

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

**BALTIJAS ARTĒZISKĀ BASEINA
HIDROĢEOLOĢISKĀ MODEĻA
KALIBRĀCIJA**

BAKALAURA DARBS

Autore: **Ilze Stankevica**

Stud.apl. is08349

Darba vadītājs: Dr. Phys. Jānis Virbulis

RĪGA 2011

ANOTĀCIJA

Modeļa kalibrācija ir būtiska hidroģeoloģiskā (pazemes ūdens plūsmu) modeļa izveides sastāvdaļa sistēmā, kurā ir pieejamas ierobežotas zināšanas par ģeoloģisko slāņu robežām un materiālu filtrācijas īpašībām. Darbā tiek analizēti novērotie pjezometriskie ūdens līmeņi aptuveni 20 000 urbumos, veikta šo datu statistiska analīze un atlase, izveidotas mērķa funkcijas aprēķinu un novērojumu rezultātu salīdzināšanai, pētīta optimizācijas metodes pielietojamība modeļa kalibrācijai, kā arī analizētas pazemes ūdeņu filtrācijas plūsmas kalibrētajā modelī.

Atslēgvārdi:

Baltijas artēziskais baseins, hidroģeoloģiskais modelis, kalibrācija, mērķa funkcija, Darsī likums, matemātiskā modelēšana.

ABSTRACT

The calibration of a model is an essential part of the creation of a hydrogeological (groundwater flow) model inside a system with limited available knowledge about the boundaries of geological layers and the properties of material permeability. The observed pjezometric groundwater levels in approximately 20 000 wells, the statistic analysis of selected data, construction of target function, the comparision of calculated results, the suitness of the optimization method for the calibration of a model, as well as analysis of groundwater flows in the calibrated model, is reported here.

Keywords:

Baltic Artesian Basin, hydrogeological model, calibration, target function, Darcy's law, mathematical modelling.

SATURA RĀDĪTĀJS

Apzīmējumu saraksts	1
Ievads	3
1. Vēsturiskais apskats	5
2. BAB hidroģeoloģiskais modelis un tā ģeometrija	6
2.1. Ieskats BAB hidroģeoloģijā	6
2.2. Vispārīgs pazemes ūdens plūsmu modeļu iedalījums	7
2.3. BAB modeļa ģeometrija	8
3. Fizikālie likumi un skaitliskās metodes BAB modelī	10
3.1. Darsī likums	10
3.2. Skaitliskā modeļa atrisinājuma iegūšana	11
4. Kalibrācijas metodika	13
4.1. Parametru nenoteiktība	13
4.2. Kalibrācija un nelineārā regresija	14
4.3. Mērķa funkcijas konstruēšana	15
4.4. Mērķa funkcijas minimuma meklēšana	17
5. Kalibrācijas rezultāti	19
5.1. Standarta aprēķina rezultāti pirms kalibrācijas	19
5.2. Svaru ieviešanas nepieciešamība	23
5.3. Standarta aprēķina rezultāti pēc kalibrācijas	26
5.4. Svaru maiņas ietekme uz kalibrācijas aprēķinu rezultātiem	31
5.5. Citi kalibrācijas aprēķinu rezultāti	32
5.6. Galīgo elementu režģa maiņas ietekme uz kalibrācijas aprēķinu rezultātiem	33
6. Secinājumi	41
Pateicības	42
Izmantotā literatūra	43
1. Pielikums. BAB modelī iekļautie ģeoloģiskie slāņi	45
2. Pielikums. Visoptimālākie hidrauliskās vadītspējas koeficienti	46

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

Latīņu alfabēta burti:

b - apgrieztais punktu blīvums

D_{km} - attālums starp k-to un m-to urbumu

f - nelineārās regresijas funkcija

$F(x)$ - daudzargumentu funkcija

g - brīvās krišanas paātrinājums

G - daudzargumentu funkcijas gradients

h - pjezometriskais ūdens līmenis

h^f - urbuma filtra augstums

h^{mod} - modelētais pjezometriskais ūdens līmenis

h^{nov} - novērotais pjezometriskais ūdens līmenis

H - Hesa matrica

i - hidrauliskais gradients

K - hidrauliskā vadītspēja

K_h - hidrauliskās vadītspējas horizontāla komponente

K_v - hidrauliskās vadītspējas vertikālā komponente

M - mērķa funkcija

p - iterācijas meklēšanas virziens

P - spiediens

q_V - ūdens ieguves avotu tilpuma blīvums

Q - caurplūdums

R_{dec} - telpas dekrementis

s - nākamā atrisinājuma tuvinājuma solis

S - šķērsriezuma laukums

t - urbuma ierīkošanas gads

t_s - izvēlētais kalibrācijas gads

T_{dec} - laika dekrementis

v - filtrācijas plūsmas ātrums (Darsī ātrums jeb Darsī plūsma)

w - svāra koeficients

w^t - telpas svāra koeficients

w^l - laika svāra koeficients

w^s - slāņa svāra koeficients

Grieķu alfabēta burti:

α - koeficients iterācijas meklēšanas virzienam

ε - kļūda

$\Phi(\alpha)$ - vienargumenta funkcija

θ - regresijas koeficients

ρ - blīvums

Matemātiskie apzīmējumi:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} = \frac{d}{dl}$$

$$\sum_{i=1}^N i = 1 + 2 + \dots + N - 1 + N$$

e - Eilera skaitlis

IEVADS

Lai izpētītu dabā notiekošos procesus, ir nepieciešams veikt atkārtojamu eksperimentu. Taču globālu procesu gadījumos veikt praktiskus eksperimentus ir ļoti dārgs un sarežģīts pasākums, tāpēc plašu teritoriju aptverošu eksperimentu vietā daudz izdevīgāk un vienkāršāk ir izveidot pētāmās problēmas datormodeli.

Datormodelēšanas gaitā tiek izveidots modelis, kura mērķis ir ar maksimālu vienkāršību attēlot pētāmo parādību. Parasti modelī ietilpst vairāki parametri, kas nosaka, kā attīstīsies interesējošā parādība, taču ne vienmēr visi tās parametri ir labi zināmi un stingri definēti. Tādos gadījumos, lai sameklētu visoptimālākās nezināmo vai slikti zināmo parametru vērtības, tiek veikta modeļa kalibrācija. Kalibrācija ir darbība, kad, mainot modeļa parametrus, pētnieks cenšas iegūt vislabāko modeļa sakritību ar dabā novērotajiem datiem.

Baltijas artēziskā baseina (turpmāk tekstā BAB) hidroģeoloģiskais modelis aptver pazemes ūdens plūsmu matemātisko modelēšanu BAB tilpumā. BAB ir sarežģīta daudzslāņu hidroģeoloģiskā sistēma, kas pilnībā iekļauj Latvijas, Lietuvas, Igaunijas un daļu Polijas, Krievijas un Baltkrievijas teritorijas, kā arī lielu daļu Baltijas jūras. To raksturo nokrišņu infiltrācija un ģeoloģisko slāņu horizontālie un vertikālie vadītspējas koeficienti, kas nosaka to, kā pazemes ūdens plūsmas pārvietojas BAB apgabalā.

BAB modeļa sākotnējās (nulltās) versijas, kas izveidota Eiropas sociālā fonda (ESF) projekta "Starpnozaru zinātnieku grupas un modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem" ietvaros, ģeometrija ir uzbūvēta no slāņveida trīsdimensionāla galīgo elementu režģa, kas ir balstīts uz divdimensionāla trijstūru režģa. Režģa izveide notiek ar unikālu šim modelim rakstīta ģenerējošā skripta palīdzību, kas ir sadalīts kompleksos atsevišķu daļu veidojošos moduļos, kurus ir iespējams papildināt vai uzlabot, kā arī nepieciešamības gadījumā ieviest jaunus ar jau esošo skriptu saderīgus moduļus. Modeļa ģeoloģiskā struktūra sastāv no 24 slāņiem, sākot no vecākā kembrija ģeoloģisko nogulumu slāņa līdz augšējam kvartāra nogulumu slānim. Plūsmu modelēšanai BAB modeļa ietvaros tiek izmantots empīriskais Darsī likums, kuru, izsakot katrā modeļa režģa punktā, iespējams iegūt lineāru vienādojumu sistēmu, ko atrisina ar tiešo risināšanas metodi.

Šajā darbā tiek atspoguļota BAB hidroģeoloģiskā modeļa kalibrācija ar mērķi atrast visoptimālākos modelī iebūvēto ģeoloģisko slāņu vadītspējas koeficientus, lai dabā novērotie pazemes ūdens līmeņi sakristu ar aprēķinātajiem ūdens līmeņiem katrā ģeoloģiskajā slānī.

Bakalaura darba izstrādes gaitā tiek veikta inversā modelēšana jeb automātiskā kalibrācija, lai noteiktu visoptimālākos modeļa parametrus. Inversā modelēšana no parastas modelēšanas atšķiras ar to, ka šajā gadījumā, izmantojot iegūto modeļa atrisinājumu, tiek meklēti modeļa

parametri, nevis otrādi. Lai veiktu automātisko kalibrāciju, tiek ieviesta mērķa funkcija, kas raksturo aprēķinu novirzi no dabā novērotajiem datiem, līdz ar to vislabāk kalibrētajam modelim mērķa funkcija būs vismazākā, kas atbilst mērķa funkcijas minimuma meklēšanai pēc mazāko kvadrātu metodes.

Lai sasniegtu šo mērķi, tiek izvirzīti vairāki uzdevumi, kuri jāpaveic ar jau iepriekš izstrādāto BAB modeļa nullto versiju:

- 1) attīstīt modeli ģenerējošo skriptu, to pielāgot un labot;
- 2) uzlabot modeļa ģeometriju;
- 3) kalibrācijas gaitā iegūt labāko iespējamo rezultātu;
- 4) analizēt iegūtos rezultātus.

Darba 1. nodaļā ir dots īss ieskats hidroģeoloģijas un BAB modeļu izveides vēsturē. 2. nodaļā ir apskatīta BAB hidroģeoloģija un ģeometriskā modeļa izveide, bet 3. - izmantotie fizikālie likumi un skaitliskie modeļi. 4. nodaļā ir atspoguļots kalibrācijas matemātiskais apraksts, savukārt 5. nodaļā - praktiski iegūtie BAB modeļa kalibrācijas rezultāti. 6. nodaļā ir apkopoti secinājumi, un darba beigās ir sniegts izmantotās literatūras saraksts un 2 pielikumi.

1. VĒSTURISKAIS APSKATS

Viens no pirmajiem cilvēkiem, kas pētīja ūdens plūšanu iežos jeb pazemes ūdens plūsmas, bija francūzis Henrijs Filiberts Gaspards Darsī (*Henry Philibert Gaspard Darcy*). 1855. un 1856. gadā viņš veica eksperimentus ar smiltīm piepildītās caurulēs un atklāja likumu, kas tika nosaukts viņa vārdā (Darsī likums). Pēc Darsī likuma pazemes ūdens plūsmas ātrums ir vienāds ar hidrauliskās vadītspējas un hidrauliskā gradienta reizinājumu [1].

1940. gadā M.Kings Huberts (*M. King Hubbert*) ģeoloģijas žurnālā publicēja rakstu ar nosaukumu "Pazemes ūdeņu kustības teorija" (*The Theory of Ground-Water Motion*). Šajā rakstā ir dots ieskats pazemes ūdeņu modelēšanai nepieciešamajā matemātiskajā aparātā. Ņemot vērā dabiskos virsmas paaugstinājumos esošo ūdens potenciālo enerģiju, Huberts ieviesa korekciju Darsī likumā, kā rezultātā likums darbojas pareizi arī nehorizontālu plūsmu gadījumā. Huberta publicētajā darbā ir iekļauts attēls, kas ataino ideju par masas plūsmu makroskopiskā tilpuma elementā, ko ir viegli vispārināt uz skaitliska modeļa režģa. Tā kā datorizētas skaitļošanas iespējas tolaik vēl nebija pieejamas, pazemes ūdens plūsmu problēmas lielākoties tika risinātas grafiski, zīmējot plūsmu laukus [2].

Pirmos pazemes ūdens plūsmu datormodelēšanas izmēģinājuma rezultātus prezentēja gan Džons Gusva (*John Guswa*), gan Džordžs Pinders (*George Pinder*) 1986. gadā. Abi zinātnieki rezultātus ieguva ar IBM AT datoriem. Pindera izmantotā programmatūra bija viņa paša kopīgi ar studentiem izveidots kods Fortran programmēšanas valodā, savukārt Gusvas izmantotā programmatūra bija agrīna MODFLOW koda versija FTWORK, ko bija izveidojis Pīters Treskots (*Trescott*) 1976. gadā [3].

Mūsdienās ir pieejami daudzi un dažādi pazemes ūdens plūsmu modelēšanas rīki (sīkāk - izmantotās literatūras norādītajā avotā [4]). Visbiežāk izmantotais skaitliskais modelēšanas rīks ir MODFLOW - trīsdimensionāls modelis, ko izveidojis ASV Ģeoloģijas dienests (*U.S. Geological Survey*) (Makdonalds un Harbaugs (*McDonald and Harbaugh*), 1988. gadā). MODFLOW izmanto centrālo galīgo diferencu metodi ar ūdeni piesātinātiem apgabaliem [4].

