabula. Van Genuchtena-Burdine modelī izmantotie parametri

Table 4.1. Parameters used in the Van Genuchtena-Burdine model

Modelī ievadāmie parametri			Modelī aprēķināmie parametri		
<i>Brīvās fāzes šķidrums slāņa parametri</i>			$M =$	0,627	Van Genuchtena (M) parametrs
$b_n =$	Biezums, metros	Maksimālais urbumā novērotais brīvās fāzes šķidrums slānis, m	$\alpha_{an} =$	7,278	Gaisa/brīvās fāzes šķidrums saskares virsmas spraiguma mijiedarbības faktors [m^{-1}]
<i>Grunts parametri</i>			$\alpha_{nw} =$	1,522	Brīvās fāzes šķidrums/ūdens saskares virsmas spraiguma mijiedarbības faktors [m^{-1}]
$n_s =$	0,430	Grunts porainība			
$N =$	2,680	Van Genuchtena (N) parametrs			
$\alpha =$	4,400	Van Genuchtena (α) parametrs [m^{-1}]	$z_{an} =$	0,567	Gaisa/brīvās fāzes šķidrums saskares virsmas līmenis [m]
$S_{wr} =$	0,100	Neatgriežamais ūdens piesātinājums	$z_{nw} =$	-2,713	Brīvās fāzes šķidrums/ūdens saskares virsmas līmenis [m]
$S_{nrv} =$	0,071	Neatgriežamais brīvās fāzes šķidrums piesātinājums aerācijas neapūdeņotajā zonā	$z_{max} =$	1,467	Maksimālais brīvās fāzes šķidrums līmenis [m]
$S_{nrs} =$	0,142	Neatgriežamais brīvās fāzes šķidrums piesātinājums horizonta apūdeņotajā zonā	$\lambda =$	1,124	Brūka-Koreja poru izmēra sadalījuma indekss
<i>Šķidrums parametri</i>			$\psi_b \square =$	0,148	Brūka-Koreja kapilārais rādītājs [m]
$\rho_n =$	0,827	Brīvās fāzes šķidrums blīvums [$g \times cm^{-3}$]	Piezīme: kreisajā pusē (dzeltenais tonējums) doti parametri, kurus ievada aprēķinu programmā, bet labajā pusē (zaļais tonējums) – parametri, kurus programma aprēķina. Ievadāmo un aprēķināmo parametru detalizēts apraksts dots 3.2.1. sadaļā		
$\sigma_{aw} =$	50,0	gaisa/ūdens saskares virsmas spriegums [$dini \times cm^{-1}$]			
$\sigma_{an} =$	25,0	gaisa/brīvās fāzes šķidrums saskares virsmas spriegums [$dini \times cm^{-1}$]			
$\sigma_{nw} =$	25,0	brīvās fāzes šķidrums/ūdens saskares virsmas spriegums [$dini \times cm^{-1}$]			

Pētījumā ar Van Genuchtena–Burdine modeli veikto aprēķinu rezultātā 30 eksperimentā izmantotajiem urbumiem tika skaitliski noteikts (modelēts) brīvās fāzes šķidrums aktuālais biežums gan pirms atsūkņēšanas uzsākšanas, gan arī pēc tās pabeigšanas, kad urbumā pilnībā atjaunojās brīvās fāzes šķidrums un gruntsūdens līmenis. Ar modelēšanas (skaitlisko) metodi iegūtās un urbumā nomērītās brīvās fāzes šķidrums slāņa biežuma vērtības apkopotas 4.2. tabulā.

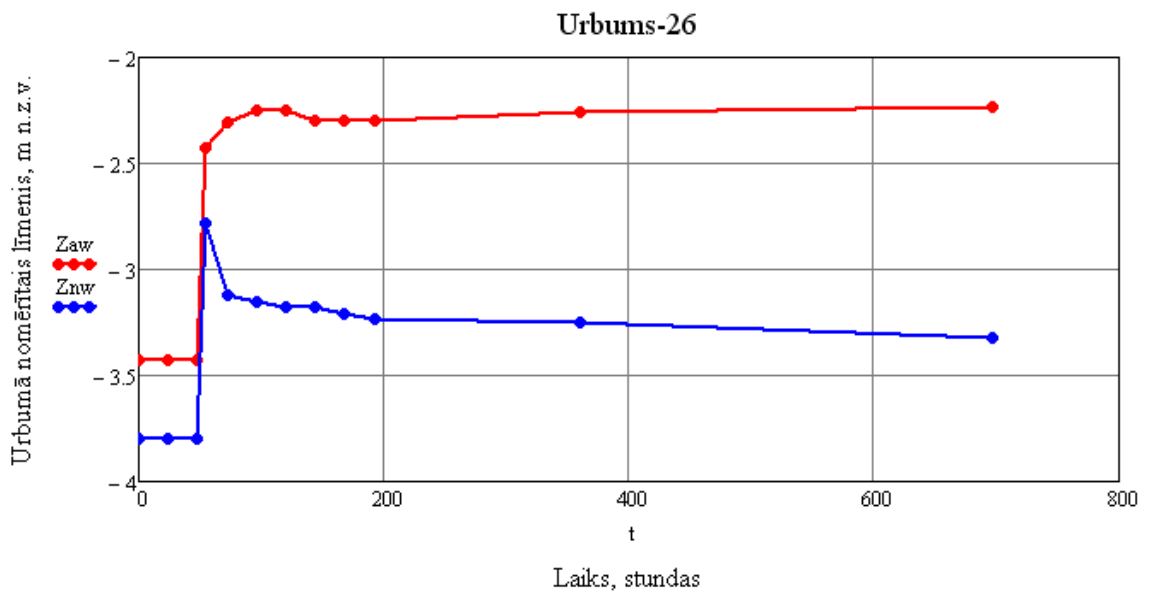
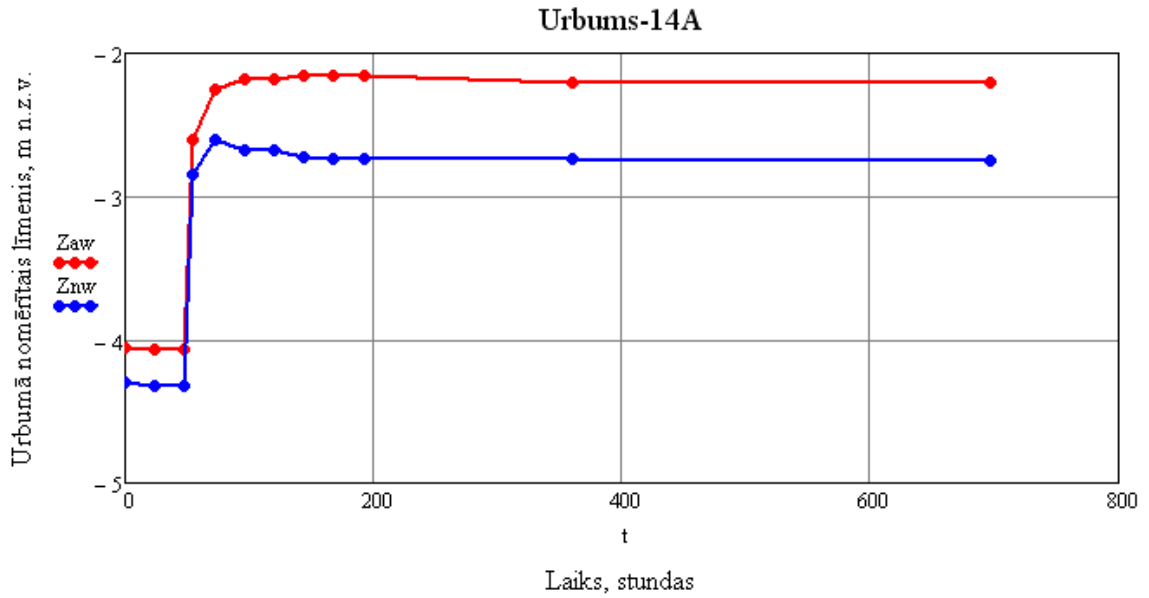
4.2. tabula. Urbumos nomērītās un skaitliski aprēķinātās (modelētās) brīvās fāzes šķidrums slāņa biežuma vērtības

Table 4.2. The values of free-phase liquid layer thickness measured in the wells and calculated (modeled) numerically

Nr.pk.	Urbum a Nr.	Brīvās fāzes šķidrums slāņa biežums, 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
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

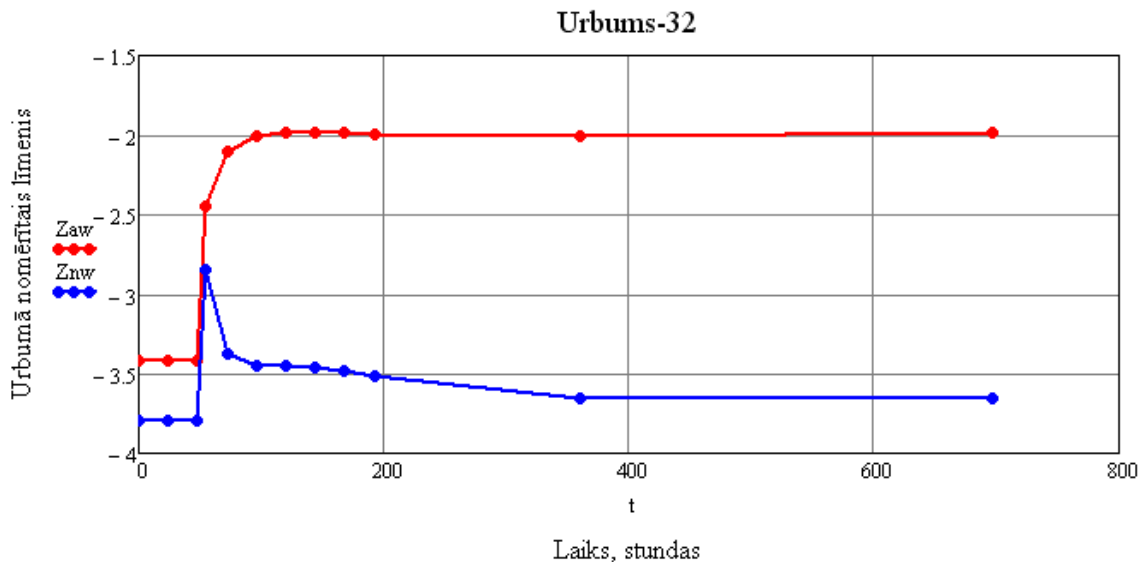
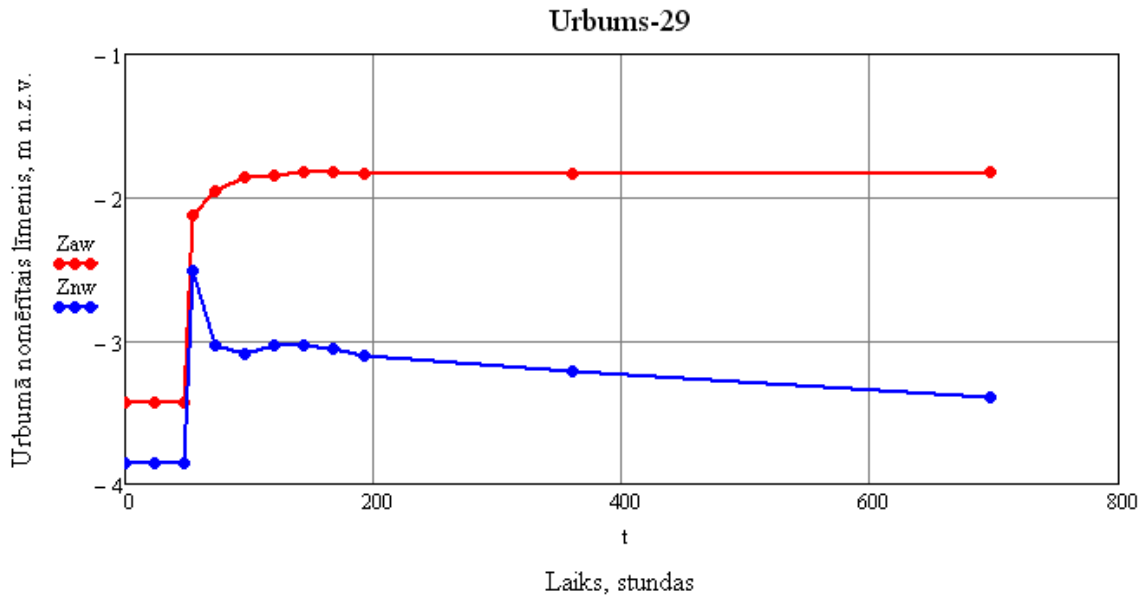
4.2. Empīriski noteiktais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums

Pamatojoties uz atsūknēšanas gaitā (skat. sadaļu 3.1. Eksperimenta realizācijas procedūra) iegūtajiem datiem katram no 30 pētāmajiem urbumiem tika sastādīts līmeņa atjaunošanās grafiks (skat. grafiku piemērus 4.1. un 4.2. att.).



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

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

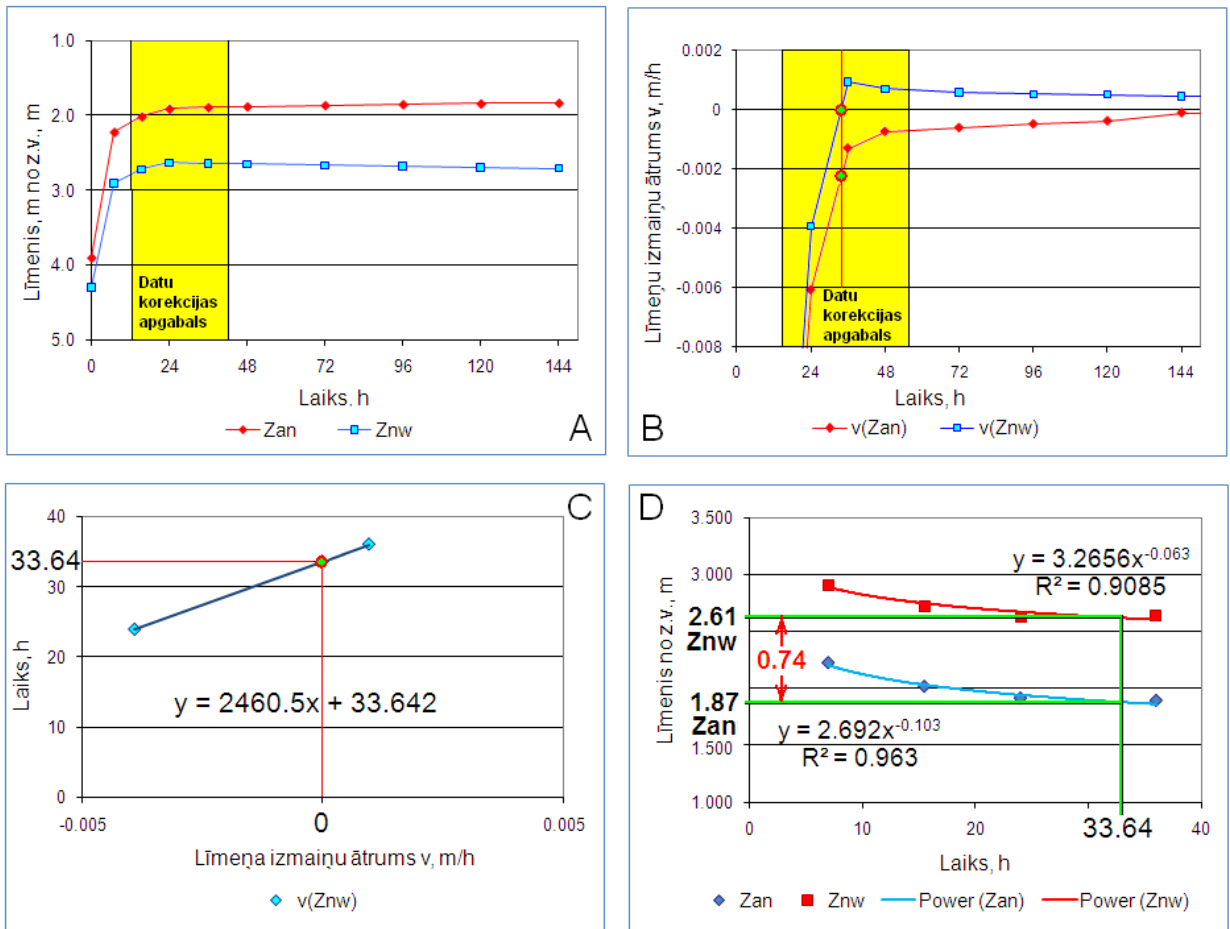


4.2. attēls. Urbumos Nr.29 un Nr.32 novērotās brīvās fāzes šķidruma slāņa un gruntsūdens līmeņa atjaunošanās piemēri

Figure 4.2. In the wells No.29 and No.32 observed free-phase liquid layer and groundwater level recovery examples

Analizējot iegūtos grafikus saskaņā ar 3.2.2. sadaļā aprakstīto un zinātniskajā literatūrā publicēto empīrisko metodi (Aleksāns, Klimovičs, 2006; Lefebvre, 2006; Gruszczenski, 1987), visiem 30 pētītajiem urbumiem tika novērtēts brīvās fāzes šķidruma slāņa aktuālais biežums. Iegūto datu precizēšanai, papildus minētajam novērtējumam, 28 urbumiem (no 30 pētītajiem) brīvās fāzes šķidruma slāņa aktuālais biežums vēl tika arī koriģēts. Korekcija bija nepieciešama tāpēc, ka urbumā fiksētais brīvās fāzes šķidruma un ūdens saskares virsmas līmeņa izmaiņu augšējais lūzuma punkts grafikā (skat. skaidrojumu 3.2.2 sadaļā un 4.3. att.) var teorētiski būt novirzīts pa laika asi uz vienu vai otru pusi un atrasties

starp diviem mērījumiem. Tāpēc faktiskais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums vairumā gadījumu nedaudz atšķiras no tā, kas noteikts pēc grafika. Autora pielietotā korekcija (skat. 4.3. att.) iespējamajai saskares virsmas līmeņa lūzuma punkta novirzei laika grafikā šo neprecizitāti novērš.



4.3. attēls. Urumā Nr.36 empīriski noteiktā brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma korekcijas piemērs

Apzīmējumi. A – datu korekcijas apgabala noteikšana urbumā novērotā brīvās fāzes šķidruma un gruntsūdens līmeņa atjaunošanās grafikam; B – datu korekcijas apgabala noteikšana brīvās fāzes šķidruma ($v(Zan)$) un gruntsūdens līmeņa ($v(Znw)$) atjaunošanās ātruma grafikam; C – gruntsūdens līmeņa celšanās beigu un grimšanas sākuma laika momenta ($v(Znw)=0$) noteikšana; D – aktuālā (b_a) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma noteikšana laika momentam $v(Znw)=0$.

Figure 4.3. The example of empirically given free-phase liquid layer thickness adjustment for well No.36

Legend. A – in the well observed free phase liquid and ground-water level recovery data correction area adjustments; B - free phase liquid ($v(Zan)$) and groundwater level ($v(Znw)$) recovery rate data correction area adjustments, C – groundwater level rising ending and sinking start time determination ($v(Znw)=0$); D - actual (b_a) free phase liquid layer thickness determination at the time moment $v(Znw)=0$.

Visu datu koriģēšanas procesu var iedalīt četros posmos (skat. A, B, C un D grafikus 4.3. att.).

A) Pamatojoties uz urbumā nomērītajiem brīvās fāzes šķidruma slāņa un ūdens līmeņa atjaunošanās datiem, tiek sagatavots grafiks (4.3. attēlā – A), kurā abscisu ass raksturo

laiku, kurā tika veikti mērījumi, bet ordinātu ass – brīvās fāzes šķidrums (z_{an}) un ūdens (z_{nw}) līmeņa izmaiņas urbumā, līdzīgi, kā tas ir skatāms 4.1. un 4.2. attēlā. Šajā grafikā atrod mērījumu apgabalu (4-6 mērījumi), kurā mainās brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmas līmeņa celšanās uz grimšanu.

- B) Izdalītajam mērījumu apgabalam un tam piegulošajai datu kopai gatavo jaunu grafiku (4.3. attēlā – B), kurā atšķirībā no iepriekšējā grafika (A) uz ordinātu ass atliek brīvās fāzes šķidrums (z_{an}) un ūdens (z_{nw}) līmeņa izmaiņu (celšanās vai grimšanas) ātrumu urbumā. No grafika (B) redzams, ka brīvās fāzes šķidrums slāņa līmenis (z_{an}) visu laiku turpina celties un šis celšanās ātrums samazinās, tuvinoties nulles vērtībai. Brīvās fāzes un ūdens saskares virsmas līmenis iesākumā tāpat ceļas, bet tā celšanās ātrums samazinās un kādā brīdī tas ir vienāds ar nulli ($v(z_{nw})=0$). Tālāk šis līmenis (z_{nw}) sāk pārvietoties pretējā virzienā un tā kustības (grimšanas) ātrums kādu brīdi atkal palielinās, bet pēc tam no jauna sāk samazināties un pakāpeniski tuvojas nullei. Šajā grafikā ir būtiski noteikt tos mērījumus, vai precīzāk – laika posmu starp šiem mērījumiem, kurā brīvās fāzes un ūdens saskares virsmas līmeņa izmaiņu ātruma līkne (B) grafikā šķērso nulles līniju.
- C) Zinot divu līmeņa mērījumu veikšanas laiku un intervālu starp tiem, kurā brīvās fāzes un ūdens saskares virsmas līmeņa izmaiņu ātrums ir vienāds ar nulli, ar interpolācijas paņēmieni ir iespējams matemātiski aprēķināt precīzu laiku, kad beidzas brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmas celšanās un sākas tās grimšana. Minēto aprēķinu gaitu raksturo (C) grafiks 4.3. attēlā.
- D) Ja ir zināms konkrēts laiks starp diviem līmeņa mērījumiem, kad brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmas līmeņa izmaiņu līknē notiek lūzums, teorētiski vairs nav nekādu šķēršļus, lai, izmantojot grafikus, kuru piemēri doti 4.1. un 4.2. attēlā, izdarītu nepieciešamās korekcijas eksperimentā empīriski noteiktajām brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtībām. Tomēr prakse parādīja, ka gan brīvās fāzes, gan arī tās saskares virsmas ar ūdeni līmeņu atjaunošanās atsevišķiem urbumiem notiek nevienmērīgi un ar dažādu ātrumu. Lai novērstu minēto faktoru negatīvo ietekmi uz rezultātu, papildus parastajam līmeņu atjaunošanās grafikam (A) tika sagatavots vēl viens – (D) grafiks (skat. 4.3. att.), kurā kritiskajam laika periodam, kad brīvās fāzes un ūdens saskares virsmas līmeņa izmaiņu līknē notiek lūzums, tika aprēķināts arī šo vērtību izmaiņu trends. No MS Excel programmā piedāvātajiem trenda variantiem katrā konkrētā gadījumā tika izvēlēts tas, kura determinācijas koeficients (R) bija visaugstākais. Šādā veidā tika iegūtas pārrēķina sakarības, kuras ļāva panākt precīzu eksperimenta empīrisku datu korekciju.

Empīriski noteiktās un koriģētās brīvās fāzes šķidrums vērtības apkopotas 4.3. tabulā.

4.3. tabula. Empīriski noteiktās brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtības

Table 4.3. Empirically discovered free-phase liquid layer thickness values

Nr.pk.	Urbum a Nr.	Bez novirzes korekcijas	Ar novirzes korekciju	Nr.pk.	Urbum a 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

Nr.pk.	Urbum a Nr.	Bez novirzes korekcijas	Ar novirzes korekciju	Nr.pk.	Urbum a Nr.	Bez novirzes korekcijas	Ar novirzes korekciju
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

* n.n. – deviation could not be determined

4.3. Pētījuma datu matemātiskās analīzes rezultāti

Izvirzītās pirmās nulles hipotēzes H_{01} pārbaudei, ka starp urbumā noteiktajiem (nomērītajiem) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību gadījuma lielumiem X_1 un skaitliski noteiktajiem (modelētajiem) Y_1 eksistē sakarība, pētījumā iegūtie statistisko aprēķinu rezultāti apkopoti 4.4. un 4.5. tabulās, bet 4.4. attēlā dota šo vērtību regresijas taisne.

4.4. tabula. Urbumos nomērītās un aprēķinātās brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību statistiskie rādītāji pirmās nulles hipotēzes H_{01} pārbaudei

Table 4.4. Statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the first null hypothesis H_{01} testing

Statistiskais parametrs	Apzīmējums	Vērtība	References
Paraugkopas apjoms	n	60	4.5. tabula
Pieņemtais būtiskuma līmenis	α	0,05	3.3.2. sadaļa
Atlikuma brīvības pakāpju skaits	ν_z	58	(3.33) vienādoj.
t – kritērija kritiskā vērtība	$t_{\alpha,\nu}$	2,00172	(3.34) vienādoj.
Vidējā regresora vērtība	\bar{x}	1,192	(3.24) vienādoj.
Vidējā regresenta vērtība	\bar{y}	0,878	(3.24) vienādoj.
Regresora mediāna	M_{ex}	1,215	4.5. tabula
Regresenta mediāna	M_{ey}	0,883	4.5. tabula
Pīrsona korelācijas koeficients	r	0,998	(3.22) vienādoj.
Determinācijas koeficients	R	0,997	$R=r^2$
Regresora standartnovirze	s_x	0,628	(3.23) vienādoj.
Regresenta standartnovirze	s_y	0,530	(3.23) vienādoj.
Regresijas standartnovirze	$s_{x,y}$	0,030	(3.33) vienādoj.
Kopējā vērtību noviržu kvadrātu summa	Q	16,560	(3.30) vienādoj.

Statistiskais parametrs	Apzīmējums	Vērtība	References
Atlikuma noviržu kvadrātu summa	Q_z	0,056	(3.31) vienādoj.
Regresijas noviržu kvadrātu summa	Q_y	16,505	(3.32) vienādoj.
Regresijas taisnes brīvais loceklis	$b0_1$	0,8429	(3.18) vienādoj.
Regresijas taisnes virziena koeficients	$b1_1$	-0,1264	(3.18) vienādoj.

Regresijas ticamības intervāla kreisās un labās robežas aprēķini pirmās nulles hipotēzes $H0_1$ pārbaudei doti 4.5. tabulā, bet novērojumu izkliedes, prognozes un ticamības intervāla robežas pie 95% attēlotas 4.4. attēlā. Uz grafika regresijas ticamības intervāls parāda apgabalus, kurā varianšu normāla sadalījuma gadījumā atrodas $(1-v)*100\%$ no visiem punktiem. Ja $\alpha=0,05$, tad atbilstošajā ticamības intervālā varianšu normāla sadalījuma gadījumā ir 95% no visiem novērojumiem

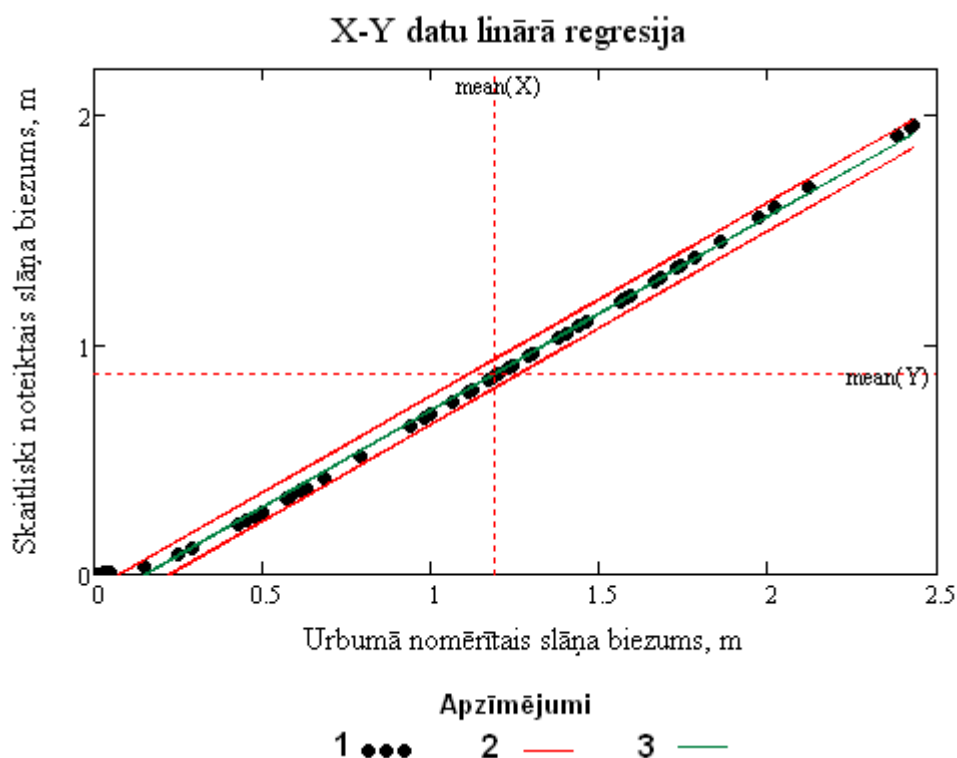
4.5. tabula. Brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma prognozes un ticamības intervāla robežas pie varbūtības 95% pirmās nulles hipotēzes $H0_1$ gadījumam

Table 4.5. Free-phase liquid layer thickness estimates and confidence interval limits at 95% probability in the case of the first null hypothesis $H0_1$

Urb. Nr.	Mērīšanas laiks	Brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums, m			Regresijas ticamības intervāls pie varbūtības 95%		Ticamības intervāla nosacījuma izpildīšanās, 0- izpildās; 1- neizpildās
		Urbumā nomērītais, b_n	Skaitliski aprēķinātais, b_a	Prognozētai s	Regresijas kreisā zona, $b0_1 + b1_1 x - t_{\alpha,n} s_{y,x}$	Regresijas labā zona $b0_1 + b1_1 x + t_{\alpha,n} s_{y,x}$	
		(X_1)	(Y_1)	$Y_{\text{progn.}}$			
7A	Pirms atsūkņēšanas eksperimenta	0,98	0,678	0,70	0,638	0,762	0
12		0,48	0,257	0,28	0,216	0,340	0
14		1,18	0,852	0,87	0,806	0,930	0
14A		2,12	1,683	1,66	1,598	1,722	0
15		1,23	0,896	0,91	0,848	0,972	0
16		1,29	0,949	0,96	0,899	1,023	0
17		1,74	1,346	1,34	1,278	1,402	0
21		1,78	1,381	1,37	1,312	1,436	0
22		1,24	0,905	0,92	0,857	0,981	0
23		1,06	0,747	0,77	0,705	0,829	0
24		0,57	0,330	0,35	0,292	0,416	0
25		0,94	0,643	0,67	0,604	0,728	0
26		1,38	1,028	1,04	0,975	1,099	0
27		1,44	1,081	1,09	1,025	1,149	0
28		1,57	1,195	1,20	1,135	1,259	0
29		1,73	1,337	1,33	1,270	1,394	0
30		1,86	1,452	1,44	1,379	1,503	0
31		2,02	1,594	1,58	1,514	1,638	0

Urb. Nr.	Mērīšanas laiks	Brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums, m			Regresijas ticamības intervāls pie varbūtības 95%		Ticamības intervāla nosacījuma izpildīšanās, 0- izpildās; 1- neizpildās
		Urbumā nomērtais, b_n	Skaitliski aprēķinātais, b_a	Prognozētai s	Regresijas kreisā zona, $b0_I + b1_I \times -t_{a,n} s_{y,x}$	Regresijas labā zona $b0_I + b1_I \times +t_{a,n} s_{y,x}$	
		(X_I)	(Y_I)	$Y_{\text{progn.}}$			
32		2,38	1,914	1,88	1,818	1,942	0
33		2,43	1,959	1,92	1,860	1,984	0
34		2,42	1,950	1,91	1,851	1,975	0
35		2,38	1,914	1,88	1,818	1,942	0
36		1,97	1,550	1,53	1,472	1,596	0
37		1,68	1,293	1,29	1,228	1,352	0
38		1,18	0,852	0,87	0,806	0,930	0
40		1,17	0,843	0,86	0,798	0,922	0
41		0,43	0,218	0,24	0,174	0,298	0
42		0,45	0,234	0,25	0,191	0,315	0
43		0,49	0,265	0,29	0,225	0,349	0
44		0,01	0,004	-0,12	-0,180	-0,056	1
7A		1,23	0,896	0,91	0,848	0,972	0
12		0,58	0,338	0,36	0,300	0,424	0
14		0,58	0,338	0,36	0,300	0,424	0
14A		1,40	1,045	1,05	0,992	1,116	0
15		1,11	0,791	0,81	0,747	0,871	0
16		1,30	0,957	0,97	0,907	1,031	0
17		1,20	0,87	0,89	0,823	0,947	0
21		1,30	0,957	0,97	0,907	1,031	0
22		1,12	0,799	0,82	0,756	0,880	0
23		0,68	0,421	0,45	0,385	0,509	0
24		0,29	0,117	0,12	0,056	0,180	0
25		0,63	0,379	0,40	0,343	0,467	0
26		1,00	0,695	0,72	0,654	0,778	0
27		1,19	0,861	0,88	0,815	0,939	0
28		1,56	1,187	1,19	1,126	1,250	0
29		1,58	1,204	1,21	1,143	1,267	0
30		1,66	1,275	1,27	1,211	1,335	0
31		1,46	1,098	1,10	1,042	1,166	0
32		1,68	1,293	1,29	1,228	1,352	0
33		1,73	1,337	1,33	1,270	1,394	0
34		1,59	1,213	1,21	1,152	1,276	0
35		1,59	1,213	1,21	1,152	1,276	0
36		1,06	0,747	0,77	0,705	0,829	0
37		0,79	0,514	0,54	0,477	0,601	0
38		0,61	0,363	0,39	0,326	0,450	0
	Pēc atsūkņēšanas eksperimenta						

Urb. Nr.	Mērīšanas laiks	Brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums, m			Regresijas ticamības intervāls pie varbūtības 95%		Ticamības intervāla nosacījuma izpildīšanās, 0- izpildās; 1- neizpildās
		Urbumā nomērītais, b_n	Skaitliski aprēķinātais, b_a	Prognozētais s	Regresijas kreisā zona, $b0_I + b1_I \times -t_{a,n}^{s_{y,x}}$	Regresijas labā zona $b0_I + b1_I \times +t_{a,n}^{s_{y,x}}$	
		(X_I)	(Y_I)	$Y_{\text{progn.}}$			
40		0,03	0,007	-0,10	-0,163	-0,039	1
41		0,15	0,039	0,00	-0,062	0,062	0
42		0,50	0,273	0,30	0,233	0,357	0
43		0,25	0,091	0,08	0,022	0,146	0
44		0,05	0,011	-0,08	-0,146	-0,022	1
Vidējais		1,192	0,878	0,878			
Mediāna		1,215	0,883	0,898			



4.4. attēls. Urbumos nomērīto un skaitliski aprēķināto (modelēto) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību lineārās regresijas taisne

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

Figure 4.4. The linear regression line of free-phase liquid layer thickness values obtained from field measurements in the wells and numerically calculated (simulated)

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

Tālāk tika veikti statistiskie aprēķini otrās izvirzītās nulles hipotēzes H_0 pārbaudei, ka starp skaitliski aprēķinātajām (modelētajiem) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību gadījuma lielumiem X_2 un empīriski noteiktajiem (eksperimentā noteiktajām vērtībām) Y_2 eksistē sakarība. Iegūtie statistisko aprēķinu rezultāti apkopoti 4.6. un 4.7. tabulās, bet 4.5. attēlā dota šo vērtību regresijas taisne.

4.6. tabula. Urbumos nomērītās un aprēķinātās brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību statistiskie rādītāji otrās nulles hipotēzes H_0 pārbaudei

Table 4.6. Statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the second null hypothesis H_0 testing

Statistiskais parametrs	Apzīmējums	Vērtība	References
Paraugkopas apjoms	n	29	4.5. tabula
Pieņemtais būtiskuma līmenis	α	0,05	3.3.2. sadaļa
Atlikuma brīvības pakāpju skaits	ν_z	27	(3.33) vienādoj.
t – kritērija kritiskā vērtība	$t_{\alpha,\nu}$	2,05183	(3.34) vienādoj.
Vidējā regresora vērtība	\bar{x}	0,711	(3.24) vienādoj.
Vidējā regresenta vērtība	\bar{y}	0,597	(3.24) vienādoj.
Regresora mediāna	M_{cx}	0,795	4.5. tabula
Regresenta mediāna	M_{cy}	0,598	4.5. tabula
Pīrsona korelācijas koeficients	r	0,889	(3.22) vienādoj.
Determinācijas koeficients	R	0,790	$R=r^2$
Regresora standartnovirze	s_x	0,436	(3.23) vienādoj.
Regresenta standartnovirze	s_y	0,410	(3.23) vienādoj.
Regresijas standartnovirze	$s_{x,y}$	0,190	(3.33) vienādoj.
Kopējā vērtību noviržu kvadrātu summa	Q	4,712	(3.30) vienādoj.
Atlikuma noviržu kvadrātu summa	Q_z	0,991	(3.31) vienādoj.
Regresijas noviržu kvadrātu summa	Q_y	3,722	(3.32) vienādoj.
Regresijas taisnes brīvais loceklis	b_0	0,8231	(3.20) vienādoj.
Regresijas taisnes virziena koeficients	b_1	0,0147	(3.20) vienādoj.