BAB teritorijā agrāk veidotie hidroģeoloģiskie modeļi ir lokāla rakstura modeļi, kas galvenokārt noklāj atsevišķu valstu teritorijas vai to daļas (Polija, Igaunija, Latvija, Lietuva). Pazemes ūdens modeli Latvijas centrālās daļas, Ziemeļlietuvas un Rīgas jūras līča teritorijā 1996. gadā ir izveidojis Spalviņš. Modelis REMO (REgional MOdel "Large Riga") noklāj aptuveni 26 000 km² lielu platību un sastāv no 9 ģeoloģiskajiem slāņiem [5].

2. BAB HIDROĢEOLOĢISKAIS MODELIS UN TĀ ĢEOMETRIJA

2.1. Ieskats BAB hidroģeoloģijā

Artēziskais baseins pēc definīcijas ir sinklinālas vai monoklinālas uzbūves hidroģeoloģiska struktūra, ko parasti veido nogulumieži, kuros atrodas artēzisko ūdeņu horizonti. Artēzisko ūdeņu horizonts ir pazemes ūdens horizonts, kurā pjezometriskā līmeņa virsma paceļas augstāk par horizontu no augšas norobežojošā sprostslnāņa apakšējo malu [6].

BAB atrodas Austrumeiropas platformas rietumu daļā. Uz BAB ziemeļu un rietumu robežas nogulumiežu sega sastopas ar kristāliskajiem un metamorfajiem Baltijas hidroģeoloģiskā masīva pamatiežiem, uz dienvidrietumu robežas atrodas Dāņu-Poļu lūzumu zona, kur lūzumi iestiepjas pirmskembrija perioda platformā (nogulumiežu segas biezums var sasniegt 5000 m [7]), dienvidaustrumu robeža ir novilkta pa Baltkrievijas-Mazurskas anteklīzes centrālo daļu. Austrumos BAB robežojas ar Maskavas artēzisko baseinu, taču šī robeža ir fiktīva, jo Austrumeiropas platformai nav tāda ģeostuktūra, kas ļautu strikti nodalīt abus iepriekšminētos baseinus [8, c40]. BAB pilnībā aptver Igaunijas, Latvijas, Lietuvas un Kaļiņingradas apgabalu, kā arī nelielas teritorijas Krievijas un Baltkrievijas rietumos un Polijas ziemeļaustrumos (aizņemtā platība - 480 000 km² [7]) (2.1. att). Šajā teritorijā pazemes ūdeņu aprīte notiek vienotas sistēmas ietvaros [9].



2.1. att. Baltijas artēziskais baseins

BAB hidroģeoloģisko griezumumu veido ūdeni saturošu (vadošu slāņu) un ūdeni vāji caurlaidīgu (sprostslnāņu) slāņkopu mija. Ūdens daudzums, ko satur atsevišķi slāņi, un ūdens kvalitāte tajos ir visai atšķirīgi [10, 5. lpp].

Vadoties no ūdens apmaiņas intensitātes un ūdens ķīmiskā sastāva, artēziskā baseina griezumā var izdalīt trīs hidroģeoloģiskās zonas: aktīvas ūdens apmaiņas (saldūdeņu), palēninātas ūdens apmaiņas (sālūdeņu), lēnas ūdens apmaiņas jeb "stagnanto" ūdeņu (sālsūdeņu) zonas. Par robežu starp hidroģeoloģiskajām zonām tiek pieņemti pietiekami biezie sprostsplāņi, kas apgrūrina ūdens apmaiņu griezumā. Tomēr ūdens apmaiņa starp hidroģeoloģiskajām zonām notiek tektonisko lūzumu vietās [10, 7. lpp].

BAB ietilpst dažāda veida ūdens resursi: dzeramais ūdens, minerālūdeņi (galda un ārstnieciskie), rūpnieciskie un termālie ūdeņi. Piemēram, Latvijas teritorijā ir ne tikai bagātīgi dzeramā pazemes ūdens krājumi, bet arī visdažādākās kvalitātes minerālūdeņi. Ķemeros un atsevišķos citos iecirkņos ir sastopami balneoloģiskie sulfīdie ūdeņi. Visā Latvijas teritorijā artēziskā baseina griezuma vidus daļā izplatīti hlorīdu nātrija tipa galda minerālūdeņi. Artēziskā baseina gultnē izplatīti hlorīdu - nātrija tipa sālsūdeņi, kas, pateicoties lielam bromīdu saturam, ir izmantojami balneoloģijā un kā rūpnieciskie minerālūdeņi. Bez tam Liepājas, Jelgavas un Dobeles novados sālsūdeņiem ir raksturīga augsta temperatūra, kas ļauj iegūt siltuma enerģiju [10, 23. - 24. lpp].

2.2. Vispārīgs pazemes ūdens plūsmu modeļu iedalījums

Lai izveidotu pazemes ūdens plūsmu modeli, pētnieks vispirms sagatavo konceptuālo modeli, kurā tiek apkopoti tie fizikālie (un vajadzības gadījumā ķīmiskie procesi), kas norisinās pētāmajā sistēmā. Pēc tam konceptuālais modelis tiek pārveidots matemātiskās izteiksmēs, kā rezultātā tiek iegūts matemātiskais modelis, kas sastāv no viena vai vairākiem parciāldiferenciālvienādojumiem un papildu nosacījumiem. Ja minētos vienādojumus risina, izmantojot skaitliskās metodes, parciāldiferenciālvienādojumu, papildu nosacījumu un skaitlisko metožu kopumu sauc par skaitlisko modeli. Ja skaitliskā modeļa realizēšanai tiek izmantots dators (kā parasti tiek darīts), tad attiecīgo datorprogrammu dēvē par datormodeli [11, p3].

Pazemes ūdens plūsmu matemātiskie modeļi var tikt iedalīti 5 kategorijās:

- 1) stacionāra piesātināta pazemes ūdens plūsma;
- 2) stacionāra nepiesātināta pazemes ūdens plūsma;
- 3) laikā mainīga piesātināta pazemes ūdens plūsma;
- 4) laikā mainīga nepiesātināta pazemes ūdens plūsma;
- 5) izšķīdušo vielu pārnese [11, p4].

No skaitlisko metožu veidiem pazemes ūdens plūsmu modelēšanā parasti tiek lietota galīgo diferencu metode (*finite difference method*) vai galīgo elementu metode (*finite element method*) [11, p9], ļoti reti - galīgo tilpumu metode (*finite volume method*).

BAB hidroģeoloģiskais datormodelis ir stacionāras nepiesātinātas pazemes ūdens plūsmas

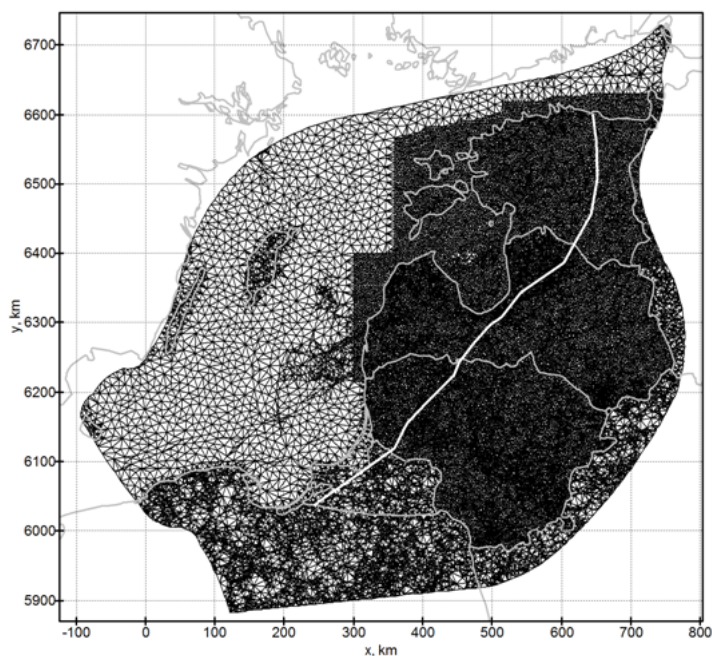
matemātiskais modelis, kura atrisinājumu iegūst, izmantojot galīgo elementu metodi.

2.3. BAB modeļa ģeometrija

BAB ģeometriskā modeļa izveidē ir izmantota plaši pieejamā ģeoloģiskā informācija:

- 1) Latvijas un Lietuvas ģeoloģisko slāņu augstuma atzīmju izolīniju kartes;
- 2) Latvijas un Lietuvas zemkvartāra nogulumu kartes;
- 3) baseina virsmas lūzumu līniju kartes;
- 4) stratigrāfiskā informācija no Latvijā esošajiem urbumiem (vairāk nekā 20 000);
- 5) slāņi no Igaunijas hidroģeoloģiskā modeļa;
- 6) Zemes topogrāfija;
- 7) Baltijas jūras dziļums;
- 8) informācija no publicētajiem ģeoloģiskajiem griezumiem, grāmatām un citiem avotiem [7].

BAB modeļa ģeometriskais tilpuma režģis ir balstīts uz divdimensionāla trijstūru režģa (pamata režģa), kurā atspoguļojas tā izveidē izmantotās līnijas (upes, valstu robežas, slāņu izplatības apgabali u.c. līnijas), kas ir nepieciešamas tilpuma modeļa izveidei [7], piemēram, 2.2. attēlā redzamās pelēkās līnijas attēlo valstu kontūras, bet gaišā līnija - kādu no šķērsgriezumiem.



2.2. att. Baltijas artēziskā baseina pamata režģis

Tilpuma režģa izveides laikā modelī tiek iebūvēti 24 slāņi (1. pielikums), tādēļ trīsdimensionālajā ģeometriskajā modelī galvenokārt ietilpst viena virs otras izvietotas trijstūru prizmas, kuru pamatus definē modelī iekļauto ģeoloģisko slāņu virsmas. Ir jāņem vērā, ka daži ģeolo-

ġiskie slāņi nav sastopami visā BAB apgabalā (tiem ir robežas līnija), kā arī lūzumu esamība, tāpēc tilpuma režģi pie attiecīgajām līnijām veido piramīdas un tetraedri [7].

Ģeometriskais modelis tiek izveidots jeb ģenerēts ar unikālu, īpaši šim modelim ESF projekta ietvaros radīta skripta palīdzību. Skripts sastāv no aptuveni 40 sīkām palīgprogrammām, kas veic, piemēram, lūzumu līniju informācijas piemērošanu pamata režģa izveidei, trijstūru režģa izveidi ar konkrētiem parametriem kādas uzdotas līnijas ierobežotā apgabala iekšienē, darbības ar slāņu augstuma atzīmes saturošajām *.z datnēm, pieprasījumus urbumu datubāzei, ekstrapolāciju, interpolāciju, kā arī citas modeļa izveidei nepieciešamās darbības.

BAB hidroģeoloģiskā modeļa nulltajā versijā ESF projekta ietvaros ir izveidoti vairāki modelim nepieciešamie skripta moduļu bloki:

- 1) vispārīgais modulis, kurā modeļa lietotājs nosaka, kurus moduļus izmantot (gen.py);
- 2) slāņu virsmas ģenerējošie moduļi (topo.py, PR_AR.py, Cm.py u.c.);
- 3) modeļa uzstādījumu moduļi - nosaka robežnosacījumus, infiltrāciju, materiālu vadītspējas koeficientus utt., kā arī kalibrējošais modulis (robeznosacijumi.py, kalibration.py u.c.);
- 4) palīgmodulis, kurā ir izveidotas funkcijas, kas apvieno vienu vai vairākas biežāk izmantotās palīgprogrammu kombinācijas, kā arī citi dažādām papildu darbībām nepieciešami palīgmoduļi (Definīcijas.py, Shortcuts.py u.c.);

Autores ieguldījums modeļa ģeometrijas uzlabošanā un skripta attīstībā:

- uzlabota topoloģiskā virsma - tiek precīzi definēta jūras/sauszemes robeža;
- iespēja pamata režģī iekļaut monitoringa vai citu urbumu punktus;
- izveidots papildu modulis (XYZStats.py) informācijas atlasīšanai un pielāgošanai no monitoringa urbumiem, kā arī iespēja atlasītos datus aplūkot grafīku veidā.

3. FIZIKĀLIE LIKUMI UN SKAITLISKĀS METODES BAB MODELĪ

3.1. Darsī likums

Darsī likums ir empīrisks likums, kas nosaka šķidrums plūsmu porainā vidē [12], un tas ir pielietojams tikai makroskopiskā mērogā. Šis likums definē, ka plūsmas ātrums porainā vidē ir proporcionāls pjezometriskā ūdens līmeņa (pjezometriskais ūdens līmenis ģeometriskā modeļa punktā ir līmenis, kas butu novērojams, ja perpendikulāri BAB modeļa virsmai tiktu izveidots urbums līdz attiecīgajam punktam) izmaiņai un apgriezti proporcionāls šķidrums tecēšanas ceļa garumam:

$$v = K \frac{dh}{dl}, \quad (1)$$

kur $v = \frac{Q}{S}$ - īpatnējais plūsmas ātrums (Darsī ātrums jeb Darsī plūsma) (m/s);

Q - caurplūdums (garums³/laiks);

S - šķērsriezuma laukums perpendikulāri plūsmas virzienam (m²);

$dh = h_2 - h_1$ - pjezometriskā ūdens līmeņu starpība, kas mērīta punktos 1 un 2 (m);

dl - attālums starp punktiem 1 un 2 (m);

$\frac{dh}{dl} = i$ - hidrauliskais gradients (bezdimensionāls);

K - proporcionalitātes konstante jeb hidrauliskā vadītspēja (m/s) [13, p18].

Darsī likumu var pierakstīt arī šādā veidā [13, p18]:

$$Q = K \frac{dh}{dl} S. \quad (2)$$

No Darsī likuma izriet, ka:

- ja uz garuma vienību nav hidrauliskā gradienta, ūdens plūšana nenotiek;
- ja uz garuma vienību ir hidrauliskais gradients, ūdens plūdis no augsta h apgabala uz zema h apgabalu (pretēji gradienta virzienam);
- jo lielāks ir hidrauliskais gradients (pie viena un tā paša materiāla), jo lielāks plūsmas ātrums;
- šķidrums plūsmas ātrums, plūstot cauri dažādiem materiāliem vai arī viena un tā paša materiāla dažādos virzienos, var būt dažāds, pat ja hidrauliskie gradienti ir vienādi [12].

Darsī likums izpildās tikai laminārām plūsmām, kam pazemes plūsmas lielākoties arī atbilst. Izņēmuma gadījumi var būt ieži, kuru iekšienē ir lieli caurumi, kā arī vietas, kur pastāv liels hidrauliskais gradients, piemēram, intensīvas ūdens ņemšanas vietas tuvumā. Darsī likums neizpildās arī pie ļoti zemiem hidrauliskiem gradientiem, kā tas var būt blīvos māla slāņos, jo realitātē pie zemām i vērtībām sakarība $v(i)$ nav lineāra [13, p19].

Modelējot BAB, tiek pieņemts, ka Darsī likums izpildās visā artēziskā baseina tilpumā. Ūdens ņemšanas vietas tiek uzskatītas par punktveida avotiem, tāpēc šādas neprecizitātes ir niecīgas salīdzinājumā ar šobrīd iegūstamo modeļa izšķirtspēju un tās var neievērot.

3.2. Skaitliskā modeļa atrisinājuma iegūšana

Tā kā darba mērķis ir, kalibrējot BAB hidroģeoloģisko modeli, atrast visoptimālākos filtrācijas parametrus jeb hidrauliskās vadītspējas koeficientus, tad paša atrisinājuma iegūšanai tiks dots tikai neliels vispārīgs ieskats, nepievēršot uzmanību sīkākām detaļām. (Aprakstu par kalibrāciju un parametru nenoteiktības iemesliem skatīt 4. nodaļā.)

BAB ir noslēgta sistēma, tāpēc šajā gadījumā ir jāaplūko šķidrums ar brīvu virsmu [7], līdz ar to modelī ir iespējami gan ūdens piesātināti, gan ūdens nepiesātināti apgabali. Robežšķirtne starp šiem apgabaliem raksturo pjezometriskā ūdens līmeņa augstumu.

Stacionāras nepiesātinātas pazemes ūdens plūsmas gadījumā filtrācijas vienādojumu iegūst, tiecinot diverģenci no Darsī ātruma izteiksmes (1) uz nulli [11, p4]:

$$\nabla (K \nabla h) = 0. \quad (3)$$

BAB modelī tiek izmantoti gan 1. veida robežnosacījumi (uzdots pjezometriskais ūdens līmenis h):

- apgabalos zem ūdenstilpnēm h vienāds ar ūdenstilpnes līmeni;
- h ir vienāds ar gruntsūdeņu virsmu, kas aprēķinu gaitā nav zināma un ir jāiegūst,

gan 2. veida robežnosacījumi (uzdota filtrācijas plūsma v):

- uz necaur laidīgās apakšējās robežas filtrācijas plūsma ir vienāda ar nulli;
- ūdensbalance uz virsmas;
- uz BAB ģeogrāfiskā izplatījuma robežas (2.1. attēlā redzamā sarkanā līnija) tiek pieņemts, ka ūdensapmaiņa nenotiek un v ir vienāds ar nulli.

No BAB tiek ņemts ūdens dažādām vajadzībām, tāpēc tā izmantošana tiek iekļauta filtrācijas vienādojumā kā avotu tilpuma blīvums q_V (caurplūdums laika vienībā uz tilpuma vienību (laiks/garums³)):

$$\nabla (K \nabla h) = -q_V. \quad (4)$$

q_V ir negatīvs, ja ūdens daudzums pieaug, pozitīvs, ja - samazinās, piemēram, notiek ūdens atsūkšanās.

Hidrauliskā vadītspēja K , kas tiek dalīta horizontālajā un vertikālajā komponentē, katrā no 1. pielikumā minētajiem 24 slāņiem tiek uzskatīta par konstantu. Kvartāra filtrācijas īpašības

tiek noteiktas no datubāzē pieejamo ģeoloģisko urbumu informācijas [7].

Pjezometrisko ūdens līmeņu sadalījumu h iegūst, 2.3. apakšnodaļā minētajam BAB ģeometriskajam trīsdimensionālajam tilpuma režģim pielietojot galīgo elementu metodi. Metodes izmantošanas gaitu var sadalīt vairākos soļos.

Pirmajā solī tiek noteiktas ģeometrisko režģi veidojošo elementu īpašības un tās apkopojšie dati. Katram elementam tiek uzdotas tajā ietilpstošo punktu koordinātes (šajā gadījumā punkti atbilst figūru virsotnēm) un punktu savstarpējās saistības, kā arī tiek piešķirts īpašs identifikācijas numurs. Kad īpašības globālajās koordinātēs ir noteiktas, var izveidot nezināmo koeficientu matricu, kur nezināmais koeficients raksturo atbilstošajā punktā nezināmo meklējamo lielumu [14, p12], kas šajā gadījumā ir pjezometriskais ūdens līmenis h .

Otrais solis ir gala vienādojumu sistēmas izveidošana, sasummējot kopā katram elementam atbilstošo nezināmo koeficientu matricu vienā kopējā globālā matricā. Iegūtā globālā matrica ir simetriska un daudzi tās elementi ir vienādi ar nulli [14, p13], tāpēc BAB modeļa gadījumā datorprogramma glabā matricas nenulles komponentes un saistību matricu.

Trešajā solī veic robežnosacījumu ievietošanu iepriekš minētajā matricā [14, p13].

Pēdējā solī tiek atrisināta vienādojumu sistēma. To var paveikt ar dažādām lineāru algebrisku vienādojumu sistēmu risināšanas metodēm [14, p13]. BAB modeļa gadījumā tiek izmantota tiešā metode LU faktorizācija ar vadošo elementu izdalīšanu (*LU factorization with complete pivoting*).

Aprēķinu rezultāts ir pjezometriskais ūdens līmenis katrā režģa punktā katrā slānī (pjezometriskā ūdens līmeņa lauks). Galīgo elementu metodes lineārās interpolācijas funkcijas nodrošina to, ka h ir iespējams noteikt jebkurā BAB apgabala iekšienes punktā, jo h katra elementa ietvaros mainās pēc interpolācijas funkciju noteiktajām lineārajām sakarībām.

Kad ir noteikts pjezometriskā ūdens līmeņa lauks, vienādojumā (1) ievietojot zināmās h sakarības, tiek iegūts trīsdimensionāls pazemes ūdens plūsmu ātrumu lauks. Tā kā katrā elementā h mainību definē lineāras sakarības, ∇h ir vektors ar konstantiem koeficientiem, līdz ar to pazemes ūdens plūsmas ātrums ir konstants katra galīgā elementa iekšienē un no elementa uz elementa mainās lēcienvēidīgi.

4. KALIBRĀCIJAS METODIKA

4.1. Parametru nenoteiktība

BAB hidroģeoloģiskā modeļa atrisinājums - pjezometrisko ūdens līmeņu un Darsī ātrumu lauki - tiek iegūts kādam konkrētam ģeometriskajam modelim pie noteiktiem ieejas parametriem. Tā kā modelis pēc būtības tiek veidots tā, lai tas dabā notiekošo situāciju attēlotu ar maksimālu vienkāršību, tad parasti starp iegūto atrisinājumu un dabā izdarītajiem mērījumiem ir vērojamas nesakritības.

Tās saistītas ar to, ka modeļa izveides gaitā ir izdarīti pieņēmumi, ka katram no slāņiem ir raksturīga tikai jau iepriekš minētā anizotropija jeb hidrauliskās vadītspējas dalīšana horizontālajā un vertikālajā komponentē, taču realitātē makroskopiskā mērogā var izpausties arī dažādas heterogēnas īpašības. Kā dažus heterogenitātes veidus var minēt materiāla graudu izmēra lieluma, porainības, mineroloģijas, litoloģiskās tekstūras, iežu mehānisko īpašību un uzbūves neviendabību. Visi nosauktie faktori izraisa hidrauliskās vadītspējas variācijas, un līdz ar to variācijas šķidrums plūsmā. Tāpēc, lai noteiktu vidējo ģeoloģiskajam slānim visatbilstošāko hidraulisko vadītspēju, tiek veikta modeļa kalibrācija [15].

Nesakritību analizēšanā ir jāņem vērā ne tikai paša modeļa aptuvenums, bet arī salīdzināmo datu neprecizitātes. BAB hidroģeoloģiskā modeļa atrisinājums tiek salīdzināts ar vairāk nekā 20 000 datu bāzē esošo urbumu ierīkošanas laikā nomērītajiem pjezometriskajiem ūdens līmeņiem, kur mērījumi ir izdarīti, sākot no 1913. gada, tāpēc, analizējot rezultātus, nedrīkst aizmirst par gan sezonālām, gan vēsturiskām ūdens līmeņu izmaiņām, par kurām vēsta secīgi un bieži izdarīti novērojumi dažos simtos monitoringa urbumos, kā arī jāņem vērā, ka novērotie līmeņi tiek pierakstīti ar noteiktu precizitāti un reizēm arī kļūdaini.

BAB modelī kā parametrs tiek uzdota arī infiltrācija uz zemes virsmas, kas ir atkarīga no meteoroloģiskajiem apstākļiem, taču dabā laika apstākļiem pēc būtības ir stohastisks raksturs (gadījuma procesi, kurus principā nevar iepriekš paredzēt ar absolūtu precizitāti), tāpēc sākotnējā uzdotā infiltrācijas vērtība ir 20 mm no Latvijā vidēji gadā izkritošajiem 600 - 700 mm nokrišņiem, un tā ir noskaidrota, veicot dažus pārbaudes aprēķinus. Lai gan dabā infiltrējas daudz lielāka daļa no izkritušajiem nokrišņiem, uzdotie 20 mm raksturo to nokrišņu daudzumu, kas infiltrējas baseina dziļākajos slāņos. Pārējā zemē iesūkusies nokrišņu daļa iztvaiko caur augiem (evapotranspirācija) vai reljefa sīksturktūras dēļ izplūst virszemē. Līdz ar to infiltrācijas koeficienta vērtība ir tuvināta un arī precizējama, veicot kalibrāciju.

4.2. Kalibrācija un nelineārā regresija

Parametru nenoteiktības dēļ pazemes ūdeņu modelēšanā kalibrāciju jāuzskata par vienu no modeļa izstrādes soļiem un to nevar nodalīt atsevišķi, kā tas reizēm tiek darīts citās nozarēs [16].

Klasiskajā kalibrācijā tiek veikta statistiski nenoteiktā mainīgā y regresijas analīze uz bezklūdu mainīgo x noteikta daudzuma zināmos mērījumos [17]. Regresijas analīze ir statistisks rīks, lai izpētītu sakarību starp mainīgiem lielumiem, un vispārīgā gadījumā tā ir spējīga noteikt patvaļīgu skaitu mainīgos lielumus. Lai gan cilvēkiem ir ierobežotas iespējas iztēloties sakarības, kas saista vairāk nekā trīs dimensijas, matemātikai daudzdimensionāla regresijas analīze nerada nekādas problēmas. Ja ir jānosaka n nezināmi mainīgie, regresijas analīzes gaitā tiek sastādīts "hiperplaknes" vienādojums n -dimensionālā telpā tā, lai izpildītos kritērijs, kas nosaka vislabāko iespējamo atbilstību starp mainīgajiem [18]. BAB modeļa kalibrācijas gadījumā ir jānosaka 24 hidrauliskās vadītspējas koeficienti un infiltrācijas loceklis, kas nozīmē, ka meklējamās funkcijas dimensija $n = 25$, un ir paredzams, ka meklējamā sakarība ir nelineāra.