Regresijas ticamības intervāla kreisās un labās robežas aprēķini otrās nulles hipotēzes H_0 pārbaudei doti 4.7. tabulā, bet novērojumu izkliedes, prognozes un ticamības intervāla robežas pie varbūtības 95% attēlotas 4.5. attēlā.

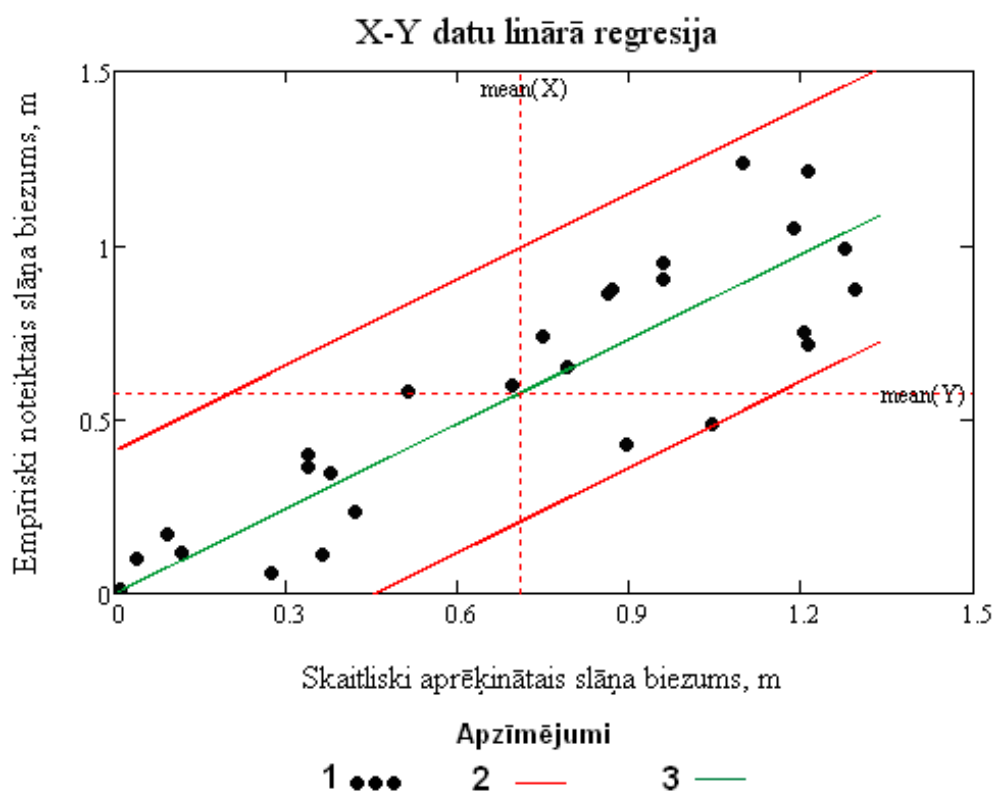
Uz grafika regresijas ticamības intervāls parāda apgabalus, kurā varianšu normāla sadalījuma gadījumā atrodas $(1-\nu)*100\%$ no visiem punktiem. Ja $\alpha=0,05$, tad atbilstošajā ticamības intervālā varianšu normāla sadalījuma gadījumā ir 95% no visiem novērojumiem.

4.7. tabula. Brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma prognozes un ticamības intervāla robežas pie varbūtības 95% otrās nulles hipotēzes H_0 gadījumam

Table 4.7. Free-phase liquid layer thickness estimates and confidence interval limits at 95% probability in the case of the second null hypothesis H_0

Urb. Nr.	Mērīšanas laiks	Brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums, m			Regresijas ticamības intervāls pie varbūtības 95%		Ticamības intervāla nosacījuma izpildīšanās, 0 - izpildās, 1 - neizpildās
		Skaitliski aprēķinātais, b_a	Empīriski noteiktais, b_o	Prognozētais	Regresijas kreisā zona, $b_0 + b_1 x - t_{a,n} S_{y,x}$	Regresijas labā zona $b_0 + b_1 x + t_{a,n} S_{y,x}$	
		(X_2)	(Y_2)	$Y_{\text{progn.}}$			
7A	Pēc atsūkņēšanas eksperimenta	0,896	0,429	0,77	0,419	1,124	0
12		0,338	0,4	0,30	-0,055	0,650	0
14		0,338	0,361	0,30	-0,055	0,650	0
14A		1,045	0,484	0,87	0,482	1,268	0
15		0,791	0,651	0,68	0,330	1,035	0
16		0,957	0,9	0,82	0,471	1,175	0
17		0,87	0,871	0,75	0,397	1,102	0
21		0,957	0,95	0,82	0,471	1,175	0
22		0,799	n.d.*	0,69	0,336	1,041	1
23		0,421	0,237	0,37	0,016	0,721	0
24		0,117	0,119	0,11	-0,242	0,463	0
25		0,379	0,343	0,33	-0,020	0,685	0
26		0,695	0,598	0,60	0,248	0,953	0
27		0,861	0,859	0,74	0,389	1,094	0
28		1,187	1,049	1,02	0,666	1,371	0
29		1,204	0,749	1,03	0,680	1,385	0
30		1,275	0,989	1,09	0,740	1,445	0
31		1,098	1,237	0,94	0,590	1,295	0
32		1,293	0,872	1,11	0,756	1,461	0
33		1,337	1,525	1,15	0,793	1,498	1
34		1,213	0,713	1,04	0,688	1,393	0
35		1,213	1,213	1,04	0,688	1,393	0
36		0,747	0,741	0,64	0,292	0,997	0
37		0,514	0,579	0,45	0,095	0,800	0
38		0,363	0,114	0,32	-0,033	0,671	0
40		0,007	0,007	0,02	-0,336	0,369	0
41		0,039	0,101	0,04	-0,308	0,397	0
42		0,273	0,057	0,24	-0,110	0,595	0
43		0,091	0,167	0,09	-0,264	0,441	0
44		0,011	0,009	0,02	-0,332	0,373	0

Urb. Nr.	Mērīšanas laiks	Brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums, m			Regresijas ticamības intervāls pie varbūtības 95%		Ticamības intervāla nosacījuma izpildīšanās, 0 - izpildās, 1 - neizpildās
		Skaitliski aprēķinātais, b_a	Empīriski noteiktais, b_o	Prognozētais	Regresijas kreisā zona, $b0_2 + b1_2 x - t_{a,n} S_{y,x}$	Regresijas labā zona $b0_2 + b1_2 x + t_{a,n} S_{y,x}$	
		(X_2)	(Y_2)	$Y_{\text{progn.}}$			
Vidējais		0,711	0,597	0,600			
Mediāna		0,795	0,598	0,669			



4.5. attēls. Skaitliski aprēķināto un empīriski noteikto (pirms datu kopas kritisko vērtību atlasē) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību lineārās regresijas taisne

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

Figure 4.5. 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

Tālāk tika veikta pētījuma datu apstrāde, izmantojot regresijas būtiskuma pārbaudi pēc Stjudenta kritērija. Pārbaudes gaitā noteica lineārās sakarības vienādojuma

koeficienta bI reprezentācijas rādītāju, kurš nosaka regresijas līnijas stāvokli ģenerālkopā. Pamatojoties uz reprezentācijas koeficientu, tika veikta regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude. Būtiskuma pārbaudes dati apkopoti 4.8. tabulā.

No 4.8. tabulas redzams, ka pirmā nulles hipotēze $H_{01}:bI=0$ ir noraidīta, jo $t=19,68387 > t_{\alpha,v}=2,001717$, no kā izriet, ka regresijas koeficients ir būtisks, bet noteiktais vienādojums ir reprezentabls un izmantojams pētījuma aprēķinos.

Savukārt otrās nulles hipotēzes $H_{02}:bI=0$ regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude pirms kritisko datu kopas vērtību atlasē uzrādīja, ka tas nav būtisks, par cik $t=0,176607 < t_{\alpha,v}=2,05183$ un otrā hipotēze ir spēkā. Tas savukārt nozīmē, ka noteiktais regresijas vienādojums nav reprezentabls un tas šādā veidā nevar tikt izmantots brīvās fāzes šķidrums aktuālā biežuma noteikšanai (prognozēšanai) gruntsūdens horizontā pēc urbumu atsūkšanās datiem.

4.8. tabula. Regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude

Table 4.8. Regression coefficient significance verification

Izvirzītā hipotēze	Regresijas koeficienta bI reprezentācijas rādītājs, S_{bI}	Stjudenta kritērija teorētiskā vērtība, $t_{\alpha,v}$	Stjudenta kritērijs, $ t $	Nulles hipotēzes $H_0:bI=0$ statuss nosacījumam $t, t_{\alpha,v}$
Pirmā nulles hipotēze, H_{01}	0,006423	2,001717	19,68387	$t > t_{\alpha,v}$ Noraidīta
Otrā nulles hipotēze, H_{02} (pirms datu kopas kritisko vērtību atlasē)	0,083113	2,05183	0,176607	$t < t_{\alpha,v}$ Nav noraidīta

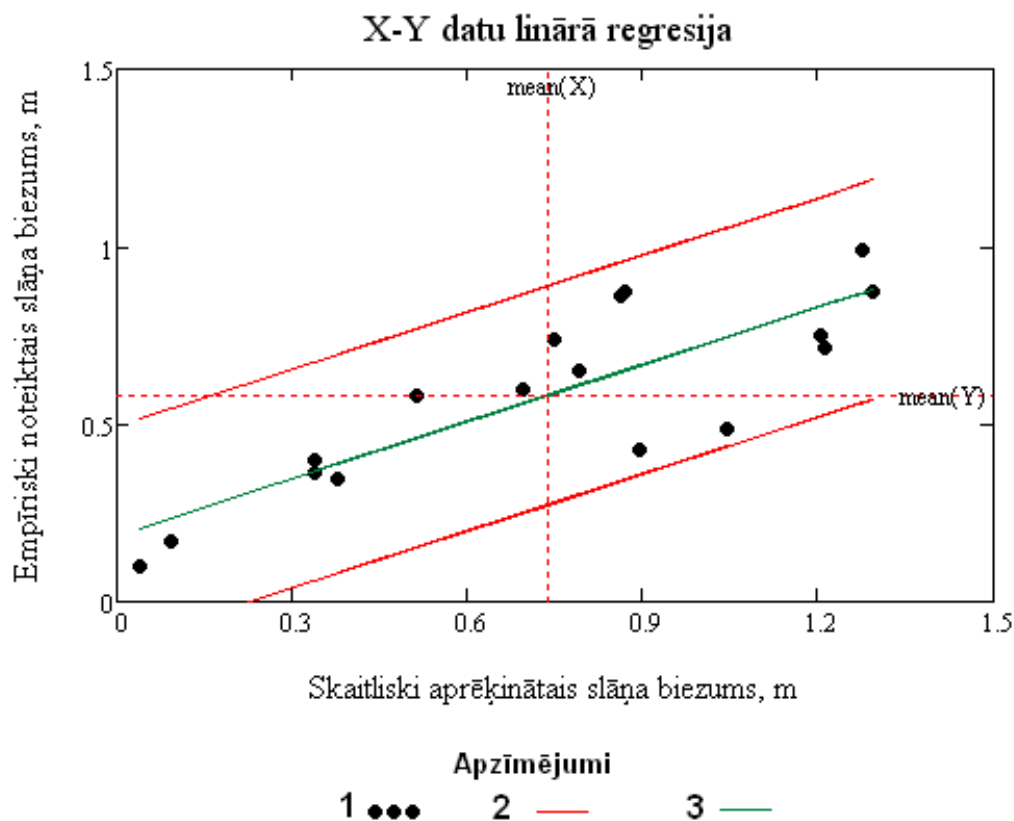
Lai panāktu otrās nulles hipotēzes $H_{02}:bI=0$ regresijas koeficienta būtiskuma nosacījuma izpildi, no pētījuma gaitā iegūtās brīvās fāzes šķidrums slāņa biežuma mērījumu kopas tika izvērtētas un izņemtas tās kritiskās vērtības, kuras atradās ārpus regresijas ticamības intervāla vai tuvu tā robežām. Kopumā šādā veidā tika atsijāti 12 mērījumi (urbumi Nr.16, 21, 23, 24, 28, 31, 35, 38, 40, 42 un 44), kuri dažādu iemeslu dēļ izrādījās nerezistenti. Detalizēti visi iemesli, kāpēc šie dati tika noraidīti, ir aprakstīti 5. sadaļā Diskusija.

Pēc kritisko vērtību izņemšanas no datu kopas un atkārtota otrās izvirzītās nulles hipotēzes H_{02} statistisko parametru aprēķina (skat. 4.9. tab.) tika iegūta jauna regresijas taisne, kas attēlota 4.6. attēlā.

4.9. tabula. Urbumos nomērītās un aprēķinātās brīvās fāzes šķidrums slāņa biežuma vērtību statistiskie rādītāji otrās nulles hipotēzes H_{02} pārbaudei pēc datu kopas kritisko vērtību atsijāšanas

Table 4.9. Statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the second null hypothesis H_{02} testing after critical data values dismissing from data set

Statistiskais parametrs	Apzīmējums	Vērtība	References
Paraugkopas apjoms	n	29	4.5. tabula
Pieņemtais būtiskuma līmenis	α	0,05	3.3.2. sadaļa
Atlikuma brīvības pakāpju skaits	v_z	27	(3.33) vienādoj.
t – kritērija kritiskā vērtība	$t_{\alpha,v}$	2,05183	(3.34) vienādoj.
Vidējā regresora vērtība	\bar{x}	0,711	(3.24) vienādoj.
Vidējā regresta vērtība	\bar{y}	0,597	(3.24) vienādoj.
Regresora mediāna	M_{eX}	0,795	4.5. tabula
Regresta mediāna	M_{eY}	0,598	4.5. tabula
Pīrsona korelācijas koeficients	r	0,889	(3.22) vienādoj.
Determinācijas koeficients	R	0,790	$R=r^2$
Regresora standartnovirze	s_x	0,436	(3.23) vienādoj.
Regresta standartnovirze	s_y	17	(3.23) vienādoj.
Regresijas standartnovirze	$s_{x,y}$	0,05	(3.33) vienādoj.
Kopējā vērtību noviržu kvadrātu summa	Q	15	(3.30) vienādoj.
Atlikuma noviržu kvadrātu summa	Q_z	2,1315	(3.31) vienādoj.
Regresijas noviržu kvadrātu summa	Q_y	0,711	(3.32) vienādoj.
Regresijas taisnes brīvais loceklis	$b0_2$	0,583	(3.20) vienādoj.
Regresijas taisnes virziena koeficients	$b1_2$	0,795	(3.20) vienādoj.



4.6. attēls. Skaitliski aprēķināto un empīriski noteikto (pēc datu kopas kritisko vērtību izņemšanas) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību lineārās regresijas taisne

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

Figure 4.6. The linear regression line of free-phase liquid layer thickness values calculated (simulated) numerically and acquired empirically (after critical data values dismissing from data set)

LEGEND. 1 – X-Y values; 2 – Left and right limit of critical values; 3 – The trend line

Pēc kritisko vērtību izņemšanas no datu kopas un otrās izvirzītās nulles hipotēzes H_{02} statistisko parametru pārreķina tika veikta atkārtota regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude (skat. 4.10. tab.).

4.10. tabula. Regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude pēc datu kopas kritisko vērtību izņemšanas

Table 4.10. Regression coefficient significance verification after critical data values dismissing from data set

Izvirzītā hipotēze	Regresijas koeficienta b_1 reprezentācijas radītājs, s_{b_1}	Stjudenta kritērija teorētiskā vērtība, $t_{\alpha, v}$	Stjudenta kritērijs, $ t $	Nulles hipotēzes $H_0: b_1=0$ statuss nosacījumam $t, t_{\alpha, v}$
Otrā nulles hipotēze, H_{02} (pēc datu kopas kritisko vērtību atslānes)	0,08303	2,13145	2,239287	$t > t_{\alpha, v}$ Noraidīta

No 4.10. tabulas redzams, ka otrās nulles hipotēze $H_{02}: b_1=0$ pēc datu kopas kritisko vērtību atslānes ir noraidīta, jo $t=2,239287 > t_{\alpha, v}= 2,13145$, no kā izriet, ka regresijas koeficients ir būtisks, bet noteiktais vienādojums ir reprezentabls un izmantojams pētījuma aprēķinos, kas arī bija jāpierāda.

Balstoties uz augstāk iegūtajiem datiem abām izvirzītajām hipotēzēm tika veikta korelācijas koeficienta būtiskuma noteikšana, salīdzinot tā aprēķināto lielumu ar kritisko vērtību $r_{\alpha, n}$, kuru, atkarībā no paraugkopas apjoma n un α , nolasa 3.2. tabulā. Korelācijas koeficienta kritisko vērtību salīdzināšanas rezultāti skatāmi 4.11. tabulā.

4.11. tabula. Korelācijas koeficienta būtiskuma pārbaude

Table 4.11. The correlation coefficient significance verification

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_0 (pirms datu kopas kritisko vērtību atlasēs)	29	0,05	0,889	0,367
Otrā nulles hipotēze, H_0 (pēc datu kopas kritisko vērtību atlasēs)	17	0,05	0,839	0,482

Aprēķināto korelācijas koeficientu vērtību un tām atbilstošo sakarību ciešuma raksturojumam var izmantot arī 3.3. tabulu (skat. sadaļu 3.3.3. Korelācijas analīze). Saskaņā ar šo tabulu visos augstāk aprakstītajos gadījumos (pirmajai nulles hipotēzei 4.8. tabulā un otrajai – 4.10. tabulā) aprēķinātās korelācijas koeficienta vērtības raksturojamas kā funkcionāli pozitīvas, kas vēlreiz apliecina to, ka, pielietojot datu statistiskās apstrādi, ir noteiktas un atsijātas kļūdainās vērtības un rezultātā ir iegūta divu datu kopu regresijas lineāra sakarība, kas šos datus ar augstu ticamības pakāpi ļauj izmantot turpmākajiem aprēķiniem.