Nelinearitāte attiecas uz nezināmajiem parametriem nevis uz attiecību starp mērījumiem un vērtībām bez klūdām, un nelineāras regresijas modeli var pierakstīt formā:

$$y_i = f(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\theta}) + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

kur y_i ir meklējamo vērtību vektors;

f ir zināma funkcija no zināmo vērtību matricas $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ik})^T$ un nezināmo koeficientu vektora $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_k)^T$;

ε_i ir kļūdas loceklis ar gadījuma raksturu. Parasti tiek pieņemts, ka ε_i vidējā vērtība nav vienāda ar nulli [19].

Nezināmo koeficientu vektoru $\boldsymbol{\theta}$ iegūst, minimizējot kļūdu starp aprēķinātajiem un novērotajiem datiem. Visbiežāk izmantotais kritērijs ir kvadrātisko kļūdu summa:

$$\sum_{i=0}^N [y_i - f(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\theta})]^2. \quad (6)$$

Nelineārās regresijas koeficientu aprēķināšana ir iteratīvs process, kas jāveic, izmantojot optimizācijas metodes [18].

BAB gadījumā \mathbf{y} vektora elementiem atbilst modelētais pjezometriskais ūdens līmenis h^{mod} , \mathbf{x} matricas un $\boldsymbol{\theta}$ vektora reizinājuma elementiem atbilst novērotais pjezometriskais ūdens līmenis h^{nov} . Kļūda ε visos slāņos tiek uzskatīta par konstantu.

4.3. Mērķa funkcijas konstruēšana

Lai noteiktu, kāda izskatās zināmā funkcija f BAB gadījumā, izmanto hidroģeoloģijai raksturīgo inverso modelēšanu jeb automātisko kalibrāciju - procesu, kad no modelētajiem aprēķiniem un novērojumu datiem tiek noteikti modeļa parametri [16].

Apskatot hidrauliskās vadītspējas koeficientu inverso modelēšanu, vienkāršības pēc uzskatīsim, ka ir dots vienslāņains pazemes plūsmas modelis, par kura parametriem nekas nav zināms. Vienīgais nezināmais ir hidrauliskās vadītspējas lauks K , un visi novērojumi N punktos raksturo pjezometrisko ūdens līmeni $h_1^{nov}, \dots, h_N^{nov}$. K noteikšanai formulē inverso problēmu [20] saskaņā ar (5) un (6):

$$M = \sum_{i=1}^N [h_i^{nov} - h_i^{mod}(K)]^2 = \varepsilon^2, \quad (7)$$

kur M ir mērķa funkcija.

Tālāk tiek veikta parametru zonēšana [20], kas BAB modeļa gadījumā izpaužas tā, ka katram slānim tiek piekārtots savs hidrauliskās vadītspējas koeficients, kas anizotropijas dēļ tiek dalīts vertikālajā un horizontālajā komponentē. Turklāt slāņu un citu faktoru ietekmi uz mērķa funkciju var regulēt ar svāra koeficientiem:

$$M = \sum_{i=1}^{N_s} \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} w_j [h_j^{nov} - h_j^{mod}(K_i)]^2, \quad (8)$$

kur N_s ir slāņu skaits;

indekss i raksturo i -to no 24 slāņiem;

indekss j raksturo j -to novērojuma punktu i -tajā slānī;

N_i ir novērojumu skaits attiecīgajā slānī i ;

w_j ir svāra koeficients, kas tiek piekārtots katram mērījumam. Vispārīgā gadījumā tas sastāv no $w_j = w_j^t w_j^l w_i^s$, kur w_j^t ir telpas svārs j -tajam mērījumam; w_j^l ir laika svārs j -tajam mērījumam; w_i^s ir slāņa svārs i -tajam slānim. Laika un telpas svāri ir nepieciešami, lai koriģētu starpību starp dažādos laika periodos novērotajiem ūdens līmeņiem, kā arī novērojumu punktu nevienmērīgo sadalījumu telpā, lielāku svāru piešķirot tiem punktiem, kuru tuvumā nav citu novērojumu punktu attiecīgajā slānī.

Svāri tiek aprēķināti pēc sakarībām:

Laika svārs:

$$w_j^l = e^{-\left(\frac{t_j - t_s}{T_{dec}}\right)^2}, \quad (9)$$

kur t_j ir j-tā urbuma ierīkošanas gads;

t_s ir izvēlētais kalibrācijas gads;

T_{dec} ir laika dekrementa, kas no izvēlēta gada nosaka intervālu, kurā laika svārstības ir e reizes (katram slānim var piekārtot atšķirīgu T_{dec});

Telpas svārstības, kas tiek rēķinātas katram slānim atsevišķi:

$$w_j^t = \frac{N_i}{\sum_{k=1}^{N_i} b_k} b_j$$

$$b_k = \frac{1}{\sum_{m=1}^{N_i} e^{-\left(\frac{D_{km}}{R_{dec}}\right)^2}}, \quad (10)$$

kur b_k raksturo apgriezto punktu blīvumu izvēlētajā rādiusa apkārtnē R_{dec} ;

R_{dec} raksturo rādiusu apkārtnē, kura iekšienē urbuma svārstības ir e reizes;

D_{km} ir attālums starp m-to un k-to urbumu.

Šajā gadījumā funkcija $f = h_i^{nov}$, un tajā neietilpst nelineārās regresijas koeficienti θ , jo modelēto pazemes pjezometrisko ūdens līmeni h_i^{mod} nav iespējams raksturot ar analītisku sakarību un koeficientiem. h^{mod} tiek iegūts, atrisinot modelī iekļautos diferenciālvienādojumus kopā ar robežnosacījumiem, kas ir atkarīgi no hidrauliskajām vadītspējām K_i un uzdotās infiltrācijas, pie tam modelētais ūdens līmenis atbilst tikai vienai konkrētai modeļa ģeometrijai un vienam noteiktam hidrauliskās vadītspējas parametru vektoram K_i .

Tālākajā gaitā iespējams koriģēt mērķa funkciju, izmantojot zināšanas par BAB ģeoloģisko struktūru, ūdens ķīmisko sastāvu, tā fizikālajām īpašībām u.c. empīriskas vai vispārējas zināšanas. Piemēram, pamatojoties uz sadaļā 2.1. minēto ūdeņu iedalījumu artēziskajā baseinā, var ņemt vērā ūdens blīvuma izmaiņu tā sāļuma dēļ. Sālš ūdens ir blīvāks nekā saldūdens, tāpēc sāļa ūdens gadījumā ūdens staba augstums urbumā ir mazāks nekā saldūdenim, kura blīvums tiek pieņemts vienāds ar $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$. Jāpiebilst, ka ūdens blīvums netiek koriģēts aprēķinu gaitā, bet gan tikai mērķa funkcijas M aprēķināšanā:

$$M = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} w_j [P_j^{nov} \rho_i - P_j^{mod}(K_i)]^2, \quad (11)$$

kur ρ_i raksturo katram slānim koriģēto ūdens blīvumu. Pjezometriskā ūdens līmeņa h vietā šeit ir jāsalīdzina modelētais un novērotais spiediens P j-tajā urbumā. Spiedienu aprēķina pēc sakarības: $P_j = \rho_i g \Delta h_j$, kur $\Delta h_j = h_j - h_j^f$, kur h_j^f ir datubāzē atrodama urbuma filtra augstuma atzīme (filtrs ir vieta, kurā urbumā ieplūst ūdens); g - brīvās krišanas paātrinājums. Tā kā spiediens P tiek iegūts no ūdens līmeņa staba augstuma urbumā, vienkāršības labad arī turpmāk starpību mērķa funkcijā (11) sauksim par starpību starp pjezometriskajiem ūdens līmeņiem.

Automātiskās kalibrācijas mērķis ir noteikt "labāko" nezināmo parametru komplektu K_i . Lai to izdarītu, parametru vektors K_i tiek uzdots par mērķa funkcijas (8) vai (11) minimumu, kas noved pie minimizācijas problēmas [16].

4.4. Mērķa funkcijas minimuma meklēšana

BAB modeļa minimizācijas problēmas risināšanā tiek izmantota Kvaziņūtona minimizācijas metode ar ierobežotu atmiņu. Metodes pilnais nosaukums ir Kvaziņūtona L-BFGS minimizācija (*Quasi-Newton L-BFGS Minimisation with Limited Storage*), kuras nosaukums tiek veidots no vārdiem *Limited(L)-Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*(BFGS) [21].

Mūsu mērķis ir atrast globālo minimumu nepārtrauktai un divreiz atvasināmai daudzargumentu funkcijai $F(x) = F(x^1, \dots, x^N)$, kur N var būt patvaļīgi liels [21].

Klasiskajā Ņūtona minimizācijas metodē, ir jāizdara sākotnējais tuvinājums funkcijas F ekstrēma (minimuma) punktam $x_0 = (x_0^1, \dots, x_0^N)$. Par iterāciju skaitītāju ņemsim $k = 1$ un beigu nosacījumu - $\varepsilon > 0$ [21].

Ņūtona minimizācijas algoritma soļi:

- aprēķina funkcijas gradientu $G_{k-1} = \left(\frac{\partial F}{\partial x^1}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x^N} \right)$ punktā $x = x_{k-1}$;
- aprēķina Hesa matricu $H = \left\| \frac{\partial^2 F}{\partial x^i \partial x^j} \right\|_{x=x_{k-1}}$ punktā $x = x_{k-1}$;
- nosaka nākamās iterācijas meklēšanas virzienu: $p_k = -H^{-1}G_{k-1}$;
- minimizē vienargumenta funkciju $\Phi(\alpha) = F(x_{k-1} + \alpha p_k)$: $\Phi(\alpha_{min}) = \min_{\alpha} \Phi(\alpha)$;
- aprēķina nākamo atrisinājuma tuvinājumu: $x_k = x_{k-1} + s_k$, kur $s_k = \alpha_{min} p_k$;
- ja izpildās $|F(x_k)| < \varepsilon$, algoritms apstājas, ja ne - soļi tiek atkārtoti pie $k = k + 1$ [21].

Šī algoritma izmantošana kļūst apgrūtināta, ja Hesa matricu nav viegli noteikt skaitliski, tāpēc inverso Hesa matricu var aprēķināt ar skaitlisku tuvinājumu no iepriekšējās iterācijas - Kvaziņūtona minimizācijas metode [21]. Ja par minimizācijas algoritmu izmanto L-BFGS algoritmu (sīkāks apraksts atrodams izmantotās literatūras avotā 21), iegūst Kvaziņūtona L-BFGS minimizācijas algoritmu.

Piezīme par darba autores ieguldījumu mērķa funkcijas izveidē un skripta moduļa izstrādē: kalibrācijas skripta modulis (kalibration.py), kas iekļauj mērķa funkcijas definēšanu, aprēķināšanu un iteratīvu minimizēšanu ir izveidots ESF "Starptozaru zinātnieku grupas un modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem" projekta ietvaros. Darba autore veica moduļa testēšanu un atklāšanu, kā arī korekcijas mērķa funkcijas svaros, vadoties no fizikāliem apsvērumiem. Autore patstāvīgi veica dažādu ģeometrisko modeļu modifikāciju izveidi ar BAB modeļa skripta valodas palīdzību un kalibrācijas aprēķinu veikšanu, kā arī veica novērojumu datu laika atkarības izpēti. Kalibrācijas aprēķinu rezultātus ieguva un apstrādāja darba autore.