Apkopojot visus iegūtos datus, atbilstoši pirmajai un otrajai izvirzītajai hipotēzei varam 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 izvirzīto pētījuma hipotēzi brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālais biezums gruntsūdens horizontā ir atšķirīgs no urbumā nomērītā. Pasaules praksē daudzo pētījumu gaitā ir pierādīts, ka brīvās fāzes šķidrums slāņa aktuālo biezumu var aprēķināt (modelēt) matemātiski (API-No.4729, 2003; API-No.4760, 2007). Šī pētījuma gaitā ir noteikts, ka starp modelētajām un urbumā nomērītajām brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtībām eksistē cieša ($r=0.998$) korelācija un datu izkliede ap regresijas taisni ir minimāla (skat. 4.4.tab. un 4.4. att.). Iegūtie datu statistiskās apstrādes rezultāti ļauj pieņemt, ka skaitliski noteiktās (modelētās) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtības ir patiesas un tāpēc tām var pielīdzināt citas šī parametra vērtības, kas iegūtās ar atšķirīgām metodēm, tajā skaitā arī empīriski.

Empīriski noteiktais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums atšķiras gan no urbumā nomērītā, gan arī no skaitliski noteiktā. Mūsu 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 vienādojumu (4.4) pārrakstām sekojošā veidā:

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

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

Divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma gruntsūdens horizontā koncepcija laika gaitā ir vairākkārt 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. Šī paradigma paredz, ka virs gruntsūdens horizonta izvietojas liels mobils brīvās fāzes šķidruma slānis.

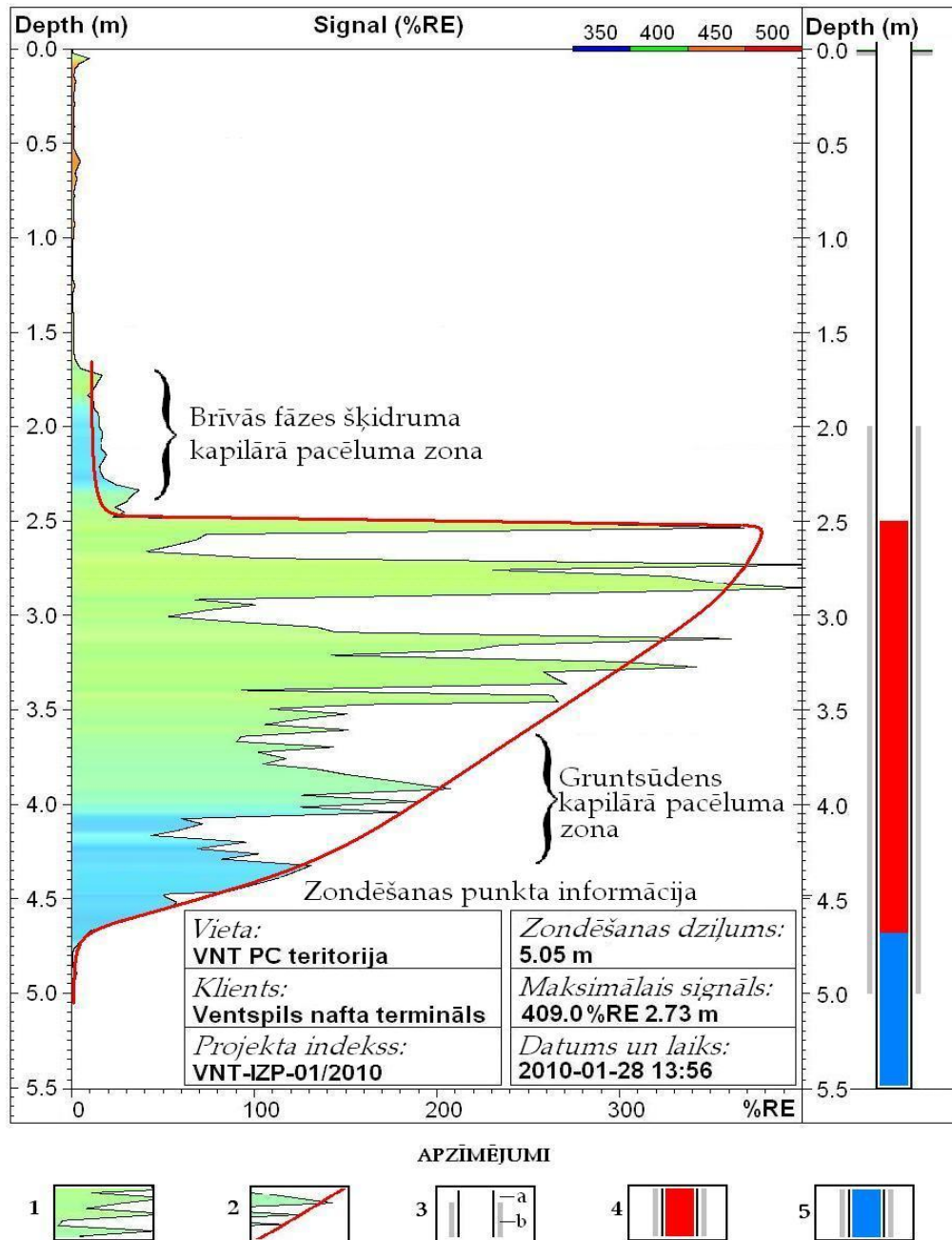
Sākot ar pagājušā gadsimta 70-ajiem gadiem (Lefebvre, 2006), turpmākie pētījumi (Brooks, Corey, 1964; Genuchten, 1980) pierādīja, ka kapilāro spēku ietekmē brīvās fāzes šķidruma slāņa iegulas intervālā gruntsūdens horizontā veidojas sarežģīta daudzfāzu sistēma, kuras ietvaros brīvās fāzes šķidruma piesātinājums grunts porās mainās no tā maksimālā procentuālā satura slāņa augšā līdz minimālam slāņa apakšā (skat. 3.4. att.). Lauku pētījumi ir pierādījuši (API-Publication, 2004), ka šī daudzfāzu koncepcija ir piemērojama gan rupji graudainām gan arī smalkām smiltīm.

Kad urbuma ierīkošanas laikā tā filtra kolona tiek ievietota gruntsūdens horizontā, kas satur brīvās fāzes šķidruma slāni, urbumā sāk ieplūst gan virs gruntsūdens peldošais brīvās fāzes šķidruma, gan arī zem tā esošais ūdens. Tas turpinās līdz brīdim, kamēr tiek sasniegts urbumā un gruntsūdens horizontā esošo šķidrumu spiediena līdzsvars. Rezultātā filtra kolonā virs ūdens noslāņojas patstāvīgs brīvās fāzes šķidruma slānis, kurš urbumā faktiski atspoguļo ārpus caurules esošo gruntsūdens horizonta intervālu, kas tāpat satur brīvās fāzes šķidrumu. Tomēr vertikālais brīvās fāzes šķidruma un ūdens procentuālais sadalījums gruntsūdens horizontā un urbumā ir ļoti atšķirīgi (Charles et al., 1995). Ir novērots, ka urbumā esošais brīvās fāzes šķidruma slāņa biežums parasti ir lielāks par tā faktisko (aktuālo) biežumu gruntsūdens horizonta piesātinātajā intervālā un šī starpība var mainīties no divām līdz pat desmit reizēm (Mercer, Cohen, 1990). Minēto apliecina arī lāzera izraisītās fluorescences (LIF) lauku pētījumu rezultāti (Kalpišs, 2010), kas uzskatāmi parāda, ka brīvās fāzes šķidruma procentuālais piesātinājums (5.1. attēla grafikā – zaļi tonētais pildījums) gruntsūdens horizontā ir vairākas reizes mazāks par faktiski 100% šīs vielas piesātinājumu brīvās fāzes šķidruma slānī urbumā (5.1. attēlā – urbuma sarkanais pildījums).

Kā viens no faktoriem, kas ietekmē to, cik liela starpība ir starp urbumā novēroto (šķietamo) un gruntsūdens horizonta piesātinātajā daļā reāli esošo (faktisko) brīvās fāzes šķidruma slāņa biežumu (skat. 5.1. att.) ir iežu heterogenitāte (Abdul et al., 1989). Šo starpību tāpat ietekmē šķidrumu kapilārie spēki horizontā, brīvās fāzes šķidruma blīvums un tā saistības pakāpe ar minerālo grunti (Blake, Hall, 1984). Citiem vārdiem sakot, jo smalkāka ir grunts un lielāki kapilārie spēki tajā, un jo lielāka ir starpība starp urbumā novēroto un gruntsūdens horizonta piesātinātajā daļā reāli esošo brīvās fāzes šķidruma slāņa biežumu (Mercer, Cohen, 1990).

Ņemot vērā to, ka urbumā nav kapilāro spēku, gruntsūdens līmenis tajā vienmēr atradīsies zemāks par gruntsūdens kapilārā pacēluma zonu tā saskares vietā ar brīvās fāzes šķidrumu (skat. 5.1. att.). Rezultātā brīvās fāzes šķidrums no gruntsūdens kapilārā pacēluma ietekmes zonas, kur uz to iedarbojas ūdens spiediens no apakšas, pārvietosies uz urbumu, kur šāda kapilārā ūdens spiediena nav un aizpildīs šo urbuma telpu, sākot no zemākā līmeņa, kas atbilst gruntsūdens kapilārās zonas pacēluma sākumam horizontā. Tajā pat laikā, ja brīvās fāzes šķidruma slāņa biežums gruntsūdens horizontā ir tik liels, kad tā masas spiediens pārspēj ūdens kapilāro celšanos, tad starpība starp urbumā novēroto un

horizontā esošo brīvās fāzes šķidruma slāņa biezumu mazināsies (Testa, Paczkowsk, 1989).



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

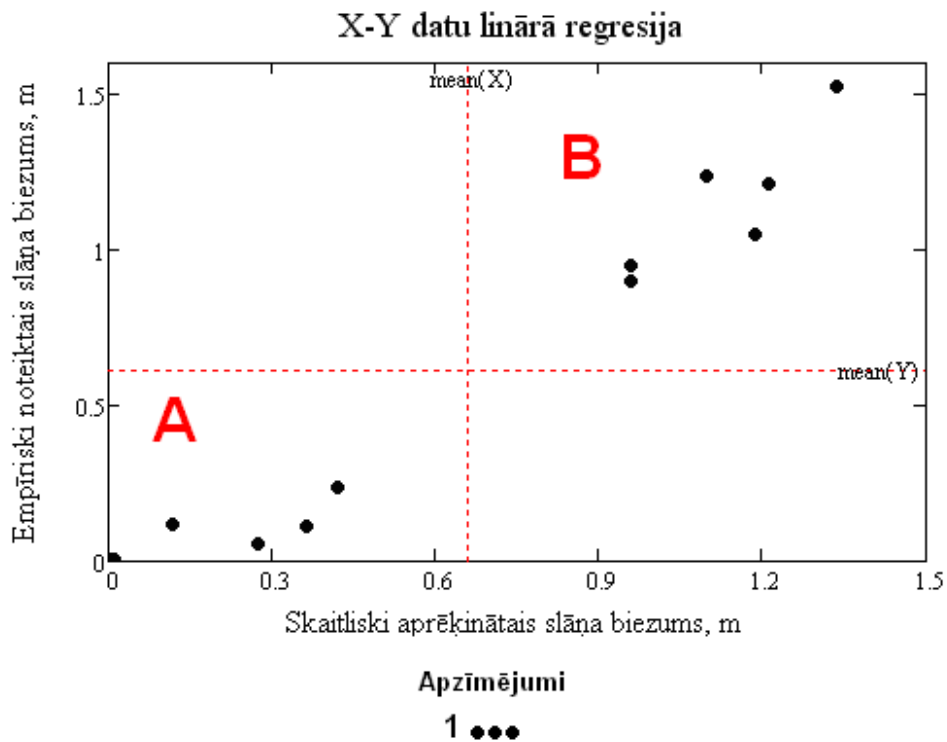
APZĪMĒJUMI. 1 – lāzera izraisītās fluorescences profils; 2 – modelētais (sarkanā līnija) un ar LIF metodi noteiktais (zaļais tonējums) brīvās fāzes šķidruma piesātinājums gruntī; 3 – urbums: a) apvalkcaurule, b) filtrs; 4. – brīvās fāzes šķidruma urbumā; 5 – ūdens urbumā.

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.

Visi minētie faktori ir ļoti būtiski pētījuma 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 tāds spiediens, kas neļauj ūdenim pa kapilāriem pārvietoties uz augšu un iespiesties brīvās fāzes šķidrums piesātinājuma zonā. Tas nozīmē, ka brīvās fāzes šķidrums slāņa biezumam pārsniedzot kaut kādu noteiktu lielumu, tā faktiskā vērtība gruntsūdens horizontā pakāpeniski tuvināsies šī slāņa novērotajai biezuma vērtībai urbumā (Testa, Paczkowsk, 1989) . Šo faktu arī apstiprina veiktā pētījuma datu statistiskās apstrādes rezultāti.

5.2. attēlā parādīts sākotnēji datu statistiskās apstrādes rezultātā noraidīto empīrisko brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību izvietojums grafikā. No šī grafika redzams, ka ir izdalāmi divi kritisko vērtību apgabali – kreisais (A) un pa labi vērstais (B) apgabals. Katram no šiem apgabaliem ir sava izcelsme un savs skaidrojums. Brīvās fāzes šķidrums slāņa sākotnēji noraidītās vērtības (A) un (B) apgabaliem dotas 5.1. tabulā.



5.2. attēls. Empīriski noteiktā brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību apgabali (A) un (B) lineārās regresijas grafikā

APZĪMĒJUMI. 1 – X-Y vērtības

Figure 5.2. Empirical given free phase liquid layer thickness critical value areas (A) and (B) on the linear regression chart

LEGEND. 1 – X-Y values

Pa labi vērstais grafika 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 apgabala vērtībām, kas grafikā atrodas pa labi) visticamāk saistās ar brīvās fāzes šķidruma adsorbēšanos gruntsūdens horizonta iežu minerālajā frakcijā. Tas nozīmē, ka daļa no brīvās fāzes šķidruma apjoma tiek mehāniski saistīta ar grunti, tā zaudē savu mobilitāti un rezultātā novēršanas urbumā brīvās fāzes šķidruma slānis neveidojas vai arī tā biezums ir mazāks par to, kādam tam vajadzētu būt saskaņā ar pētījuma izvirzīto hipotēzi.

Pēdējo faktu labi ilustrē 5.3. attēls 88. lappusē, kurā kā piemērs dots neatgriežamā un mobilā brīvās fāzes šķidruma piesātinājuma sadalījums 44. urbumam. Attēlā redzamajā grafikā uz abscisu ass parādīts brīvās fāzes šķidruma procentuālais piesātinājums gruntī, bet uz ordinātu ass – dziļums metros.

5.1. tabula. Sākotnēji noraidītās empīriski noteiktās brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma vērtības

Table 5.1. Initially rejected values of empirically given free-phase liquid layer thickness

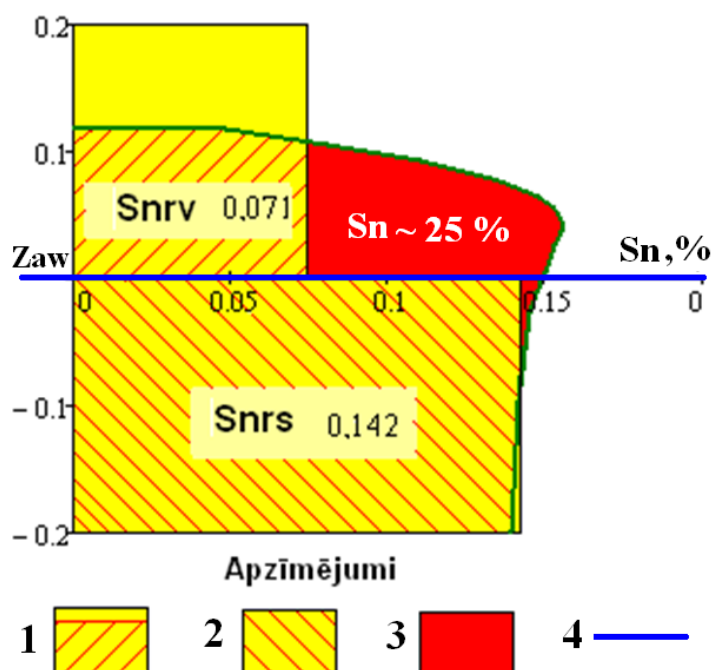
Urbuma Nr.	Brīvās fāzes šķidruma biezums, m			Apgabals
	Nomērītais urbumā	Skaitliski noteiktais	Empīriski noteiktais	
23	0,68	0,421	0,237	A Kreisis apgabals
24	0,29	0,117	0,119	
38	0,61	0,363	0,114	
40	0,03	0,007	0,007	
42	0,50	0,273	0,057	
44	0,05	0,011	0,009	
16	1,30	0,957	0,900	B Labais apgabals
21	1,30	0,957	0,950	
28	1,56*	1,187*	1,049*	
31	1,46	1,098	1,237	
33	1,73	1,337	1,525	
35	1,59	1,213	1,213	

* Atkārtoti noraidītās vērtības

* Repeatedly rejected values

Neatgriežamais brīvās fāzes šķidruma piesātinājums S_{nrV} un S_{nrS} (skat. 4.1. tab. 4.1. sadaļā) norāda maksimālo šķidruma apjomu gruntī, kas nevar izraisīt šī šķidruma plūsmu, jo tas ir iesprostots porās vai arī tas ir cieši saistīts (adsorbēts) ar minerālu graudu virsmu (Luckner et al., 1989). Principā tas ir kapilāro spēku ietekmē nogulumu porās aizturētais šķidruma apjoms (Genuthen, Nilson, 1985), kas nepiedalās divfāzu plūsmā gruntsūdens horizontā un tāpēc tas var arī neparādīties urbumā gan tā atsūkņēšanas, gan arī līmeņu atjaunošanās laikā pēc atsūkņēšanas.

No 5.3. attēla redzams, ka brīvās fāzes šķidruma mobilā frakcija no visa kopējā šī šķidruma apjoma gruntī (konkrētajā gadījumā 44. urbums) sastāda tikai aptuveni 25%. Ar to arī acīmredzot izskaidrojams eksperimentā fiksētais fakts, ka novēršanas urbumā brīvās fāzes šķidruma slānis neveidojas vai arī tā biezums ir mazāks par to, kādam tam vajadzētu būt saskaņā ar pētījuma izvirzīto hipotēzi.



5.3. attēls. Neatgriežamais un mobilais brīvās fāzes šķidruma piesātinājuma sadalījums 44. urbumam, noteikts skaitliski ar Van Genuhtena – Burdine modeli

APZĪMĒJUMI. 1- neatgriezeniskais brīvās fāzes šķidruma piesātinājums aerācijas zonā (Snrv), 2 – neatgriezeniskais brīvās fāzes šķidruma piesātinājums apūdeņotajā zonā (Snrs), 3 – kustīgais (mobilais) brīvās fāzes šķidrums (Sn), 4 – hipotētiskais (Zaw) gruntsūdens līmenis.

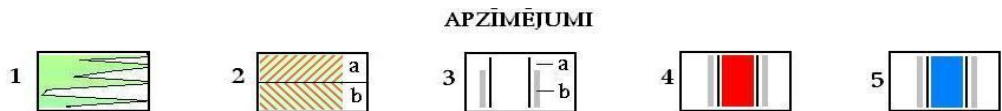
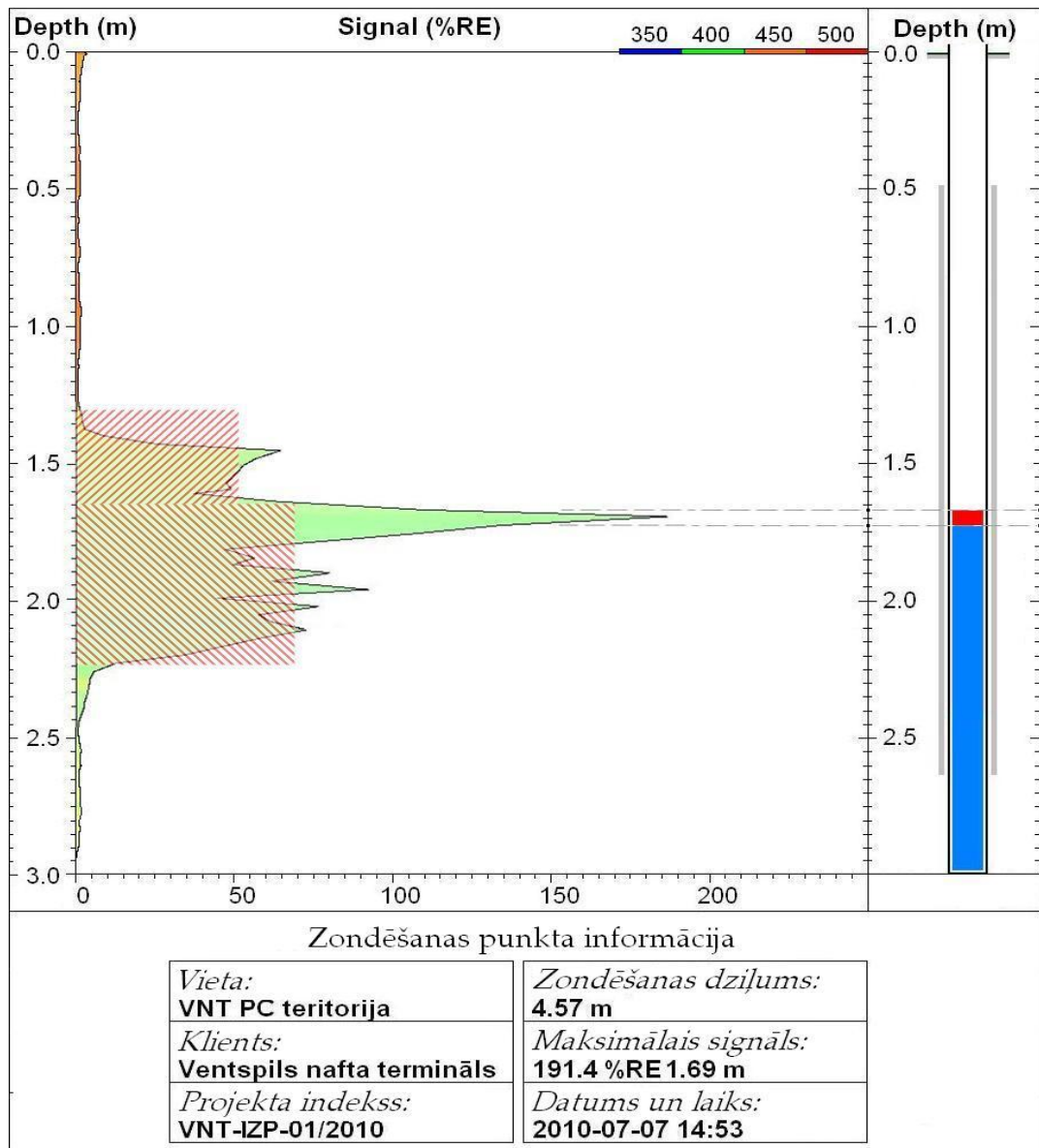
Figure 5.3. Residual and mobile free-phase liquid saturation distribution in the well No.44, determined numerically by Van Genuhtena - Burdine model

LEGEND. 1 – residual free-phase liquid saturation in vadose zone (Snrv), 2- residual free-phase liquid saturation in saturated zone (Snrs), 3 – mobile free-phase liquid (Sn), 4 – hypothetical (Zaw) water table.

Ar Van Genuhtena–Burdine modeli skaitliski noteikto neatgriežamā (adsorbētā) un mobilā brīvās fāzes šķidruma proporcionālo attiecību gruntsūdens horizontā (skat. 5.3. att.) netieši apstiprina arī lāzera izraisītās fluorescences zondēšanas rezultāti, kas doti 5.4. attēlā (Kalpišs, 2010).

Novērots, ka brīvās fāzes šķidruma peldošā slāņa biezums urbumā samazinās gruntsūdens līmeņa celšanās laikā un otrādi – palielinās pie tā pazemināšanās. Atsevišķos gadījumos brīvās fāzes šķidruma slānis var izzust vispār. Sevišķi tas raksturīgs periodiem, kad gruntsūdens līmenis nokrītas zemāk par tā parasti vērojamajām minimālajām atzīmēm horizontā (Aleksāns, 2006; Aral, Liao, 1996; Kembrowski, Chiang, 1990).

Minēto labi ilustrē 5.4. attēls, no kura redzams, ka gruntsūdens līmeņa sezonālo svārstību intervālā brīvās fāzes šķidrums ir it kā „izsmērēts” gruntī un tikai neliels tā apjoms spēj akumulēties mobila slānīša veidā, kas tad arī tiek fiksēts urbumā. Kā svarīgs papildus faktors mobilā šķidruma 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 šķidruma mobilitāti gruntī un līdz ar to arī varbūtību, ka šāds slānis vispār veidosies (Burdine, 1953; API-No.4711, 2001).



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

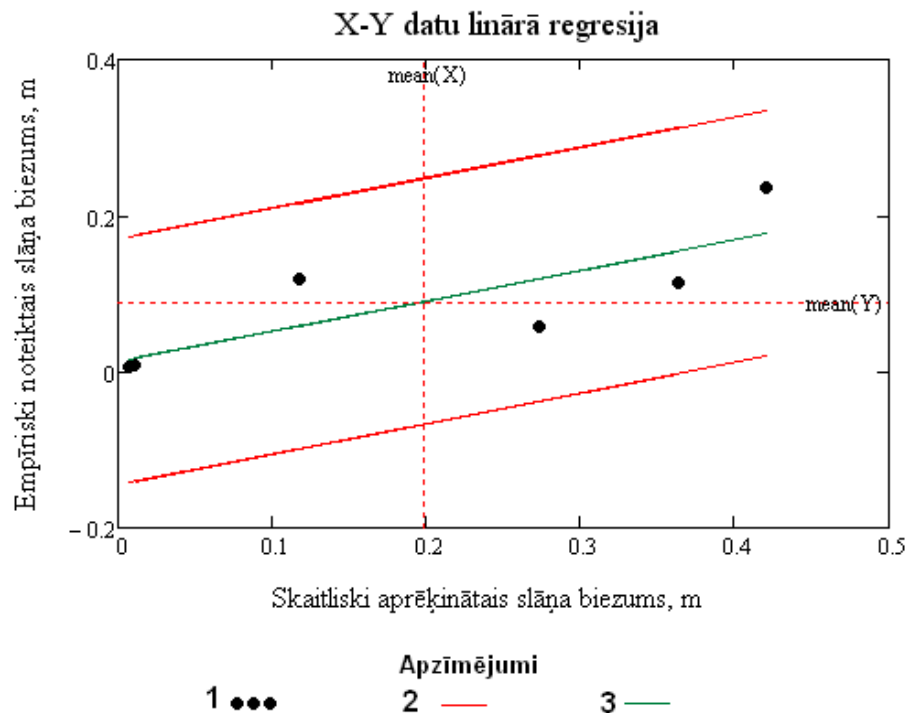
APZĪMĒJUMI. 1 – lāzera izraisītās fluorescences profils; 2 – neatgriezeniskais brīvās fāzes šķidrums piesātinājums: a) aerācijas zonā, b) piesātinātājā zonā; 3 – urbums: a) apvalkcaurule, b) filtrs; 4 – brīvās fāzes šķidrums urbumā; 5 – ūdens urbumā.

Figure 5.4. 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.

Pētījuma eksperimentā veiktie mērījumi atsevišķiem urbumiem ar nelielu brīvās fāzes šķidrums slāņa biezumu uzrādīja visai pretrunīgus rezultātus, kas 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 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, Durnford, 1996).

Augstāk skaidrotos pieņēmumus apstiprina arī pētījuma datu statistiskās analīzes rezultāti. Skaitliski un empīriski aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums kritisko vērtību kopas (skat. 5.2. att.) kreisā (A) apgabala regresijas taisne dota 5.5. attēlā.



5.5. attēls. Kreisā (A) apgabala skaitliski un empīriski aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums kritisko vērtību lineārās regresijas taisne

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

Figure 5.5. Left side (A) linear regression line of free-phase liquid layer thickness values calculated (simulated) numerically and acquired empirically

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

Izmantojot 5.5. attēlā doto kreisā (A) apgabala skaitliski un empīriski aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums kritisko vērtību lineārās regresijas taisni, ir iegūti statistiskie rādītāji, kas apkopoti 5.2. tabulā.

Balstoties uz 5.2. tabulā doto kreisā (A) apgabala kritisko vērtību kopas statistiskās otrās nulles hipotēzes H_0 pārbaudes rezultātiem, tika veikta regresijas būtiskuma pārbaude pēc Stjūdenta kritērija, nosakot lineārās sakarības vienādojuma koeficienta b_1 reprezentācijas rādītāju, kurš raksturo regresijas līnijas stāvokli ģenerālkopā.

Pamatojoties uz reprezentācijas koeficientu, tika veikta regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude. Būtiskuma pārbaudes dati apkopoti 5.3. tabulā.

5.2. tabula. Kreisā (A) apgabala urbumos nomērīto un aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību kopas statistika otrās nulles hipotēzes H_{02} pārbaudei

Table 5.2. Left side (A) statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the second null hypothesis H_{02} testing

Statistiskais parametrs	Apzīmējums	Vērtība	References
Paraugkopas apjoms	n	6	4.5. tabula
Pieņemtais būtiskuma līmenis	α	0,25	3.3.2. sadaļa
Atlikuma brīvības pakāpju skaits	v_z	4	(3.33) vienādoj.
t – kritērija kritiskā vērtība	$t_{\alpha,v}$	1,344	(3.34) vienādoj.
Vidējā regresora vērtība	\bar{x}	0,199	(3.24) vienādoj.
Vidējā regresenta vērtība	\bar{y}	0,091	(3.24) vienādoj.
Regresora mediāna	M_{ex}	0,195	4.5. tabula
Regresenta mediāna	M_{ey}	0,089	4.5. tabula
Pīrsona korelācijas koeficients	r	0,810	(3.22) vienādoj.
Determinācijas koeficients	R	0,656	$R=r^2$
Regresora standartnovirze	s_x	0,179	(3.23) vienādoj.
Regresenta standartnovirze	s_y	0,087	(3.23) vienādoj.
Regresijas standartnovirze	$s_{x,y}$	0,060	(3.33) vienādoj.
Kopējā vērtību noviržu kvadrātu summa	Q	0,038	(3.30) vienādoj.
Atlikuma noviržu kvadrātu summa	Q_z	0,013	(3.31) vienādoj.
Regresijas noviržu kvadrātu summa	Q_y	0,025	(3.32) vienādoj.
Regresijas taisnes brīvais loceklis	b_{02}	0,392	(3.20) vienādoj.
Regresijas taisnes virziena koeficients	b_{l2}	0,013	(3.20) vienādoj.

5.3. tabula. Kreisā (A) apgabala kritisko vērtību kopas regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude

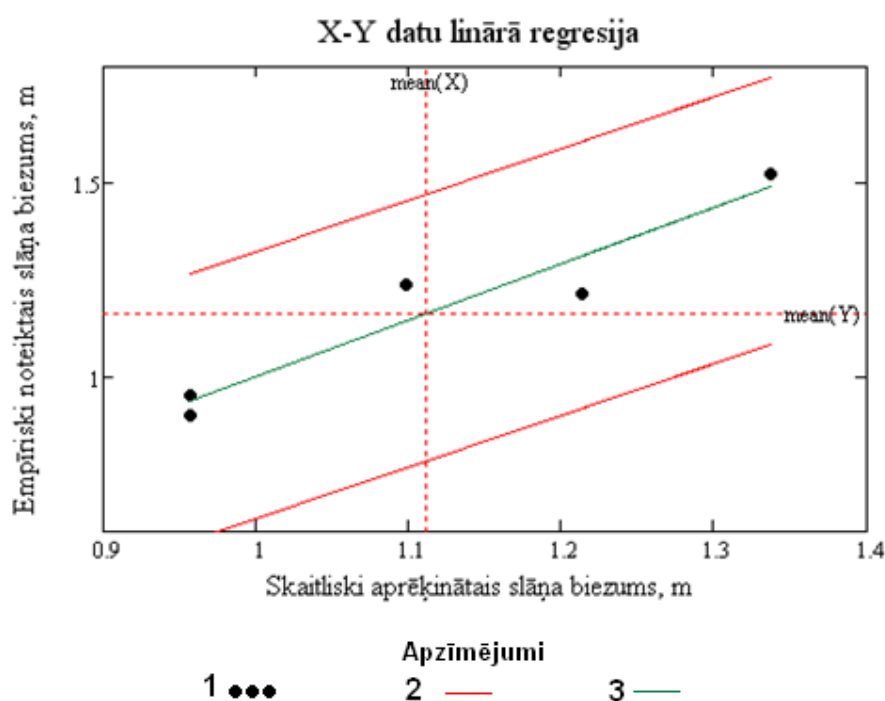
Table 5.3. Left side (A) correlation coefficient significance verification

Izvirzītā hipotēze	Regresijas koeficienta b_l reprezentācijas radītājs, s_{b_l}	Stjudenta kritērija teorētiskā vērtība, $t_{\alpha,v}$	Stjudenta kritērijs, $ t $	Nulles hipotēzes $H_0: b_l=0$ statuss nosacījumam $t, t_{\alpha,v}$
Otrā nulles hipotēze, H_{02} kreisā (A) apgabala kritisko vērtību kopai	0.141793	1.34440	0.08933	$t < t_{\alpha,v}$ Nav noraidīta

No 5.3. tabulas redzams, ka otrās nulles hipotēzes $H_{02}:b_1=0$ regresijas koeficients nav būtisks, par cik $t=0,08933 < t_{\alpha,v}=1,34440$, kas nozīmē, ka otrā hipotēze ir spēkā un līdz ar to noteiktais regresijas vienādojums nav reprezentabls. Jāpiebilst, ka otrās nulles hipotēze ($H_{02}:b_1=0$) papildus 95% ($\alpha=0,05$) ticamības intervālam tika pārbaudīta arī zemākai ticamībai – 75% ($\alpha=0,25$) un 50% ($\alpha=0,5$). Neskatoties uz šiem mēģinājumiem nevienā no pārbaudēm, nepieciešamā nosacījuma izpilde netika panākta (skat. tab. 5.2.).

Apkopojot visu augstāk sacīto, var secināt, ka kreisā apgabala (A) kritisko vērtību kopas izkliede ir pārāk liela, lai iegūto regresijas vienādojumu varētu izmantot brīvās fāzes šķidruma aktuālā biezuma noteikšanai (prognozēšanai) gruntsūdens horizontā pēc urbumu atsūkņēšanas datiem, kad urbumā nvērotais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums ir mazāks par 0,4 metriem.

Līdzīgi kā kreisajam (A) apgabalam tika pārbaudītas arī skaitliski un empīriski aprēķinātās brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma kritiskās vērtības labajam (B) apgabalam. Iegūtā regresijas taisne skatāma 5.6. attēlā.



5.6. attēls. Labā (B) apgabala skaitliski un empīriski aprēķināto brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma kritisko vērtību lineārās regresijas taisne

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

Figure 5.6. 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 and right limits of critical values; 3 – The trend line

Izmantojot 5.6. attēlā doto labā (B) apgabala skaitliski un empīriski aprēķināto brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma kritisko vērtību lineārās regresijas taisni, tika iegūti statistiskie rādītāji, kas apkopoti 5.4. tabulā.

5.4. tabula. Labā (B) apgabala urbumos nomērīto un aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību kopas statistika otrās nulles hipotēzes H_0 pārbaudei

Table 5.4. Right side (B) statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the second null hypothesis H_0 testing

Statistiskais parametrs	Apzīmējums	Vērtība	References
Paraugkopas apjoms	n	7	4.5. tabula
Pieņemtais būtiskuma līmenis	α	0,17	3.3.2. sadaļa
Atlikuma brīvības pakāpju skaits	ν_z	3	(3.33) vienādoj.
t – kritērija kritiskā vērtība	$t_{\alpha,\nu}$	1,798	(3.34) vienādoj.
Vidējā regresora vērtība	\bar{x}	1,112	(3.24) vienādoj.
Vidējā regresenta vērtība	\bar{y}	1,165	(3.24) vienādoj.
Regresora mediāna	M_{eX}	1,098	4.5. tabula
Regresenta mediāna	M_{eY}	1,213	4.5. tabula
Pīrsona korelācijas koeficients	r	0,958	(3.22) vienādoj.
Determinācijas koeficients	R	0,917	$R=r^2$
Regresora standartnovirze	s_x	0,165	(3.23) vienādoj.
Regresenta standartnovirze	s_y	0,252	(3.23) vienādoj.
Regresijas standartnovirze	$s_{x,y}$	0,08	(3.33) vienādoj.
Kopējā vērtību noviržu kvadrātu summa	Q	0,254	(3.30) vienādoj.
Atlikuma noviržu kvadrātu summa	Q_z	0,021	(3.31) vienādoj.
Regresijas noviržu kvadrātu summa	Q_y	0,232	(3.32) vienādoj.
Regresijas taisnes brīvais loceklis	b_0	1,460	(3.20) vienādoj.
Regresijas taisnes virziena koeficients	b_1	-0,459	(3.20) vienādoj.

Izmantojot lineārās sakarības vienādojuma koeficienta b_1 reprezentācijas rādītāju, veikta labā (B) apgabala vērtību kopas regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude pēc Stjudenta kritērija. Šīs pārbaudes laikā tika konstatēts, ka kopējā aprēķinu shēmā neiekļaujas 28. urbums, tāpēc dati par šo urbumu tika atmesti kā nederīgi (skat. 5.1. tab.). Koriģētie (bez 28. urbuma datiem) būtiskuma pārbaudes rezultāti apkopoti 5.5. tabulā.