5. KALIBRĀCIJAS REZULTĀTI

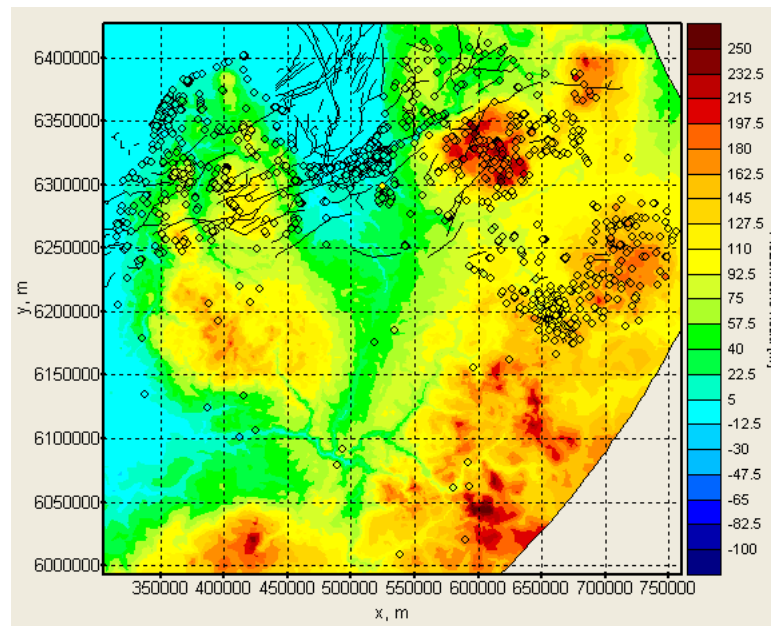
5.1. Standarta aprēķina rezultāti pirms kalibrācijas

Vispirms definēsim standarta aprēķinu. Standarta aprēķins ir tāds aprēķins, kas veikts pie nosacījumiem:

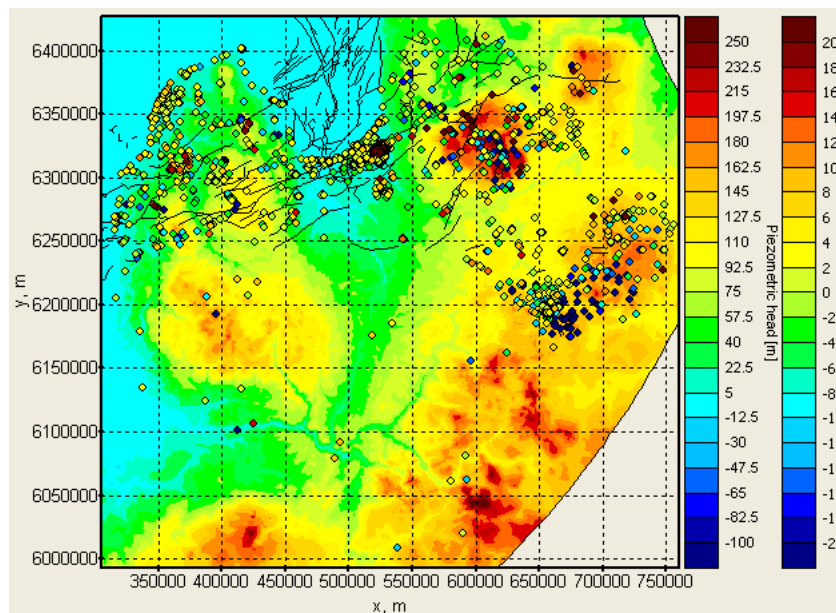
- izmantota tiek BAB modeļa nulltā versija ar tās parametriem un īpašībām;
- pamata režģī (2.2. att.) ir iekļauti Latvijas monitoringa urbumu punkti;
- kalibrācija notiek uz visiem datubāzē esošajiem Latvijas un Lietuvas urbumu ierīkošanas laikā datētajiem pjezometriskajiem ūdens līmeņiem (vairāk nekā 20 000 urbumiem), kā arī uz informāciju no monitoringa urbumu novērojumiem;
- kalibrācijā tiek izmantoti standarta svāra koeficienti ar standarta telpas dekrementu $R_{dec} = 1.5$ km un laika dekrementiem $T_{dec} = 15$ gadi, ja slāņa kārtas numurs ir mazāks par 19 (augšējie slāņi); $T_{dec} = 45$ gadi, ja slāņa kārtas numurs ir lielāks vai vienāds ar 19 (apakšējie slāņi);
- kalibrācijas aprēķinu veikšanas sākumā tiek ņemti hidrauliskās vadītspējas koeficienti, kas ir noteikti manuālas kalibrācijas ceļā, izmantojot dažus desmitus aprēķinu.

Aprēķinu rezultātus ir iespējams vizualizēt ar pazemes ūdeņu filtrācijas programmatūru HiFiGeo [22], kas ielasītos datus (šī darba ietvaros BAB modeļa apgabalu) attēlo LKS 92 koordinātu sistēmā. Šajā darbā no vairākiem vizualizācijas iespēju veidiem (aizpildījums, izolīnijas, punkti, skaitlisko vērtību uzraksti) modelētais pjezometriskā ūdens līmeņa lauks h tiek attēlots aizpildījuma veidā, bet novērotie pjezometriskie ūdens līmeņi urbumos un starpība starp modelēto un novēroto ūdens līmeni tiek attēlota punktu veidā (5.1. att. (uzskatāmības dēļ pietuvināts BAB apgabals, kurā atrodas novērojumu urbumi, t.i., Latvijas un Lietuvas teritorijas)). Attēlojot atšķirības starp ūdens līmeņiem, zilā krāsā apzīmē pārāk augstu modelēto pjezometrisko ūdens līmeni; sarkanā krāsā - pārāk zemu modelēto ūdens līmeni.

Līdzīgi kā 5.1. attēlā tas ir darīts kvartāra slānim, modelēto un novēroto ūdens līmeņu salīdzinājumu var veikt arī pārējiem 1. pielikumā minētajiem slāņiem, taču, lai iegūtu h sadalījuma kopskatu, ir derīgi aplūkot vertikālu BAB modeļa griezumumu pa kādu patvaļīgi novilkto līniju, piemēram, kādā no 5.1. attēla problemātiskajām vietām - Talsu (5.2. att.) tuvumā. 5.2. (b) attēlā ir redzams vertikālais griezumums pa 5.2. (a) attēlā redzamo melno līniju, bet 5.2. (c) attēlā uzskatāmības dēļ ir pietuvināts skats, kas atbilst 5.2. (a) attēlā redzamajai biežajai pelēkajai līnijai, kas ir daļa no līnijas AB. Vertikālajā griezumā uz x ass tiek atlikts attālums no griezuma sākumpunkta (5.2. attēlā vertikālā griezuma sākumpunkts ir (a) attēlā redzamais punkts A), savukārt uz y ass tiek attēlota vertikālā augstuma atzīme z , kur $z = 0$ atbilst jūras līmenim. Redzamās



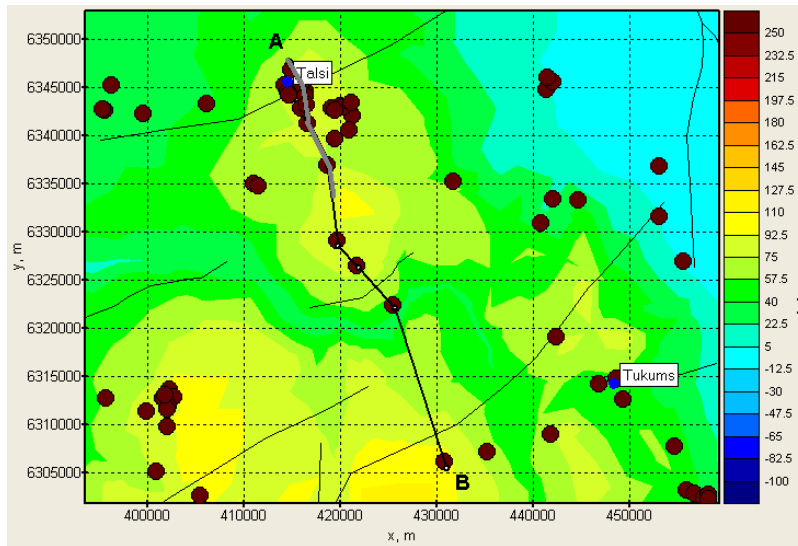
(a)



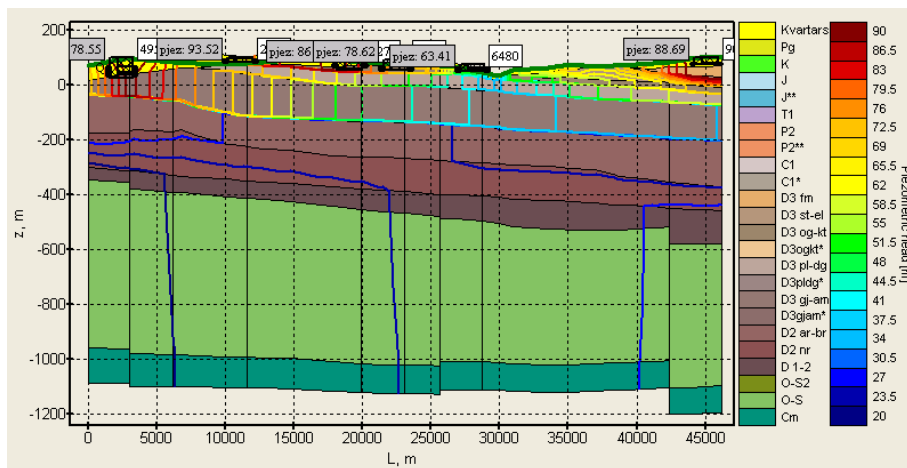
(b)

5.1. att. (a) modelētais pjezometrisko ūdens līmeņu sadalījums un novērotie pjezometriskie ūdens līmeņi urbumu punktos kvartāra nogulumu slānī pirms kalibrācijas; (b) modelētais pjezometrisko ūdens līmeņu sadalījums (skala pa kreisi) un atšķirības starp modelēto un novēroto ūdens līmeni (skala pa labi) kvartāra nogulumu slānī pirms kalibrācijas

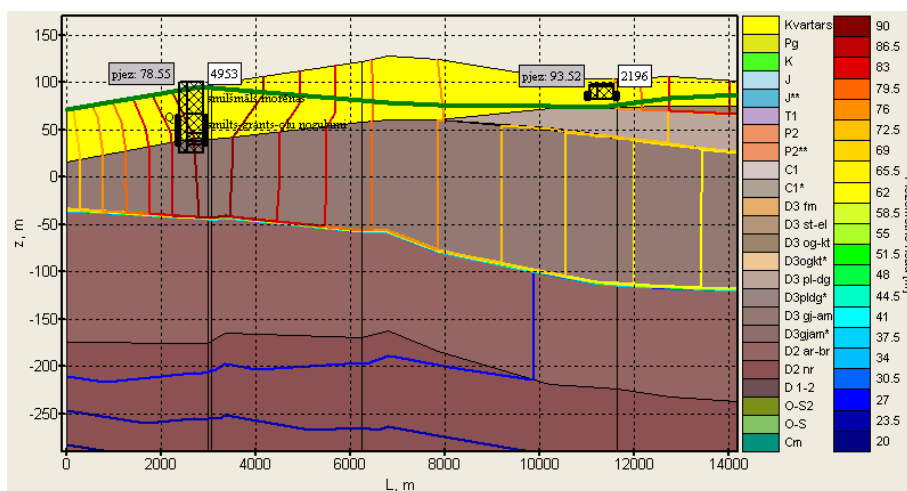
aizpildījuma krāsas atbilst 1. pielikumā norādītajām slāņu krāsām, bet līnijas ir pjezometriskā ūdens līmeņa izolīnijas. Biezā zaļā līkne ir depresijas līkne jeb modelētā ūdens līmeņa augstums. Urbumi tiek attēloti ar melnu taisnstūri, projicējot tos uz griezuma plakni līdz 120 metru attālumam no griezuma līknes, tāpēc vertikālajā griezumā attēlotais urbuma augstums var precīzi nesakrist ar modeļa virsmas augstumu. Pie urbuma esošajā baltajā taisnstūrī ir dots urbuma numurs, pelēkā - novērotais ūdens līmeņa augstums.



(a)



(b)



(c)

5.2. att. (a) caur kvartāra urbumiem (sarkanie punkti) novilkta vertikālā griezuma līnija AB Talsu tuvumā un līnijas AB daļa (pelēkā līnija); (b) pa līniju AB izdarītais vertikālais griezums Talsu tuvumā; (c) pa līnijas AB daļu (pelēkā līnija) izdarītais vertikālais griezums Talsu tuvumā

Vertikālajā griezumā var labi redzēt, kā pazemē izvietojas pjezometriskā ūdens līmeņa izolīnijas, un var ievērot, ka izolīnijas slāņos galvenokārt izkārtojas vertikāli vai horizontāli, turklāt īpaši daudz izolīniju izvietojas sprosts slāņos - D3 gj-am* un D3 pl-dg*. Tas apliecina to, ka sprosts slāņi ievērojami aizkavē vertikālu ūdensapmaiņu, tāpēc ūdens līmenis slāņos, kurus atdala sprosts slānis, var būt krasi atšķirīgs - šajā gadījumā, ja apskatītu urbumu D2 ar-br slānī, varētu novērot aptuveni 30 m augstu pjezometrisko ūdens līmeni virs 0 atzīmes jeb jūras līmeņa, taču, ja apskatītu urbumu D3 gj-am slānī, atkarībā no urbuma atrašanās vietas uz griezuma līnijas x ass varētu novērot aptuveni no 60 līdz 90 metru augstu pjezometrisko ūdens līmeni virs 0 atzīmes (5.2. att. (c)).