No 5.5. tabulas redzams, ka otrā hipotēze $H_0: b_1=0$ ir noraidīta, jo $t=1,809788 > t_{\alpha,\nu}=1,798118$, bet tas nozīmē, ka šīs hipotēzes regresijas koeficients ir būtisks un noteiktais regresijas vienādojums ir reprezentabls.

Tomēr atzīmējams, ka hipotēzes regresijas koeficienta būtiskuma nosacījums izpildās tikai 83% ($\alpha=0,17$) ticamības intervālam un mazākam. No tā var secināt, ka, lai gan labā apgabala (B) kritisko vērtību izkliede ir augstāka par centrālā apgabala vērtību izkliedi, iegūto regresijas vienādojumu var izmantot brīvās fāzes šķidrums aktuālā biezuma noteikšanai (prognozēšanai) gruntsūdens horizontā pēc urbumu atsūkšanās datiem ar ticamības pakāpi līdz 83% pēc sekojoša 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.

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

Table 5.5. Right side (B) correlation coefficient significance verification

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

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

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

SECINĀJUMI

Pirmo reizi Baltijas valstīm raksturīgos hidroģeoloģiskos apstākļos realizēta divfāzu šķidruma plūsmas gruntsūdens horizontā teorētisko datu sistemātiska analīze un to verificēšana ar lauku eksperimentu rezultātiem, noteiktas likumsakarības, novērtēti apstākļi un rezultātus ietekmējošie faktori. Pētījumā kā zinātnisks pieņēmums izvirzīta hipotēze par jaunām, vēl neizpētītām brīvās fāzes šķidruma slāņa aktuālā biezuma noteikšanas iespējām, kas nākotnē varētu tikt attīstīta par pētniecības metodi. Detalizēti analizēta izvirzītās metodes ticamība, pārbaudīta šādā veidā iegūto datu izmantošanas perspektīva svarīgu hidroģeoloģisko parametru aprēķiniem divfāzu šķidruma plūsmai poraino nogulumu horizontā.

Pētījumā pārbaudīts zinātniskajā literatūrā aprakstītais un vairākkārtīgi pierādītais fakts, ka novērošanas urbumā nomērītais brīvās fāzes šķidruma slāņa biezums parasti pārsniedz šī slāņa faktisko (aktuālo) biezumu gruntsūdens horizontā. Izvirzīta un pierādīta hipotēze, ka starp „patieso” (aktuālo) brīvās fāzes šķidruma slāņa biezumu ģeoloģiskajos nogulumos un „novērojamo” šī slāņa biezumu urbumā eksistē cieša savstarpēja saistība, kuru var izmantot aktuālā slāņa biezuma aprēķināšanai pēc pētījumā izstrādātās un aprakstītās metodes.

Eksperimentā pierādīts, ka pēc urbuma atsūkņēšanas pārtraukšanas, līmeņu atjaunošanās laikā ir iespējams iegūt datus, uz kuru pamata var noteikt brīvās fāzes šķidruma slāņa aktuālo biezumu gruntsūdens horizontā. Atsūkņēšanas eksperimentā iegūtajiem datiem ir augsta korelācija ar modelēšanas ceļā aprēķinātajiem parametriem, kas norāda uz šo divu metožu savstarpējo aizvietojamību dažādos lietišķos un zinātniskos pētījumos.

Konstatēts, ka atsūkņēšanas eksperimenta gaitu tāpat ietekmē ģeoloģiskie, hidroģeoloģiskie un fiziskie faktori, kuru mijiedarbība atspoguļojas gruntsūdens un brīvās fāzes šķidruma līmeņu svārstību raksturā. Balstoties uz mērījumu datiem par līmeņu svārstībām urbumā un to laika līkņu raksturu, ar analītisko metodi ir iespējams ne tikai noteikt brīvās fāzes šķidruma aktuālo biezumu gruntsūdens horizontā, bet arī spriest par atsevišķiem faktoriem, kuri nosaka līmeņu izmaiņu likumsakarības.

Veikta pētījuma datu statistiskā apstrāde, kuras gaitā pārbaudīts atsūkņēšanas eksperimenta gaitā empīriski iegūtā (pētāmā) lieluma vērtību kopas patiesums un tas salīdzināts ar skaitlisko (modelēto) aprēķinu ceļā teorētiski noteikto (zināmo) datu kopu. Noteikti regresijas funkciju veidi, t.i. atkarības matemātiskās formas starp atsūkņēšanas eksperimentā empīriski iegūtajām un urbumā nomērītajām pētāmā parametra lieluma vērtībām. Datu statistiskās apstrādes un to verificēšanas ceļā konstatēts, ka brīvās fāzes šķidruma slānim, kura biezums ir mazāks par 0,4 m, korelācija ir salīdzinoši zema un tādēļ šo vērtību salīdzināšanai ir nepieciešamas citas analītiskās metodes.

Pierādīts, ka ar divām dažādām metodēm noteikto (empīriski un analītiski) divu parametru kopu vērtības ir patiesas, kas nozīmē, ka atsūkņēšanas eksperimenta mērījumu rezultāti un analītisko aprēķinu dati adekvāti raksturo nosakāmā parametra skaitlisko vērtību un šī parametra variēšanu. Lauku eksperimentos iegūtajiem parametriem konstatēta augsta ticamības pakāpe, jo tā ir tiešā pētījumu metode, kas samazina subjektīvo faktoru ietekmi uz rezultātiem un tādējādi mazina arī kļūdu rašanās iespējas. Pierādīts, ka šādā veidā iegūtie parametri turpmāk ar statistiski noteiktu ticamības pakāpi ir izmantojami viena gadījuma lieluma vērtību prognozei pie uzdotām otra gadījuma vērtībām.

Pētījumā iegūto datu verificēšanai pirmo reizi Latvijā pielietota inovatīva lāzera izraisītās fluorescences metode. Fluorescences spektroskopija šodien ir viena no

jaukākajām tehnoloģijām pasaulē, kas piemērota aromātiskās struktūras molekulu novērošanai pētāmajā vidē. Viena no šāda veida ogļūdeņražu grupām ir policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži, kas veido lielāko daļu naftas produktu, un tāpēc šī metode ir ideāli piemērotu naftas produktu brīvās fāzes šķidrums noteikšanai gruntsūdens horizontā.

Pētījumu eksperimentu gaitā tika iegūta augsta veikto mērījumu atkārtojamība, kas ļauj secināt, ka piedāvātā brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma izmaiņu noteikšanas metode ir arī ļoti efektīva un patreizēji tai nav analoga hidroģeoloģisko pētījumu praksē Latvijā.

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

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

Publicētā

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., Dimitrijevs, E., 2011. Lāzera izraisītās fluorescences metodes iespējas organiskā piesārņojuma noteikšanai gruntī. *Ģeogrāfija, ģeoloģija vides zinātne. LU 69. zinātniskā konference*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, lpp. 264-266.

Aleksāns, O., Dimitrijevs, E., 2009. Naftas produktu piesārņojuma noteikšana gruntī ar lāzera izraisītās fluorescences metodi. *Ģeogrāfija, ģeoloģija vides zinātne. LU 67. zinātniskā konference*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, lpp 265-267.

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.

Aleksāns, O., Gobiņš, J., Semjonovs, I., 1997. Inčukalns – pētījumi sanācijai. (Book) Semjonovs, I., (red.) *Pazemes ūdeņu aizsardzība Latvijā*. Gandrs, Rīga, Latvija, lpp.401-425.

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.

Aleksāns, O., Klimovičs, J., 2006. Naftas produktu brīvās fāzes piesārņojums gruntsūdens horizontā. Kampars, V. u.c., (red.) *Materiālzinātne un lietišķā ķīmija*. Rīga, RTU, lpp.12-18.

Aleksāns, O., 2000. Virs pazemes ūdens līmeņa peldošo piesārņojošo vielu slāņa faktiskā biezuma noteikšana. *Latvijas ģeoloģijas vēstis* (9), lpp. 35-37.

Aleksāns, O., 2006. Naftas produktu brīvās fāzes slāņa aktuālā biezuma noteikšanas problēmas un to iespējamie risinājumi, *Datormodelēšana un robežproblēmas* 29(5), Rīga, Latvija, RTU, lpp. 173-182.

Aleksāns, O., 2006. Naftas produktu piesārņojuma peldošā slāņa biezuma izmaiņu monitorings. Brangulis, A. u.c., (red.) *Lietišķo ģeoloģisko pētījumu lauku metodes un instrumenti*. Rīga, LU, lpp. 6-8.

Aleksāns, O., 2008. Inovatīvo tehnoloģiju pielietojuma iespējas mūsdienu hidroģeoloģiskajos pētījumos. *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Zemes zinātne, Referātu tēzes*, 66. *zinātniskā konference*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, lpp.180-182.

Aleksans, O., 2009. Detection of Hydrocarbons in Soil by Laser-Induced Fluorescence Method. In *International Conference Soil Degradation*. Riga, SIA VentEko pp. 74-77.

- Aleksāns, O., 2009. Divu datu kopu pāru regresijas analīze hidroģeoloģiskajos pētījumos. (Book). Spalviņš, A., (red.) *Boundary Field Problems and Computer Simulation*. RTU Izdevniecība, Rīga, lpp. 27-32.
- 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, lpp. 162-164.
- 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_No.4760, 2007. LNAPL Distribution and Recovery Model (LRDM-Vol.2). (Book). *Distribution and Recovery of petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media*. API publication 4760, Texas, p. 77.
- 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., 1996. Effect of Groundwater Table Fluctuations on Hydrocarbon Thickness Measurements. (Book). School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia, p. 40.
- Aral, M.M., Liao, B., 2000. LNAPL thickness interpretation based on bail-down tests. *Ground Water* 38(5), pp. 696-701.
- Arhipova, I., Bāliņa, S., 2000. Statistika ar Microsoft Excel ikvienam. 2. daļa. (Grāmata). Datorzinību Centrs, Rīga, lpp. 136.
- Ballester, T.P., Fiedler, F.R., Kinner, N.E., 1994. An investigation of the relationship between actual and apparent gasoline thickness in a uniform sand aquifer. *Ground Water* 32(5), pp. 708-718.
- Beckett, G.D., Lyverse, M.A., 2002. A Protocol for Performing Field Tasks and Follow-up Analytical Evaluation for LNAPL Transmissivity Using Well Baildown Procedures. (Book). AQUI-VER Inc. and Chevron Texaco Energy Research and Technology Co, Belaire, p.12.

Beckett, G.D., Steven, J., 2003. *Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Parameter Database, Version 2.0*. California: API Available at: <http://www.api.org/ehs/groundwater/lnapl/index.cfm> [Accessed 18 March 2011].

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 Aanalysis & Scientific Affairs Department*. API publications; Aquiver Inc.; Park City, Utah., Washington, p.45.

Brooks, 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, lpp. 45-55.

Burdine, N.T., 1953. Relative permeability calculations from pore-size data. *Trans. A.I.M.E* (198), pp. 71-77.

Charles, J.N., Charles, D.A., Randall, R.R., Scott, G.H., 1995. Light Nonaqueous Phase Liquids. *Ground water issue EPA/540/S-95/500(1)*, p. 28.

Chidley, T.R.E., Lloyd, J.W., 1977. A Mathematical Model Study of Fresh-Water Lenses. *Ground Water* 15(3), p. 215-222.

EPA_510-R-96-001, 1996. How To Effectively Recover Free Product At Leaking Underground Storage Tank Sites. In *A Guide for State Regulators*. EPA, p. 85.

Farr, A.M., Houghtalen, R.J., McWhorter, D.B., 1990. Volume estimation of light non aqueous phase liquids in porous media. *Ground Water* 28(1), pp. 48-56.

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.

Genuthen, M.T.V., Leij, F.J., Yates, S.R., 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. (Book). Joseph, R.W., (ed.) U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California, U.S., p.85.

Genuthen, M.T.V., Nilson, D.R., 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophys.*, pp. 615-628.

Gillispie, G.D., 1993. Spectroscopic Characterization of Polymers. In *Fluorescence Principles*. Fargo, North Dakota, Department of Chemistry, North Dakota State University, pp.89-127.

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.

- 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.
- Hall, R.A., Blake, S.B., Champlin, S.C., 1984. Determination of hydrocarbon thickness in sediments using borehole data. *Proceedings, Fourth National Symposium on Aquifer Restoration and Groundwater Monitoring*. Columbus, OH, National Water Well Association, pp. 300-304.
- 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.
- Huling, S.G., Weaver, J.W., 1991. Dense nonaqueous phase liquids. *Ground Water (EPA/540/4-91-002)*, p. 21.
- 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, lpp. 48.
- Kembrowski, M.W., Chiang, C.Y., 1990. Hydrocarbon thickness fluctuation in monitoring wells. *Ground Water* 28(4), pp.244-52.
- 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.
- Lenhard, R.J., Parker, J.C., 1990. Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in monitoring wells. *Ground Water* 28(1), pp. 57-67.
- 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.
- Levins I., Prols, J., 1997. Metodiskie norādījumi pazemes ūdeņu aizsardzībā. Semjonovs, I., (red.) *Pazemes ūdeņu aizsardzība*. Rīga, LR VARAM, lpp. 132-146.
- Liepa I., 1974. Biometrija. (Grāmata). *Statistika*. Zvaigzne, Rīga, lpp. 336.
- Loginova, T., 1997. Gruntsūdeņu piesārņojuma izpētes metodes. Semjonovs, I., (ed.) *Pazemes ūdeņu aizsardzība*. Rīga, LR VARAM, lpp. 198-203.

- 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, lpp.109.
- Marinelli, F., Durnford, D.S., 1996. LNAPL thickness in monitoring wells considering hysteresis and entrapment. *Ground Water* 34(4), pp.405-14.
- Markulis, V., Dolgiy, A., Dolgiy, A., 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 *13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, P54*. Istanbul. EAGE, pp. 54-59.
- 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.
- Nyer, E.K. et al., 1996. In Situ Treatment Technology. (Book). Lewis Publishers, New York, p. 319.
- Pastrovich, T.L., Baradat, Y., Barthel, R., 1979. Protection of ground water from oil pollution. (Book). CONCAWE, Hague, p. 250.
- Samarskij, A.A., 1989. Teorija raznosntnih shem. (Book). Nauka, Maskava, lpp. 616. [In Russian].
- Schiegg, H.O., 1987. Considerations on water, oil, and air in porous media. USA, pp. 467-476.
- Semjonovs, I., 1997. Hidroģeoloģiskie pamati pazemes ūdeņu aizsardzībai. Semjonovs, I. u.c. *Pazemes ūdeņu aizsardzība*. Rīga, LR VARAM, lpp.10-15.
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J., 1981. Biometry. (Book). W.H. Freeman & Co, New York, p. 859.
- Spalviņš, A., Janbickis, R., Lāce, I., Aleksāns, O., 2002. Ventspils naftas pārkraušanas ceļa drenāžas sistēmas pētīšana ar hidroģeoloģiskā modeļa palīdzību. (Grāmata). *Starptautiskā konference EcoBalt'2002*. RTU, Rīga, lpp. 74.
- 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, Rīga, lpp. 64-65.
- 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

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 Ventspils Seaport. *In Merkurjev, Y. et al (eds.) A Publication of the Society for Computer Stimulation International*. Riga, Latvia., RTU, pp. 48-50.

Spalvins, A., Lace, 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*. Riga, 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*. Riga, RTU, pp. 60-84.

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.

Testa, S.m., Paczkowsk, 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.

Waddill, D.W., Parker, J.C., Yates, S.R., 1997. Simulated recovery of light, noaqueous phase liquid from unconfined heterogeneous aquifers. *Ground Water* 35(6), pp. 938-947.

Neublicētā

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, lpp. 51. [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, lpp. 13. [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, lpp. 34. [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, lpp. 28. [Projekts glabājas SIA VentEko arhīvā: Nr.06-08-VE-120402-2002-01].

Ališauskas, K., 1997. Ventspils pilsētas atsevišķo teritoriju pārslāpinātības izpēte 1993. – 1997. gadā. (Atskaite). AS Ģeoserviss, Rīga, lpp.150. [Atskaite glabājas AS Ģeoserviss arhīvā].

Juškevičs, V., 1999. Ventspils ģeoloģiskā uzbūve. Materiāli pilsētas ģenerālplāna korekcijai. (Atskaite). *Inženierģeoloģiskā izmeklēšana pilsētu detālplānojuma vajadzībām.*, Rīga, lpp.26. [Atskaite glabājas Latgeofondā. Inv.Nr.12266].

Kovaļenko., F., 1996. Augšnes, tās aerācijas zonas un gruntsūdeņu piesārņojuma inventarizācija VAS Ventspils nafta 1. ceha teritorijā. (Book). VNT SIA, Ventspils - Rīga, lpp. 42. [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. (Book). SIA VentEko, Rīga, lpp. 34. [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, lpp.74. [Atskaite glabājas Latgeofondā, In Russian].

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, lpp. 34. [Pārskats glabājas SIA VentEko arhīvā. Inv.Nr.06-01-VNT-MOD-01/09-2009-01].

Ludāns, A., 2010. Pārskats par gruntsūdens kvalitātes monitoringu SIA VNT PC teritorijā, MCT un bijušajā NAK Ūdeka teritorijā. 2010.gada II cikls. (Pārskats). SIA VentEko, Rīga, lpp. 50. [Pārskats glabājas SIA VentEko arhīvā. Inv.Nr.06-02-VNT-MON-01/10-2010-03].

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, lpp. 612. [Atskaite glabājas Latgeofondā, Inv.Nr.10297, In Russian].

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, lpp. 17. [Pārskats glabājas SIA VentEko arhīvā. Inv.Nr.06-01-VNT-MOD-RTUVMC-2009-01].

Švēde, A., 1998. Ģeoloģisko izpētes darbu atskaite. (Atskaite). *A/S Ventspils nafta: naftas produktu dzelzceļa cisternu divpusējās izliešanas-uzpildīšanas estakāde*. SIA ATW, Rīga, lpp. 7. [Atskait glabājas SIA ATW arhīvā].

Tracevskis, G., Juškevičs, V., Bogdanovs, A., 1969. Virsraksts Pārskats par 1:200 000 mēroga komplekso ģeoloģisko un hidroģeoloģisko kartēšanu O-43-XXII, XXIII, XXIV lapu teritorijā. (Book). *Kompleksā kvartāra nogulumu inženierģeoloģiskā un*

hidroģeoloģiskā kartēšana. Ģeoloģijas pārvalde, Rīga, lpp. 583. [Atskaite glabājas Latgeofondā. Inv.Nr.08555, In Russian].

Interneta resursi

Aldstadt, J. et al., 2002. Great Lakes. United States Environmental Protection Agency. *An In Situ Laser-Induced Fluorescence System for Polycyclic Aromatic Hydrocarbon-Contaminated Sediments*. Available at: <http://www.epa.gov/glnpo/sediment/pah/index.html> [Accessed February 2011].

Aleksans, O., 2009. Detection of Hydrocarbons in Soil by Laser-Induced Fluorescence Method. *International Conference: Soil Degradation*, Rīga: VentEko. pp. 74-77, Available at: http://www.venteko.lv/files/VentEko_materiali_2009_web.pdf [Accessed 27 March 2011].

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].

Enviro-Base_Pro, 2011. Schlumberger Water Services. Waterloo Hydrogeologic Inc Available at: <http://www.swstechnology.com/groundwater-software/groundwater-data-management> [Accessed 06 February 2011].

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].

Huntley, D., Beckett, G.D., 2000. NAPL Calculation Tools. API (version 2) Available at: <http://www.api.org/ehs/groundwater/lnapl/lnapl-guide.cfm> [Accessed 16 March 2011].

Lobach D., 2004. Programmi (In Russian). *Softkey (2.2)* Available at: http://www.softkey.info/reviews/review_757.php [Accessed 10 February 2011].

LR Ekonomikas Ministrija, 15.11.04. Latvijas rūpniecības attīstības pamatnostādnes (2004-2013). Informatīvā daļa. Rīga: LR Eko-nomikas Ministrija Pieejams: <http://old.em.gov.lv/em/2nd/?cat=74/> [Skatīts 2011. g. 8. martā].

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].

MathCad, 2011. MathCad. (14) Available at: <http://www.ptc.com/products/mathcad/> [Accessed 11 February 2011].

Mikuda, S., 2008. Pētniecības metodoloģija. (Book). Studiju materiāli maģistrantūras studijām., Rēzekne, lpp.72. Pieejams: <http://ftp.attistiba.lv/Rezekne/Petijumu%20metodologija%20un%20metodika%20magistrie>

m/Petijumu%20metodologija%20un%20metodika_studiju%20materials%20magistriem%202010.pdf [Skatīts: 2011. g. 18. februārī]

Pospelova, G., 2004. Datorlietas. Pieejams: <http://priede.bf.lu.lv/grozs/Datorlietas/> [Skatīts: 2008. g. 02. novembrī].

ROTEK, 2011. E-catalogue. *Rotek A/S* Available at: <http://www.rotek.eu/e-catalogue/groundwater-monitoring-and-sampling/data-loggers.aspx> [Accessed 22 January 2011].

SOLINST, 2009. Solinst General Brochure. Copyright © 2010 Solinst Canada Ltd. Available at: <http://www.solinst.com/Prod/Data/101.pdf> [Accessed 18 January 2011].

SURFER, 2010. Golden Software Inc, Surfer. [Online] (10) Available at: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml> [Accessed 11 February 2011].

DISERTĀCIJAS PIELIKUMS

TEKSTA TABULU SARAKSTS

Nr. p.k.	Tabulas Nr. un tās nosaukums	Lpp.
1.	2.1. tabula. Smilts daļiņu procentuālais saturs un smilts filtrācijas koeficients Table 2.1. Percentage content of sand particles and sand permeability coefficient	34
2.	2.2. tabula. Smilts nogulumu heterogenitātes koeficients Table 2.2. Sand sediment heterogeneity factor	35
3.	3.1. tabula. Izplatītāko iežu kapilārās īpašības raksturojošo parametru vidēji statistiskās vērtības Table 3.1. Average statistical values of parameters characterizing capillary properties of most common rocks	50
4.	3.2. tabula. Korelācijas koeficienta kritiskās vērtības $r_{\alpha,n}$ Table 3.2. The critical values $r_{\alpha,n}$ of correlation coefficient	61
5.	3.3. tabula. Korelācijas koeficienta vērtības un tai atbilstošās sakarības ciešuma raksturojums Table 3.3. Correlation coefficient value and corresponding characteristics of the relationship closeness	62
6.	4.1. tabula. Van Genuchtena-Burdine modelī izmantotie parametri Table 4.1. Parameters used in the Van Genuchtena-Burdine model	66
7.	4.2. tabula. Urbumos nomērītās un skaitliski aprēķinātās (modelētās) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtības Table 4.2. The values of free-phase liquid layer thickness measured in the wells and calculated (modeled) numerically	67
8.	4.3. tabula. Empīriski noteiktās brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtības Table 4.3. Empirically discovered free-phase liquid layer thickness values	71
9.	4.4. tabula. Urbumos nomērītās un aprēķinātās brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību statistiskie rādītāji pirmās nulles hipotēzes H_0 pārbaudei Table 4.4. Statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the first null hypothesis H_0 testing	72

Nr. p.k.	Tabulas Nr. un tās nosaukums	Lpp.
10.	4.5. tabula. Brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma prognozes un ticamības intervāla robežas pie varbūtības 95% pirmās nulles hipotēzes H_{01} gadījumam Table 4.5. Free-phase liquid layer thickness estimates and confidence interval limits at 95% probability in the case of the first null hypothesis H_{01}	73
11.	4.6. tabula. Urbumos nomērītās un aprēķinātās brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību statistiskie rādītāji otrās nulles hipotēzes H_{02} pārbaudei Table 4.6. Statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the second null hypothesis H_{02} testing	76
12.	4.7. tabula. Brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma prognozes un ticamības intervāla robežas pie varbūtības 95% otrās nulles hipotēzes H_{02} gadījumam Table 4.7. Free-phase liquid layer thickness estimates and confidence interval limits at 95% probability in the case of the second null hypothesis H_{02}	77
13.	4.8. tabula. Regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude Table 4.8. Regression coefficient significance verification	79
14.	4.9. tabula. Urbumos nomērītās un aprēķinātās brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību statistiskie rādītāji otrās nulles hipotēzes H_{02} pārbaudei pēc datu kopas kritisko vērtību atšijāšanas Table 4.9. Statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the second null hypothesis H_{02} testing after critical data values dismissing from data set	79
15.	4.10. tabula. Regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude pēc datu kopas kritisko vērtību izņemšanas Table 4.10. Regression coefficient significance verification after critical data values dismissing from data set	81
16.	5.1. tabula. Sākotnēji noraidītās empīriski noteiktās brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtīb Table 5.1. Initially rejected values of empirically given free-phase liquid layer thickness	87

Nr. p.k.	Tabulas Nr. un tās nosaukums	Lpp.
17.	5.2. tabula. Kreisā (A) apgabala urbumos nomērīto un aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību kopas statistika otrās nulles hipotēzes H_0 pārbaudei Table 5.2. Left side (A) statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the second null hypothesis H_0 testing	91
18.	5.3. tabula. Kreisā (A) apgabala kritisko vērtību kopas regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude Table 5.3. Left side (A) correlation coefficient significance verification	91
19.	5.4. tabula. Labā (B) apgabala urbumos nomērīto un aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību kopas statistika otrās nulles hipotēzes H_0 pārbaudei Table 5.4. Right side (B) statistics of measured in the wells and calculated free-phase liquid layer thickness values for the second null hypothesis H_0 testing	93
20.	5.5. tabula. Labā (B) apgabala kritisko vērtību kopas regresijas koeficienta būtiskuma pārbaude Table 5.5. Right side (B) correlation coefficient significance verification	94

TEKSTA ATTĒLU SARAKSTS

Nr. pk.	Attēla numurs un tā nosaukums	Lpp.
1.	2.1. attēls. Ar naftas produktiem piesārņoto iežu procentuālais sadalījums pēc to litoloģiskā sastāva Figure 2.1. Petroleum-contaminated rock percentage depending of its lithological composition	25
2.	2.2. attēls. Pētījumu objekta izvietojuma shēma Figure 2.2. Study site location scheme	26
3.	2.3. attēls. Pētījumu teritorijas ģeoloģiskā karte Figure 2.3. Geological map of study site	28
4.	2.4. attēls. Pētījumu objekta teritorijas telpiskais modelis ar gruntsūdens plūsmas virzieniem Figure 2.4. Spatial model of study area and groundwater flow directions	31
5.	2.5. attēls. Pētījumu teritorijas gruntsūdens līmeņa sezonālo svārstību grafiki Figure 2.5. The study area groundwater level seasonal fluctuations time schedules	32
6.	2.6. attēls. Brīvās fāzes šķidrums slāņa izplatības karte un urbumu izvietojums pētījumu objektā Figure 2.6. Free-phase liquid layer distribution map and drilling wells locations within the study site	33
7.	2.7. attēls. Smilts daļiņu procentuālā satura summārās līknes Figure 2.7. Cumulative curves of sand particle percentage content	35
8.	2.8. attēls. Smilšaino nogulumu neviendabības (heterogenitātes) koeficienta izmaiņas vertikālajā griezumā Figure 2.8. Sandy sediment heterogeneity factor changes in the vertical cross section	36
9.	2.9. attēls. Pētījumu objekta hidroģeoloģiskais griezumš Figure 2.9. Hydro geological cross section of exploration area	37
10.	3.1. attēls. Lāzera izraisītās fluorescences (LIF) zondēšanas iekārtas principiālā shēma Figure 3.1. The principal scheme of laser-induced fluorescence (LIF) probing device	40
11.	3.2. attēls. Iesūknējamās caurules iegremdēšanas dziļuma regulēšanas piemērs, izmantojot triju automātisko <i>DIVER</i> tipa sensoru sistēmu Figure 3.2. Example of pumping tube immersion depth adjustment, based on the three <i>-DIVER</i> -type level logger system measurements	42

Nr. pk.	Attēla numurs un tā nosaukums	Lpp.
12.	3.3. attēls. Urbuma atsūkņēšanas eksperimentālās sistēmas principiālā shēma Figure 3.3. Principal scheme of pumping system	43
13.	3.4. attēls. Gruntsūdens horizonta divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma fizikālais modelis Figure 3.4. Physical model of two-phase liquid vertical distribution in the groundwater aquifer	47
14.	3.5. attēls. Divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma gruntsūdens horizontā profils, noteikts ar lāzera izraisītās fluorescences (LIF) metodi Figure 3.5. Two-phase liquid fluorescence–depth vertical profile for aquifer, detected by laser induced fluorescence (LIF) method	48
15.	3.6. attēls. Urbumā novērojamā brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma izmaiņu grafiks atsūkņēšanas eksperimenta gaitā Figure 3.6 The graph of observed free-phase liquid layer thickness changes in the well during the pumping test	53
16.	3.7. attēls. Divfāzu šķidruma spiediena spēku sadalījuma novērošanas urbumā shēma Figure 3.7. The scheme of two-phase liquid pressure forces distribution in the observation well	55
17.	3.8. attēls. Divfāzu šķidruma vertikālā sadalījuma galveno parametru salīdzinājums gruntsūdens horizonta nogulumu slānim – A,B grafiki un novērošanas urbumam – C grafiks (apzīmējumus skatīt 3.7. att.) Figure 3.8. Two-phase liquid vertical distribution key parameters comparison for groundwater aquifer (A, B graphs) and observation well (C graph), (legend see in Figure 3.7.)	57
18.	4.1. attēls. Urbumos Nr.14A un Nr.26 novērotās brīvās fāzes šķidruma slāņa un gruntsūdens līmeņa atjaunošanās piemēri Figure 4.1. In the wells No.14A and No.26 observed free-phase liquid layer and groundwater level recovery examples	68
19.	4.2. attēls. Urbumos Nr.29 un Nr.32 novērotās brīvās fāzes šķidruma slāņa un gruntsūdens līmeņa atjaunošanās piemēri Figure 4.2. In the wells No.29 and No.32 observed free-phase liquid layer and groundwater level recovery examples	69
20.	4.3. attēls. Urbumā Nr.36 empīriski noteiktā brīvās fāzes šķidruma slāņa biezuma korekcijas piemērs Figure 4.3. The example of empirically given free-phase liquid layer thickness adjustment for well No.36	70

Nr. pk.	Attēla numurs un tā nosaukums	Lpp.
21.	4.4. attēls. Urbumos nomērīto un skaitliski aprēķināto (modelēto) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību lineārās regresijas taisne Figure 4.4. The linear regression line of free-phase liquid layer thickness values obtained from field measurements in the wells and numerically calculated (simulated)	75
22.	4.5. attēls. Skaitliski aprēķināto un empīriski noteikto (pirms datu kopas kritisko vērtību atlasēs) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību lineārās regresijas taisne Figure 4.5. 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)	78
23.	4.6. attēls. Skaitliski aprēķināto un empīriski noteikto (pēc datu kopas kritisko vērtību izņemšanas) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma vērtību lineārās regresijas taisne Figure 4.6. The linear regression line of free-phase liquid layer thickness values calculated (simulated) numerically and acquired empirically (after critical data values dismissing from data set)	81
24.	5.2. attēls. Empīriski noteiktā brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību apgabali (A) un (B) lineārās regresijas grafikā Figure 5.2. Empirical given free phase liquid layer thickness critical value areas (A) and (B) on the linear regression chart	86
25.	5.2. attēls. Empīriski noteiktā brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību apgabali (A) un (B) lineārās regresijas grafikā Figure 5.2. Empirical given free phase liquid layer thickness critical value areas (A) and (B) on the linear regression chart	86
26.	5.3. attēls. Neatgriežamais un mobilais brīvās fāzes šķidrums piesātinājuma sadalījums 44. urbūmam, noteikts skaitliski ar Van Genuhtena – Burdine modeli Figure 5.3. Residual and mobile free-phase liquid saturation distribution in the well No.44, determined numerically by Van Genuhtena - Burdine model	88
27.	5.4. attēls. Neatgriežamais un mobilais brīvās fāzes šķidrums piesātinājuma sadalījums 44. urbūma laukumam, noteikts lauku apstākļos ar LIF metodi Figure 5.4. Residual and mobile free-phase liquid saturation distribution in the area of well No.44, determined in the field by LIF method	89
28.	5.5. attēls. Kreisā (A) apgabala skaitliski un empīriski aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību lineārās regresijas taisne Figure 5.5. Left side (A) linear regression line of free-phase liquid layer thickness values calculated (simulated) numerically and acquired empirically	90

Nr. pk.	Attēla numurs un tā nosaukums	Lpp.
29.	5.6. attēls. Labā (B) apgabala skaitliski un empīriski aprēķināto brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma kritisko vērtību lineārās regresijas taisne Figure 5.6. Right side (B) linear regression line of free-phase liquid layer thickness values calculated (simulated) numerically and acquired empirically	92

TEKSTĀ IZMANTOTO VIENĀDOJUMU SARAKSTS

Nr. p.k.	Vienādojuma raksturojums	Vienādojums	Nr.	Lpp.
1.	Brīvās fāzes šķidruma slāņa maksimālā kapilārā pacēluma līmeņa aprēķina vienādojums	$z_{\max} = \frac{\alpha_{an}z_{an} - \alpha_{nw}z_{nw}}{\alpha_{an} - \alpha_{nw}}$	(3.1)	49
2.	Brīvās fāzes šķidruma slāņa maksimālā kapilārā pacēluma līmeņa aprēķina vienādojums	$z_{\max} = z_{an} \frac{(1 - \rho_r)(\sigma_{an}/\sigma_{nw})}{\rho_r - (1 - \rho_r)(\sigma_{an}/\sigma_{nw})} b_n$	(3.2)	49
3.	Brīvās fāzes šķidruma sākotnējā vertikālā sadalījuma aprēķina sakarība piesātinātajam intervālam	$S_{ni}(z) = \frac{(1 - S_{wr})(1 - S_{e[w]}(z))}{1 - f_r S_{e[w]}(z)}$	(3.3)	51
4.	Brīvās fāzes šķidruma sākotnējā vertikālā sadalījuma aprēķina sakarība nepiesātinātajam intervālam	$S_{ni}(z) = \frac{(1 - S_{wr})(S_{e[t]}(z) - S_{e[w]}(z))}{1 - f_r(1 + S_{e[w]}(z) - S_{e[t]}(z))}$	(3.4)	51
5.	Efektīvā ūdens piesātinājuma parametra aprēķina sakarība	$S_{e[w]}(z) = \frac{1}{\left(1 + (\alpha_{[nw]}(z - z_{nw}))^N\right)^M}$	(3.5)	51
6.	Efektīvā kopējam šķidruma apjoma piesātinājuma parametra aprēķina sakarība	$S_{e[t]}(z) = \frac{1}{\left(1 + (\alpha_{[an]}(z - z_{an}))^N\right)^M}$	(3.6)	51
7.	Brīvās fāzes šķidruma neatgriežamā apjoma aprēķina sakarība	$S_{nr}(z) = f_r S_{ni}(z)$	(3.7)	52
8.	Vertikālā ūdens sadalījuma gruntsūdens horizonta piesātinātajai zonai aprēķina vienādojums	$S_w(z) = S_{wr} + (1 - S_{wr} - S_{nr})S_{e[w]}(z)$	(3.8)	52
9.	Vertikālā brīvās fāzes šķidruma sadalījuma gruntsūdens horizonta piesātinātajai zonai aprēķina vienādojums	$S_n(z) = S_{nr} + (1 - S_{wr} - S_{nr})(S_{e[t]} - S_{e[w]})$	(3.9)	52

Nr. p.k.	Vienādojuma raksturojums	Vienādojums	Nr.	Lpp.
10.	Brīvās fāzes šķidrums un ūdens piesātinājuma aprēķina sakarība ūdens horizonta piesātinātajai zonai	$S_n(z) = 1 - S_w(z)$	(3.10)	52
11.	Brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares punkta spiediena aprēķina sakarība	$p_n = p_w$	(3.11)	54
12.	Brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares punkta spiediena aprēķina sakarības (3.11) atvasinājums	$h_n \times \rho_n \times G = h_w \times \rho_w \times G$	(3.12)	54
13.	Brīvās fāzes šķidrums slāņa pacēluma augstums no tā saskares virsmas ar ūdeni aprēķina sakarība	$(\Delta z_{an} + h_w) \times \rho_n = h_w \times \rho_w$	(3.13)	56
14.	atvasināts Gībena-Hercberga vienādojums	$\Delta z_{an} \times \rho_n = (\rho_w - \rho_n) \times h_w = (\rho_w - \rho_n) \times \Delta z_{nw}$	(3.14)	56
15.	Ūdens pjezometriskā pacēluma augstuma (spiediena) virs brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmas aprēķina izteiksme	$\Delta z_{nw} = \Delta z_{an} \times \frac{\rho_n}{(\rho_w - \rho_n)}$	(3.15)	56
16.	Brīvās fāzes šķidrums slāņa augstuma urbumā virs tā saskares ar ūdeni virsmas aprēķina izteiksme	$h_n = \Delta z_{an} \times \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_w - \rho_n}\right)$	(3.16)	56
17.	Brīvās fāzes šķidrums slāņa augstuma urbumā virs tā saskares ar ūdeni virsmas aprēķina izteiksme	$h_n = \Delta z_{an} \times \frac{\rho_n}{\rho_w - \rho_n}$	(3.17)	56
18.	Pirmās nulles hipotēzes lineārās regresijas vienādojums	$Y_1 = b_0 I + b_1 I X_1$	(3.18)	59