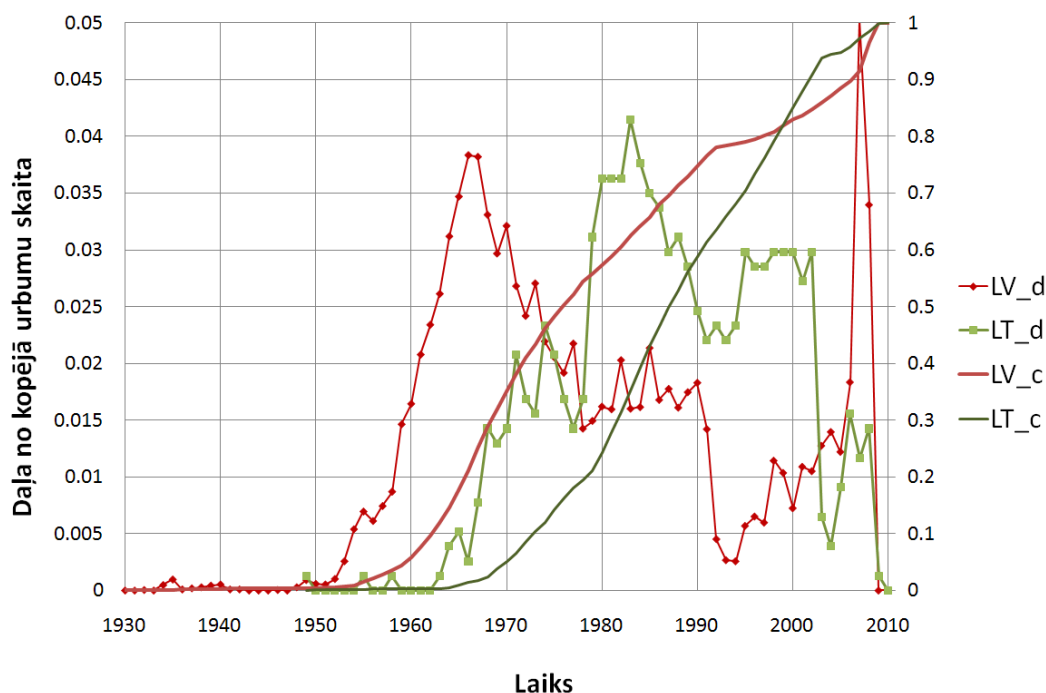
Apskatot 5.2. attēlu (b), ir redzams, ka augšējiem slāņiem, kas atrodas tuvāk zemes virsmai, piemēram, D3 gj-am un D3 pl-dg, ir raksturīgas arī vertikālas pjezometriskā ūdens līmeņa izolīnijas, no kā izriet, ka šo ģeoloģisko slāņu iekšienē pastāv horizontāls hidrauliskais gradients *i*. Ņemot vērā 3.1. apakšnodaļā izdarītos secinājumus no Darsī likuma - ja uz garuma vienību ir pielikts hidrauliskais gradients, tad ūdens plūdis no augsta (sarkanās izolīnijas) pjezometriskā ūdens līmeņa apgabala uz zema (zilās izolīnijas) pjezometriskā ūdens līmeņa apgabalu (pretēji gradienta virzienam) -, tad 5.2. attēlā (b) ir redzams, kā ūdens no augstāka virsmas pacēluma plūst uz vietu ar zemāku augstuma atzīmi perpendikulāri pjezometriskā ūdens līmeņa izolīnijām - veidojas augšējo slāņu (kvartāra, D3 pl-dg) ūdens atslodzes vietas, kas Talsu gadījumā atbilst Abavas upes ielejai (kas redzama 5.2. attēlā (b) koordinātēs (30000; 30)). Ja starp kvartāra noguluma slāņa un kāda cita 1. pielikumā minēta slāņa atrodas sprosts slānis, tad ūdens neizplūst virszemē un neveido upju noteci, bet gan veido filtrācijas plūsmas attiecīgā slāņa iekšienē, jo kā var pamanīt 5.2. (b) attēlā - izdarot vertikālo griezumumu pa līniju AB, nav iespējams pateikt, līdz kurienei pārvietojas ūdens, kas ieplūst D3 gj-am slānī (tā kā BAB ir noslēgta sistēma, ūdens plūsmas pārvietojas tikai BAB apgabala iekšienē un tā ārpusē neizplūst). Lai to noskaidrotu, būtu jāizdara cits vertikālais griezumums ar lielāku garumu L.

5.2. (c) attēlā ir redzams, ka novērotais pjezometriskais ūdens līmenis slikti sakrīt (ūdens līmeņu atšķirība urbamam Nr.4953 - 12 metri; Nr.2196 - 19 metri) ar to izolīniju norādīto līmeni, kur atrodas urbuma filtrs (sabiezinātās melnās līnijas uz urbumu attēlojošā taisnstūra kreisās un labās malas, kas norāda dziļumu, no kura urbumā ieplūst ūdens). Tāpēc ir pamats domāt, ka, precizējot slāņu hidrauliskās vadītspējas vai ģeometriju, varētu panākt labāku novērojumu un modelēto lielumu sakritību.

5.2. Svaru ieviešanas nepieciešamība

Lai varētu veikt efektīvāku hidraulisko vadītspēju precizēšanu jeb kalibrāciju, tiek ieviesti laika un telpas svāri, kas koriģē novērojumu datu nevienmērīgu sadalījumu laikā un telpā.

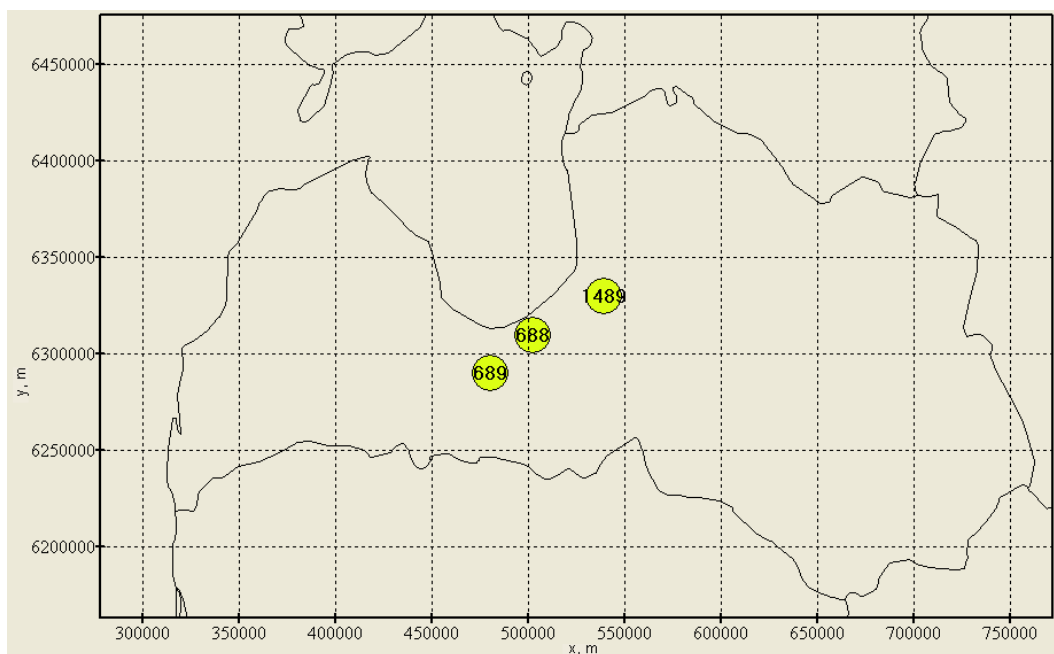
ESF projekta ietvaros izveidotajā urbumu datubāzē ir iekļauti urbumi, kuru ierīkošanas laika intervāls ir no 1913. līdz 2010. gadam, taču jāņem vērā, ka urbumu ierīkošana šajā laika posmā nav vienmērīgi sadalīta laikā, bet gan veido 5.3. attēlā redzamo sadalījumu (pirms 1930. gada datēti 4 urbumi: 1 - 1913. gadā; 2 - 1917. gadā; 1 - 1927. gadā).



5.3. att. Datubāzē esošo Latvijas (LV) un Lietuvas (LT) urbumu ierīkošanas laika sadalījumi (*_d) un attiecīgās kumulācijas līknes (*_c)

5.3. attēlā ir parādīti atsevišķi sadalījumi Latvijas un Lietuvas urbumiem, tāpēc jāņem vērā, ka Latvijas teritorijā ir ļoti daudz urbumu, kuru novērotais ūdens līmenis atbilst laika intervālam aptuveni no 1960. līdz 1990. gadam (kumulācijas līkne LV_c), savukārt Lietuvas teritorijā urbumu ierīkošanas laiks ir galvenokārt aptuveni no 1980. līdz 2003. gadam (kumulācijas līkne LT_c). Tā kā modeļa stacionārais atrisinājums tiek modelēts ar mērķi iegūt mūsdienā pjezometriskā ūdens līmeņa sadalījumu, tad ir jāņem vērā, ka ļoti liela daļa no datu bāzē esošajiem urbumiem var sniegt novecojušu informāciju, kas kalibrācijas gaitā ziņotu par neesošu kļūdu mūsdienām neatbilstoša pjezometriskā ūdens līmeņa dēļ.

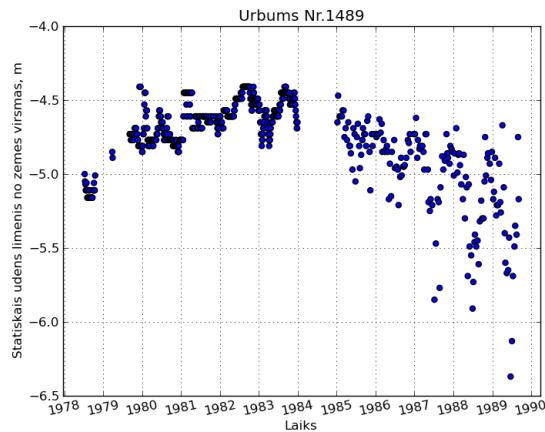
Lai novērtētu iepriekš minēto urbumu novērojumu līmeņu atbilstību mūsdienām, var izmantot uzkrātos datus no monitoringa urbumiem. Par piemēru varam apskatīt trīs monitoringa urbumus (5.4. att.), kuri atrodas dažādos ģeoloģiskajos slāņos un kuros ir atrodami dažāda tipa (sāļuma) ūdeņi.



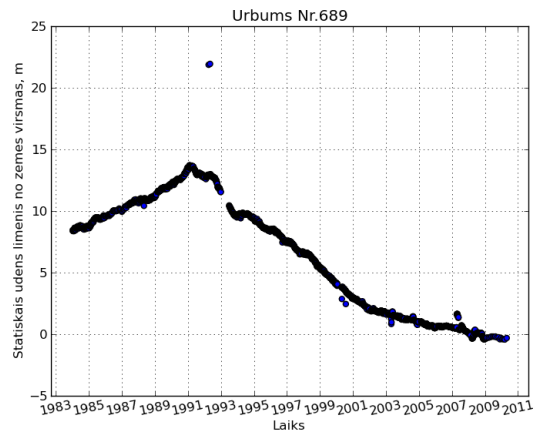
5.4. att. Monitoringa urbumu Nr.1489 (D 1-2), Nr.689 (D3 gj-am) un Nr. 688 (Kvartars) atrašanās vietas Latvijā

Kā redzams 5.5. attēlā - kaut arī monitoringa urbumi atrodas viens otram samērā tuvu (5.4. att.) - vienā un tajā pašā laika posmā tajos ir novērojamas atšķirīgas ūdens līmeņu izmaiņas tendences. Lai gan dati par dziļajiem slāņiem ir ļoti skopi, tomēr var pamanīt, ka 5.5. attēla (a) gadījumā ūdens izmaiņas ir ļoti nelielas (aptuveni 50 centimetri). Tas liecina par to, ka ūdens apmaiņa dziļajos slāņos notiek lēni. Vidēji dziļajā slāni D3 gj-am (5.5. att. (b)) ir novērojama ļoti izteikta pjezometriskā ūdens līmeņa atkarība no novērojuma izdarīšanas laika (līmeņu starpība aptuveni 12 metri), jo no šī slāņa tiek iegūts dzeramais ūdens. Savukārt kvartāra slānī (5.5. att. (c)) ūdens līmenis ievērojami svārstās pat viena gada ietvaros straujās ūdens apmaiņas dēļ, līdz ar to (īpaši 5.5. att. (b) gadījuma dēļ) ir nepieciešams ieviest eksponenciālu laika svaru w^l (9), kas regulētu katra novērojumu urbuma ietekmi uz kalibrācijas procesu atkarībā no novērojuma izdarīšanas laika. Jāpiebilst, ka šie apskatītie monitoringa urbumi raksturo tipisko situāciju katrā no BAB ūdeņu veidiem, un, pārbaudot monitoringa urbumu novērojumu datus, lielākajai daļai urbumu ūdens režīms sakrīt ar kādu no 5.5. attēlā redzamajiem trīs gadījumiem, taču dažos gadījumos ir atrodami arī urbumi, piemēram, jūras tuvumā, kuru ūdens režīms nesaskan ar tipiskajām attiecīgā slāņa monitoringa urbumu ūdens līmeņu izmaiņām. (Autore datu atlasī veica un 5.5. attēlus ieguva ar pašrakstīta moduļa XYZStats.py palīdzību.)