Nr. p.k.	Vienādojuma raksturojums	Vienādojums	Nr.	Lpp.
19.	Pirmās nulles hipotēzes izteiksme	$H0_1: b1_1 = 0$	(3.19)	59
20.	Otrās nulles hipotēzes lineārās regresijas vienādojums	$Y_2 = b0_2 + b1_2 X_2$	(3.20)	59
21.	Otrās nulles hipotēzes izteiksme	$H0_2: b1_2 = 0$	(3.21)	59
22.	Pīrsona koeficienta aprēķina vienādojums	$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \cdot \bar{y} \cdot n}{(n-1) \cdot s_x \cdot s_y}$	(3.22)	60
23.	x un y paraugkopu standartnovirzes aprēķins	$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}$	(3.23)	60
24.	x un y paraugkopu vidējais aritmētiskais	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$	(3.24)	61
25.	Korelācijas koeficientu būtiskuma vērtējums pēc Stjūdenta kritērija	$t = \frac{r - \theta}{s_r}$	(3.25)	61
26.	Lineārās regresijas vienādojums	$Y = b0 + b1X$	(3.26)	63
27.	Lineārās regresijas koeficienta b1 aprēķina vienādojums	$b1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \cdot \bar{y} \cdot n}{(n-1) \cdot s_x^2}$	(3.27)	63

Nr. p.k.	Vienādojuma raksturojums	Vienādojums	Nr.	Lpp.
28.	Lineārās regresijas brīvā locekļa b_0 aprēķina vienādojums	$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}$	(3.28)	63
29.	Regresenta kopējās noviržu kvadrātu summas aprēķins	$Q = Q_{\hat{y}} + Q_z,$ $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	(3.29)	63
30.	Visu vērtību kopējā noviržu kvadrātu summas aprēķins	$Q = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} = s_y^2 (n-1)$	(3.30)	64
31.	Atlikuma noviržu kvadrātu summas aprēķins	$Q_z = \sum_{i=1}^n y_i^2 - b_0 \sum_{i=1}^n y_i - b_1 \sum_{i=1}^n x_i y_i$	(3.31)	64
32.	Regresijas noviržu kvadrātu summas aprēķins	$Q_{\hat{y}} = Q - Q_z$	(3.32)	64
33.	Regresijas standartnovirzes aprēķina vienādojums	$s_{y \cdot x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k}} = \sqrt{\frac{Q_z}{n - k}} = \sqrt{\frac{Q_z}{v_z}}$	(3.33)	64
34.	Regresijas zonu (ticamības intervālu) pieraksta forma	$b_0 + b_1 x_i - t_{\alpha, v} s_{y \cdot x} < y < b_0 + b_1 x_i + t_{\alpha, v} s_{y \cdot x}$	(3.34)	65
35.	Lineārās regresijas koeficienta reprezentācijas radītāja aprēķina vienādojums	$s_{b_1} = \frac{s_{y \cdot x}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} = \frac{s_{y \cdot x}}{s_x \sqrt{n-1}}$	(3.35)	65
36.	Nulles hipotēzes (H_0) būtiskuma pārbaudes ar Stjūdenta kritēriju sakarība	$ t = \frac{b_1}{s_{b_1}}$	(3.36)	65

Nr. p.k.	Vienādojuma raksturojums	Vienādojums	Nr.	Lpp.
37.	Pirmās nulles hipotēzes regresijas vienādojums	$Y_1 = 0.0147 + 0.8231 X_1$	(4.1)	82
38.	Otrās nulles hipotēzes regresijas vienādojums	$Y_2 = 0.2575 + 0.5358 X_2$	(4.2)	82
39.	Skaitliski aprēķinātā brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma noteikšanas regresijas vienādojums	$b_a = 0.0147 + 0.8231 b_n$	(4.3)	82
40.	Empīriski noteiktais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezuma aprēķina regresijas vienādojums	$b_o = 0.2575 + 0.5358 b_a$	(4.4)	82
41.	Brīvās fāzes šķidrums aktuālā biezumu gruntsūdens horizontā empīriskā aprēķina vienādojums	$b_a = \frac{b_o - 0.2575}{0.5358}$	(4.5)	83
42.	Otrās nulles hipotēzes regresijas vienādojums kritisko vērtību kopai	$Y_2 = 1.46 - 0.46 X_2$	(5.1)	93

IZMANTOTO FIZIKĀLO LIELUMU, APZĪMĒJUMU UN MĒRVIENĪBU SARAKSTS

Apzīmējums	Skaidrojums	Mērvienības SI sistēmā	Piezīmes
Analītiskās metodes			
b_a	Aktuālais (faktiskais) brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums nogulumu horizontā	cm, m	3.6. attēls, 53. lpp. 3.8. attēls, 57. lpp.
b_n	Maksimālais urbumā novērojamais brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums	cm, m	(API-No.4729, 2003)
f_r	Brīvās fāzes šķidrums neatgriežamā (gruntī aizturētā) apjoma f-faktors	bezdimensijas lielums	(API-No.4760, 2007)
G	gravitācijas konstante	$N \times m^2 \times kg^{-2}$	$G = 6,67259 \times 10^{-11}$ (Lobach D., 2004)
h_n	brīvās fāzes šķidrums kāpuma (spiediena) augstums virs tā saskares virsmas ar gruntsūdeni, (arī brīvās fāzes šķidrums slāņa biezums)	cm, m	($h_n = b_n$) 3.4. attēls, 47. lpp. 3.7. attēls, 55. lpp.
h_w	ūdens kāpuma (spiediena) augstums gruntsūdens horizontā	cm, m	3.4. attēls, 47. lpp. 3.7. attēls, 55. lpp.
M	Van Genuhtena (M) parametrs	bezdimensijas lielums	$M = 1 - 1 \times N^{-1}$
N	Van Genuhtena (N) parametrs	bezdimensijas lielums	$N = 1 \times (1 - M)^{-1}$
n_s	Grunts porainība	bezdimensijas lielums (sk. no 0 līdz 1)	4.1. tabula, 66. lpp.
p_a	atmosfēras spiediens ūdens nepiesātinātajā (aerācijas) zonā	$g \times cm^{-2}$, Pa, mmH ₂ O, atmosfēras (atm.)	3.7. attēls, 55. lpp.
p_n	brīvās fāzes šķidrums spiediens gruntsūdens horizontā	$g \times cm^{-2}$, Pa, mmH ₂ O, atm.	3.7. attēls, 55. lpp.
p_w	ūdens spiediens gruntsūdens horizontā	$g \times cm^{-2}$, Pa, mmH ₂ O, atm.	3.7. attēls, 55. lpp.

Apzīmējums	Skaidrojums	Mērvienības SI sistēmā	Piezīmes
p_{Σ}	brīvās fāzes šķidruma un ūdens summārais spiediens gruntsūdens horizontā	$g \times cm^{-2}$, Pa, mmH ₂ O, atm.	$p_{\Sigma} = p_n + p_w$
$S_{e[tl]}$	Efektīvais kopējā šķidruma (ūdens + brīvā fāze) piesātinājums	bezdimensijas (sk. no 0 līdz 1)	(API-No.4760, 2007)
$S_{e[w](z)}$	Efektīvais ūdens piesātinājums (z) līmenī	bezdimensijas (sk. no 0 līdz 1)	(API-No.4760, 2007)
$S_n(z)$	Vertikālais brīvās fāzes šķidruma sadalījums gruntsūdens horizonta apūdeņotajai zonai (z) līmenī	bezdimensijas (sk. no 0 līdz 1)	($z < z_{an}$)
S_{ni}	Brīvās fāzes šķidruma sākotnējais piesātinājums gruntsūdens horizonta līmenim (z)	bezdimensijas (sk. no 0 līdz 1)	(API-No.4760, 2007)
S_{nr}	Brīvās fāzes šķidruma neatgriežamais (gruntī aizaurētais, adsorbētais) apjoms	bezdimensijas (sk. no 0 līdz 1)	(API-No.4760, 2007)
$S_w(z)$	Vertikālais ūdens piesātinājuma sadalījums gruntsūdens horizonta apūdeņotajai zonai (z) līmenī	bezdimensijas (sk. no 0 līdz 1)	($z < z_{an}$)
S_{wr}	Neatgriežamais (gruntī saistītais) ūdens piesātinājums	bezdimensijas (sk. no 0 līdz 1)	3.1. tabula, 50.lpp.
S_{nrv}	Neatgriežamais (gruntī saistītais) brīvās fāzes šķidruma piesātinājums aerācijas neapūdeņotajā zonā	bezdimensijas (sk. no 0 līdz 1)	3.1. tabula, 50.lpp.
S_{nrs}	Neatgriežamais brīvās fāzes šķidruma piesātinājums horizonta apūdeņotajā zonā	bezdimensijas (sk. no 0 līdz 1)	3.1. tabula, 50.lpp.
z	Līmenis (dziļums), kuram nosaka šķidruma piesātinājumu	cm, m	3.4. attēls, 47. lpp.
z_{an}	Gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsmas līmenis	cm, m	$z_{an} = (1 - \rho_n) \times b_n$, 3.4. attēls, 47. lpp. 4.1. tabula, 66. lpp.
z_{aw}	Gaisa un brīvās fāzes šķidruma saskares virsmas līmenis (hipotētiskais, pjezometriskais gruntsūdens līmenis)	cm, m	3.6. attēls 53. lpp., 3.7. attēls 55. lpp.
z_{gs}	Atskaites punkta (zemes virsmas) līmenis	cm, m	3.4. attēls, 47. lpp.

Apzīmējums	Skaidrojums	Mērvienības SI sistēmā	Piezīmes
Z_{max}	Maksimālais brīvās fāzes šķidrums līmenis	cm, m	3.4. attēls, 47. lpp.
Z_{nw}	Brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmas līmenis	cm, m	$Z_{nw} = \rho_n \times b_n$, 3.6. attēls 53. lpp.
α	Van Genuhtena alfa-parametrs	cm^{-1}, m^{-1}	3.1. tabula, 50.lpp.
α_{an}	Gaisa un brīvās fāzes šķidrums saskares virsmas spraiguma mijiedarbības faktors	cm^{-1}, m^{-1}	$\alpha_{an} = \alpha \times \rho_n \times \sigma_{aw} \times \sigma_{an}^{-1}$ 4.1. tabula, 66. lpp.
α_{nw}	Brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmas spraiguma mijiedarbības faktors	cm^{-1}, m^{-1}	$\alpha_{nw} = \alpha \times (1 - \rho_n) \times \sigma_{aw} \times \sigma_{an}^{-1}$ 4.1. tabula, 66. lpp.
ΔZ_{an}	brīvās fāzes šķidrums augstums virs gruntsūdens hipotētiskā līmeņa	cm, m	$\Delta Z_{an} = h_n - h_w$ 3.7. attēls, 55. lpp.
ΔZ_{nw}	gruntsūdens hipotētiskā līmeņa augstums virs tā saskares virsmas ar brīvās fāzes šķidrums	cm, m	$\Delta Z_{nw} = h_w$ 3.7. attēls, 55. lpp.
λ	Brūka-Koreja poru izmēra sadalījuma indekss	bezdimensijas lielums	$N = \lambda + 1$ 3.1. tabula, 50.lpp.
ρ_n	Brīvās fāzes šķidrums blīvums	$g \times cm^{-3}$	(Genuchten, 1980)
ρ_n	Brīvās fāzes šķidrums blīvums horizontā	$g \times cm^{-3}$ $kg \times m^{-3}$	(Lobach D., 2004)
ρ_w	Ūdens blīvums gruntsūdens horizontā	$g \times cm^{-3}$	(Lobach D., 2004)
ρ_w	Ūdens blīvums gruntsūdens horizontā	$g \times cm^{-3}$ $kg \times m^{-3}$	(Lobach D., 2004)
σ_{an}	Gaisa un brīvās fāzes šķidrums saskares virsmas spraigums	$dini \times cm^{-1}$	4.1. tabula, 66. lpp.
σ_{aw}	Gaisa un ūdens saskares virsmas spraigums	$dini \times cm^{-1}$	4.1. tabula, 66. lpp.
σ_{nw}	Brīvās fāzes šķidrums un ūdens saskares virsmas spraigums	$dini \times cm^{-1}$	4.1. tabula, 66. lpp.
Ψ_b	Brūka-Koreja kapilārais rādītājs	cm, m	$\alpha = \sim 1 \times \Psi_b^{-1}$, 3.1. tabula, 50.lpp.

Skaitliskās analīzes metode

v	Datu kopas brīvības pakāpju skaits	skaitlis	$v = n - k$
v_z	Atlikuma brīvības pakāpju skaits	skaitlis	$v_z = n - k$

Apzīmējums	Skaidrojums	Mērvienības SI sistēmā	Piezīmes
\bar{x}, \bar{y}	x un y paraugkopas vidējais aritmētiskais	cm, m	(Pospelova, 2004)
b_0	Regresijas līknes brīvais loceklis	skaitliska vērtība	(Carkova, 1979)
b_{0_1}	Pirmās hipotēzes regresijas līknes brīvais loceklis	bezdimensijas lielums	(Geske, 2001)
b_{0_2}	Otrās hipotēzes regresijas līknes brīvais loceklis	bezdimensijas lielums	(Geske, 2001)
b_1	Regresijas koeficients	skaitliska vērtība	(Carkova, 1979)
b_{1_1}	Pirmās hipotēzes regresijas koeficients	bezdimensijas lielums	(Geske, 2001)
b_{1_2}	Otrās hipotēzes regresijas koeficients	bezdimensijas lielums	(Geske, 2001)
H_{0_1}	Pirmā nulles hipotēze	bezdimensijas lielums	(Geske, 2001)
H_{0_2}	otrā nulles hipotēze	bezdimensijas lielums	(Geske, 2001)
k	Regresijas vienādojuma koeficientu skaits	skaitlis	(Pospelova, 2004)
n	x un y paraugkopas apjoms	skaitlis	($n_x = n_y = n$)
Q	Lineārās sakarības regresenta kopējā noviržu kvadrātu summa	cm, m	$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$
$Q_{\hat{y}}$	Regresijas noviržu kvadrātu summa	cm, m	(Pospelova, 2004)
Q_z	Atlikuma noviržu kvadrātu summa	cm, m	$Q_z = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$
R	Determinācijas koeficients	bezdimensijas lielums	$R = r^2$
$r_{\alpha, n}$	Korelācijas koeficientu kritiskās vērtība	skaitliska vērtība	(Liepa I., 1974) 3.2. tabula
s_{b_1}	Koeficienta b_1 reprezentācijas radītājs	skaitliska vērtība	$b_1 \pm s_{b_1}$
s_r	Korelācijas koeficienta r reprezentācijas radītājs	bezdimensijas lielums	3.3. tabula
s_x	x paraugkopas (regresora) standartnovirze	cm, m	(Pospelova, 2004)

Apzīmējums	Skaidrojums	Mērvienības SI sistēmā	Piezīmes
s_x^2	y paraugkopas (regresora) dispersija	skaitliska vērtība	$s_x = \sqrt{s_x^2}$
s_y	y paraugkopas (regresenta) standartnovirze	cm, m	(Pospelova, 2004)
$s_{y \cdot x}$	y un x paraugkopas regresijas standartnovirze	cm, m	$0 \leq s_{y \cdot x} \leq s_y$
$s_{y \cdot x}^2$	y un x paraugkopas regresijas dispersija	skaitliska vērtība	$Q_z=0, s_{y \cdot x}=0, s_{y \cdot x}=s_y,$
s_y^2	y paraugkopas (regresenta) dispersija	skaitliska vērtība	$s_y = \sqrt{s_y^2}$
t	Stjudenta kritērijs korelācijas koeficients	bezdimensijas lielums	3.2. tabula, 61. lpp.
$t_{\alpha, v}$	Stjudenta kritērija teorētiskā vērtība noteiktam brīvības pakāpju skaitam v	bezdimensijas lielums	(Liepa I., 1974)
$t_{\alpha, v}$	t-kritērija kritiskā vērtība	cm, m	(Pospelova, 2004)
X	Nomērītā urbumā (1. hipotēzei) vai analītiski aprēķinātā (2. hipotēzei) parametra vērtība	cm, m	(Carkova, 1979)
X_1	Urbumā nomērītā parametra vērtība	cm, m	(Geske, 2001)
X_2	Skaitliski aprēķinātā parametra vērtība	cm, m	(Geske, 2001)
X_i	Faktoriālās vērtības (pazīmes), jeb faktori	cm, m	(Pospelova, 2004)
x_i, y_i	x un y paraugkopas i-tās vērtības	cm, m	(Pospelova, 2004)
$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$	Faktoriālo vērtību variantes	cm, m	(Pospelova, 2004)
Y	Eksperimentā noteiktā (empīriskā) parametra vērtība	cm, m	(Carkova, 1979)
\hat{y}	Regresijas novirze		(Pospelova, 2004)
Y_1	Skaitliski aprēķinātā (modelētā) parametra vērtība	cm, m	(Geske, 2001)
Y_2	Empīriski noteiktā (eksperimentā) parametra vērtība	cm, m	(Geske, 2001)
Y_i	rezultatīvā, jeb aprēķināmā (atkarīgā) skaitliskā vērtība	cm, m	(Pospelova, 2004)
$y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}$	skaitlisko vērtību variantes	cm, m	(Pospelova, 2004)

Apzīmējums	Skaidrojums	Mērvienības SI sistēmā	Piezīmes
z	Atlikuma novirze	cm, m	(Pospelova, 2004)
α	Nozīmības (būtiskuma) līmenis	skaitliska vērtība	(Čarkova, 1979)
θ	Ģenerālkopas korelācijas koeficients	bezdimensijas lielums	(Liepa I., 1974)
M_{eX}	Regresora mediāna	cm, m	4.4. tabula 72. lpp.
M_{eY}	Regresenta mediāna	cm, m	4.4. tabula 72. lpp.

Rezultāti

$v(z_{an})$	Brīvās fāzes šķidruma slāņa līmeņa atjaunošanās ātrums	$m \times h^{-1}$	4.3. attēls 70. lpp.
$v(z_{nw})$	Brīvās fāzes šķidruma un ūdes saskares virsmas līmeņa atjaunošanās ātrums	$m \times h^{-1}$	4.3. attēls 70. lpp.



ISBN 978-9984-45-367-5