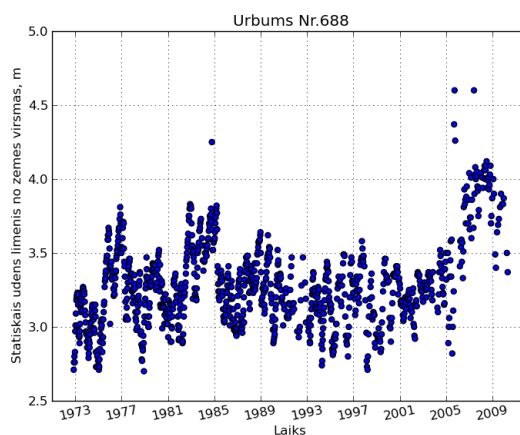
Ūdeņu apmaiņas ātruma atkarības no slāņa dziļuma dēļ ir nepieciešams koriģēt laika svaru katram no slāņu tipiem. Tādā veidā lēni mainīgajiem ūdeņiem dziļajos slāņos var pielietot laika dekrementu, kas ņem vērā ļoti plašā laika intervālā izdarītus mērījumus, jo ūdens izmaiņa laikā ir neliela, bet vidēji un strauji mainīgajiem ūdeņiem vidējos un augšējos slāņos var pielietot lai-



(a)



(b)



(c)

5.5. att. Monitoringa urbumā (a) 1489 (D 1-2); (b) 689 (D3 gj-am); (c) 688 (Kvartars) novērotie ūdens līmeņi no zemes virsmas

ka dekrementu, kas ņem vērā tikai mūsdienām (2000. gadam) tuvākos datus par novērotajiem ūdens līmeņiem, jo tie mūsdienu situāciju raksturo daudz precīzāk nekā novērojumu dati, kas iegūti dažus desmitus gadus iepriekš.

Bez neviendabībām laikā, ir vērojams arī datu nevienmērīgs sadalījums telpā, kas ir pamatnāms jau 5.1. attēlā kā nehomogēns urbumu izvietojums Lietuvas un Latvijas teritorijā. Ja apskatām tikai vienu kalibrācijas soli, kad tiek rēķināta sakritība kādā no novērojumu urbuma punktiem, tad BAB modeļa nulltajā versijā ir ņemts vērā tas, ka h novērojumi citos urbumos atrodas dažādos attālos no interesējošā punkta, tāpēc gadījumā, kad netiek pielietoti īpaši telpas svāri, tiek ņemts vērā tikai attālums starp interesējošā urbuma un cita urbuma punktiem, un jo lielāks ir attālums, jo attiecīgajam novērojumam no cita urbuma punkta uz modelēto pjeozmetrisko ūdens līmeni apskatītajā punktā ir mazāka ietekme. Tomēr ir iespējami gadījumi, ka ir apgabali, kuros ir veikti daudzi novērojumi salīdzinoši tuvu telpā ar skaitliski līdzīgiem rezultātiem, bet cituriet telpā var būt izdarīti tikai daži mērījumi. Ja mēs apskatām kādu no novērojumu urbu-

mu punktiem, kas atrodas pa vidu šādiem divu tipu apgabaliem - kur veikti daudzi novērojumi tuvu viens otram un kur veikti daži novērojumi, ir saprotams, ka visiem urbumiem uz apskatīto punktu ir vienāda ietekme un galvenokārt tiek ņemti vērā daudzi skaitliski līdzīgie rezultāti, līdz ar to tiek nomākti tie dati, kas vēsta par pjezometrisko ūdens līmeni apgabalos, kuros ir izdarīti nedaudzi mērījumi. Tā iemesla dēļ tiek ieviests telpas svars w^t ar noteiktu rādiusu (10). Rādiusa funkcionalitāte ir tāda, ka tā iekšienē tiek noteikts, cik blīvi attiecīgajā slānī ir izvietoti urbumi, un, ja ir veikti daudzi mērījumi salīdzinoši tuvu telpā (rādiusa ietvertā apgabala iekšienē), tad katrs urbums iegūst svaru, kas ir apgriezti proporcionāls urbumu blīvumam (10), tādā veidā katra urbuma svars vairs nav vienāds ar 1, bet gan var būt par to lielāks vai mazāks, attiecīgi no tā, kāda veida no iepriekšminētajiem apgabaliem tas atrodas. Ar telpas svara apkārtnes rādiusu R_{dec} var koriģēt meklējamā pjezometrisko ūdens līmeņu sadalījuma lauka gludumu.

Papildus laika un telpas svariem var ieviest arī katra slāņa īpašo svaru w^s , kas regulē to, cik ļoti mērķa funkcijā tiek ņemtas vērā katrā slānī esošās ūdens līmeņu neprecizitātes. Šis svars nesamazina vai nepalielina kļūdu (mērķa funkcija raksturo modelēto līmeņu kvadrātisko novirzi no novērotajiem līmeņiem (11)), taču var izmainīt mērķa funkcijas iterācijas meklēšanas virzienu un tā koeficientu.

5.3. Standarta aprēķina rezultāti pēc kalibrācijas

Kalibrācijas aprēķinu veikšanas laikā L-BFGS minimizācijas algoritms, lai sameklētu vislabāko sakritību starp modelētajiem un novērotajiem pjezometriskajiem ūdens līmeņiem, iterāciju gaitā ir izmainījis slāņu hidrauliskās vadītspējas koeficientus (5.1. tabula) (kalibrācijas metodika ir aprakstīta 4. nodaļā), un līdz ar to ir izmainījis arī modelētais pjezometrisko ūdens līmeņu lauks (5.6. att. un 5.7. att.).

5.1. tabulā ir redzams, kā pēc kalibrācijas aprēķinu veikšanas izmainās hidrauliskās vadītspējas koeficienti - katram slānim tiek piekārtots koeficients, ar kuru tiek pareizināta gan horizontālā, gan vertikālā hidrauliskās vadītspējas komponente, pie tam programma nosaka, ka koeficients var variēt robežās no 0.01 līdz 100.

Salīdzinot standarta aprēķina bez kalibrācijas (5.1. att.) un ar kalibrāciju (5.6. att.) pjezometriskā ūdens līmeņa sadalījuma vizualizācijas kvartāra slānim, ir redzams, ka modeļa atrisinājums pēc kalibrācijas ir mainījies. Tādā pašā veidā var pamanīt, ka h sadalījums ir mainījies ne tikai kvartāra slānī, bet arī visos pārējos 23 slāņos, kā arī, salīdzinot 5.2. (c) attēlu ar 5.7. attēlu, ir redzams, kā ūdens līmenis ir izmainījies iepriekš apskatītajā vertikālajā griezumā pie Talsiem - kvartāra slānī modelēto un novēroto ūdens līmeņu sakritība ir pasliktinājusies.

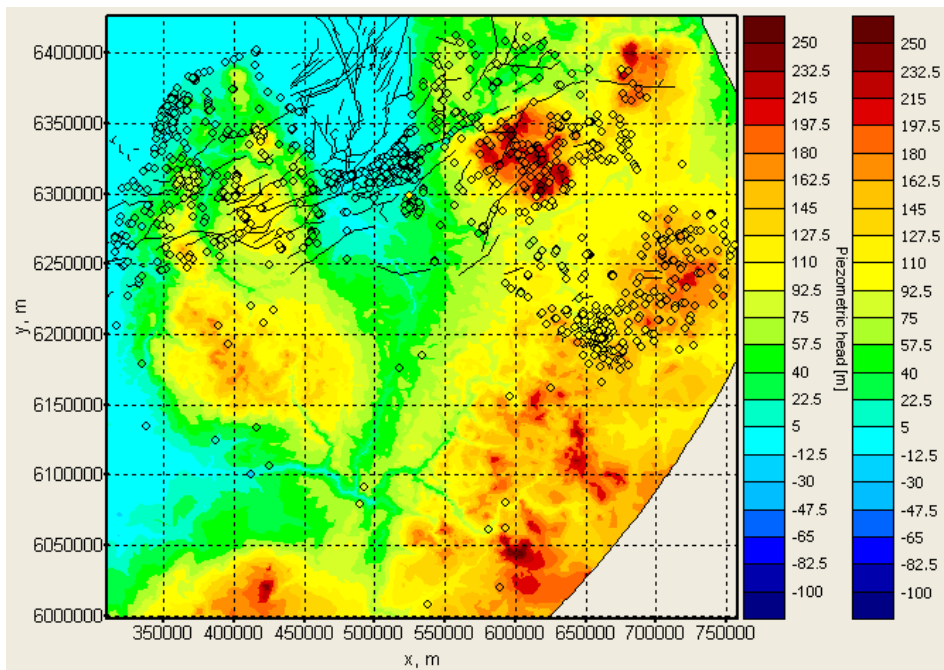
Lai varētu objektīvi novērtēt izmaiņu ietekmi uz atrisinājumu, apskata 2 grafikus: kopējās

Hidrauliskās vadītspējas koeficientu izmaiņas slāņos

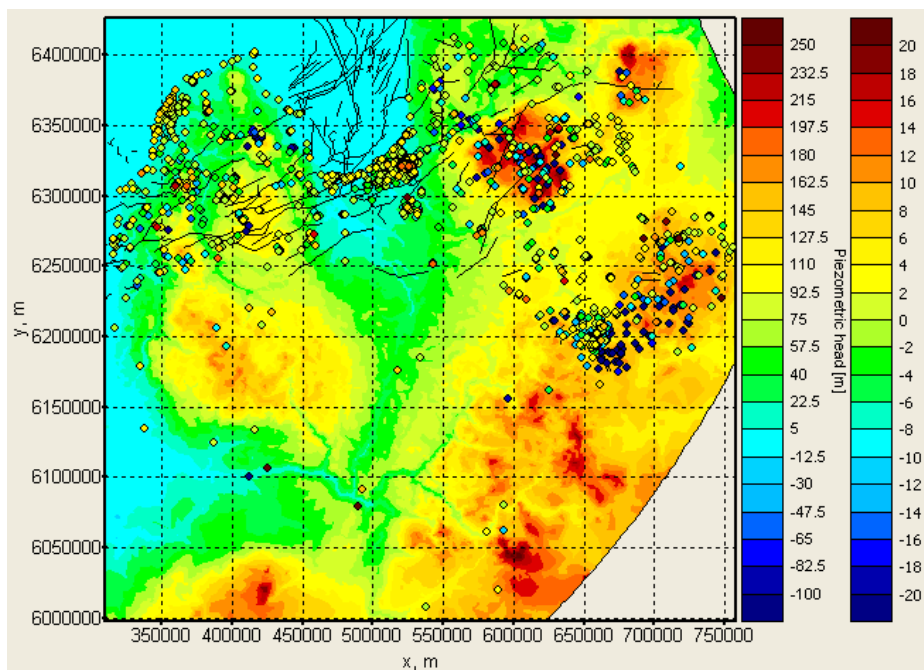
Nr.	Modeļa slānis	K_h , pirms	K_v , pirms	K_h , pēc	K_v , pēc
1	Kvartars	1	1	0.087	0.087
2	Pg	10	1	7.523	0.752
3	K	2	1	1.746	0.175
4	J	1E-05	1E-05	1.347E-04	1.347E-04
5	J**	10	1	7.244	0.724
6	T1	1E-04	1E-04	1.376E-04	1.376E-04
7	P2	2	0.2	2.613	0.261
8	P2**	1E-06	1E-06	1.395E-06	1.395E-06
9	C1	2	0.2	2.724	0.272
10	C1**	1E-04	1E-04	7.908E-05	7.908E-05
11	D3 fm	2	0.2	2.477	0.248
12	D3 st-el	1E-04	1E-04	7.124E-05	7.124E-05
13	D3 og-kt	1	0.1	0.542	0.054
14	D3ogkt*	1E-06	1E-06	4.320E-07	4.320E-07
15	D3 pl-dg	10	1	6.788	0.678
16	D3pldg*	1E-07	1E-07	5.960E-08	5.960E-08
17	D3 gj-am	2	0.2	2.000	0.200
18	D3gjam*	2E-07	2E-07	2.531E-07	2.531E-07
19	D2 ar-br	2	0.2	1.532	0.153
20	D2 nr	1E-09	1E-09	1.369E-09	1.369E-09
21	D 1-2	2	0.2	2.730	0.273
22	O-S2	2	0.2	1.527	0.153
23	O-S	1E-09	1E-09	7.516E-10	7.516E-10
24	Cm	1	0.5	1.563	0.782
25	infiltrācija	6.37E-05 mm/s		5.25E-04 mm/s	

mērķa funkcijas izmaiņas iterāciju gaitā (5.8. att.), kas vēsta to, par cik ir samazinājusies vidējā nesakritība starp modelētajiem un novērotajiem ūdens līmeņiem modeļa slāņos, un pēdējās labākās iterācijas mērķa funkcijas komponentes pa slāņiem (5.9. attēlā (skaitļi uz x ass atbilst slāņa kārtas numuram 1. pielikumā)), kas parāda, kāda ir vidējā h nesakritība katrā no slāņiem. Mērķa funkcijas komponentes pa slāņiem atbilst (11) iekšējai summai, un, saskaitot visas komponentes kopā, iegūst kopējo mērķa funkciju ((11) ārējā summa).

5.8. attēlā var redzēt, ka kopējā mērķa funkcijā ir raksturīgi lokāli plato 27 iterāciju garumā, kas ir saistīts ar optimizējamo modeļa parametru daudzumu. Pie tam šajā gadījumā apmēram pie 500 iterācijām iestājas mērķa funkcijas minimums ar tam raksturīgo "zobveida" izskatu, tāpēc turpmāko aprēķinu analīzes gaitā tiek pieņemts, ka, iestājoties raksturīgajam "zobveida" izmaiņām, nav sagaidāma turpmāka mērķa funkcijas samazināšanās un šajā brīdī modelis var tikt uzskatīts par nokalibrētu. Tā kā kopējās mērķa funkcijas fizikālā nozīme ir tāda, ka tā raksturo vidējo kvadrātisko kļūdu starp novērotajiem un aprēķinātajiem lielumiem, kas reinzināta ar kalibrācijā izmantoto slāņu skaitu, tad šajā gadījumā, kad, kā redzams 5.9. attēlā, ir veikta



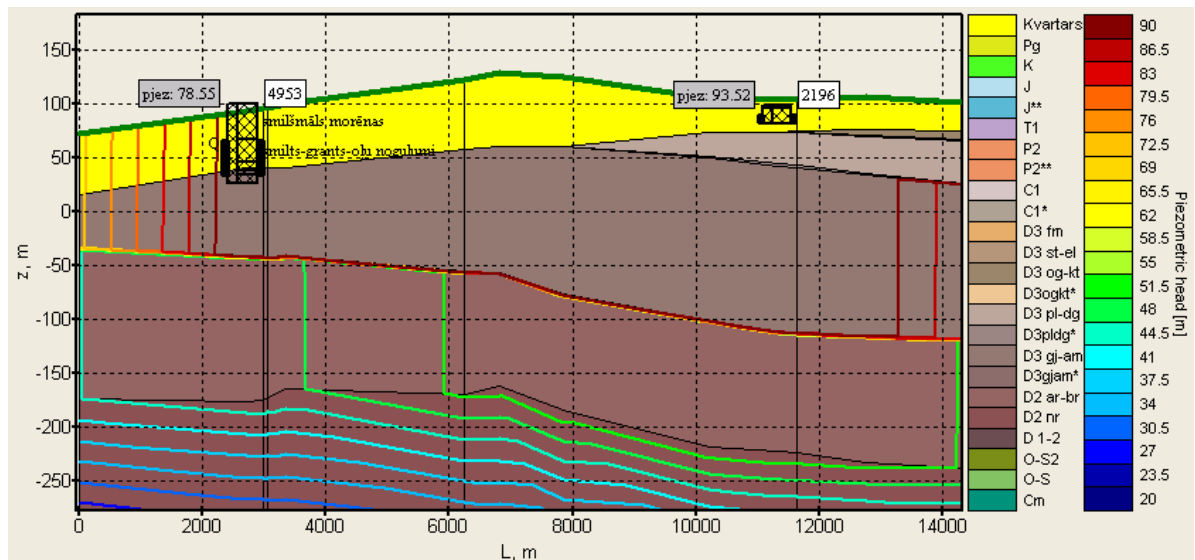
(a)



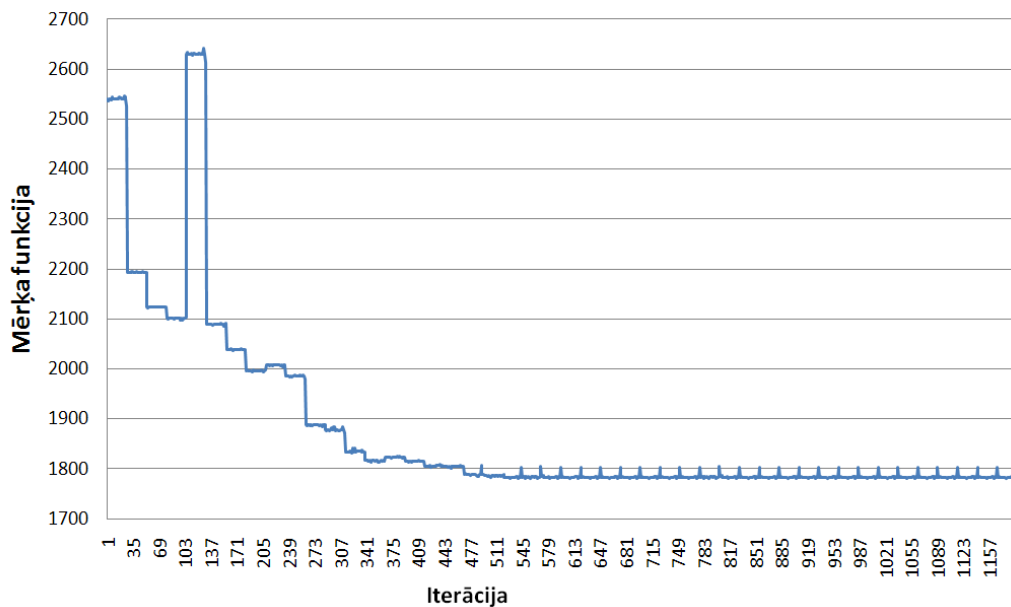
(b)

5.6. att. (a) modelētais pjezometrisko ūdens līmeņu sadalījums un novērotie pjezometriskie ūdens līmeņi urbumu punktos kvartāra nogulumu slānī pēc kalibrācijas; (b) modelētais pjezometrisko ūdens līmeņu sadalījums (skala pa kreisi) un atšķirības starp modelēto un novēroto ūdens līmeni (skala pa labi) kvartāra nogulumu slānī pēc kalibrācijas

kalibrācija 15 slāņos, vidējā ūdens līmeņu nesakritība visos slāņos ir aptuveni $\varepsilon \approx \sqrt{\frac{1800}{15}} \approx 11$ metri. Izvelkot kvadrātsakni no mērķa funkcijas komponentes slānī, var noskaidrot novērojumu un modelēto līmeņu vidējās nesakritības atsevišķi katrā no slāņiem, kuros ir atrodami novērojumu urbumi.

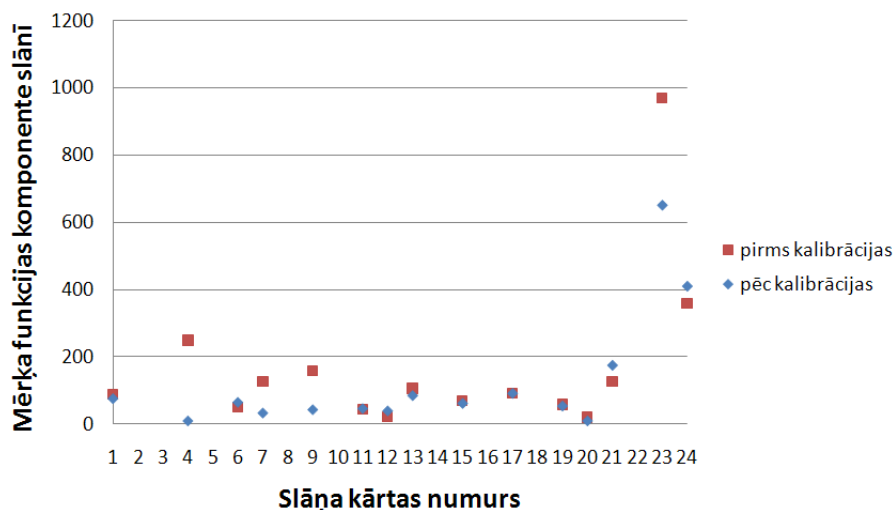


5.7. att. pa 5.2. att. (a) līnijas AB daļu (pelēkā līnija) izdarītais vertikālais griezumā Talsu tuvumā pēc kalibrācijas



5.8. att. Kopējās mērķa funkcijas izmaiņas iterāciju gaitā

5.9. attēlā ir parādīta mērķa funkcijas izmaiņa pa slāņiem - kā redzams, vissliktāk sakrītošie modeļa slāņi ir dziļākie slāņi. Viens no sliktās sakrītības iemesliem bez tā, ka modelis dabā esošo situāciju atspoguļo aptuveni, ir neprecīzi dati. Turklāt, tā kā ordoviks-silūrs (O-S) ir sprosts slānis, pieejamā informācija par urbumu novērojumu līmeņiem šajā slānī ir īpaši skopa (datu bāzē novērojumi pieejami tikai 68 urbumiem), tāpēc kalibrācijas gaitā ir iespējams panākt ievērojamu šī slāņa sakrītības uzlabošanu. Kā redzams 5.9. attēlā, lielākoties mērķa funkcija slāņos uzlabojas, taču var būt tā, ka kopējā mērķa funkcija uzlabojas, bet atsevišķas mērķa funkcijas komponentes pa slāņiem pasliktinās, piemēram, 5.9. attēlā pasliktinās D 1-2 un Cm slāņa sakrītība ar novērojumiem. Mērķa funkcijas komponentes tiek attēlotas tikai tiem slāņiem,



5.9. att. Mērķa funkcijas komponentes pa slāņiem

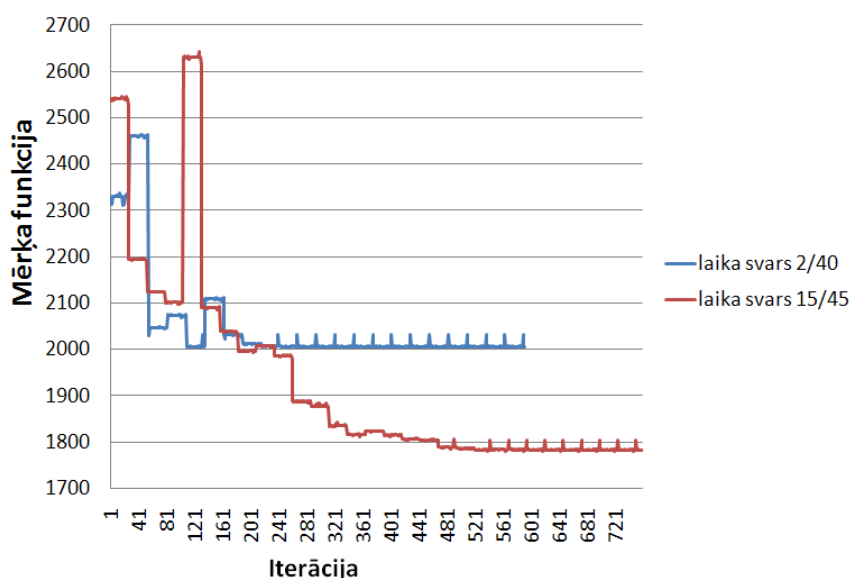
kuros atrodas kaut viens no datubāzē esošajiem urbumu filtriem. Ja slānim nav uzdots mērķa funkcija, tad šajā slānī nav veikti pjezometriskā ūdens līmeņa novērojumi un līdz ar to nav datu, uz kuriem iegūt mērķa funkciju šim slānim. Protams, šī slāņa vadītspējas koeficientu maiņa iespaido mērķa funkciju blakus esošiem slāņiem, un tādējādi tie piedalās visas sistēmas kalibrācijā.

Atsaucoties uz 5.2. (c) un 5.7. attēla salīdzinājumu, 5.9. attēlā var redzēt arī to, ka mērķa funkcijas komponente kvartāra slānī ir palikusi praktiski nemainīga, un no tā izriet, ka vertikālajā griezumā Talsu tuvumā novērotā pasliktināšanās ir ar lokālu raksturu. Pat, ja šajā apgabalā sakritība ir pasliktinājusies, mērķa funkcijas kvartāra komponentes minimālā izmaiņa vēsta par to, ka ir jābūt apgabalim, kuros novērotie un modelētie līmeņi sakrīt labāk nekā pirms kalibrācijas aprēķinu veikšanas, piemēram, salīdzinot 5.1. un 5.7. (b) attēlus, ir samazinājies sarkano punktu daudzums Kuldīgas apkārtnē (LKS 92 koordinātes (354000; 6310000)), turklāt ir jāņem vērā tas, ka kvartārs patiesībā ir ļoti komplekss ģeoloģiskais slānis, kam nav iespējams piedēvēt vienu konkrētu hidrauliskās vadītspējas koeficientu, tāpēc BAB modeļa nulltajā versijā, izmantojot informāciju no datubāzes urbumiem, ir izveidota kvartāra materiālu īpašību sadalījuma funkcija telpā, kas tiek pareizināta ar 5.1. tabulā doto kvartāra slāņa koeficientu (šī darba ietvaros kvartāra slāņa ģeoloģiskā sarežģītība un materiālu īpašību sadalījuma funkcija netiks apskatīta). Tas nozīmē, ka praksē ir grūti veikt tādu optimizāciju, lai sakritība uzlabotos visos slāņos visā BAB apgabalā, tāpēc automātiskajai kalibrācijai ir ievērojamas priekšrocības salīdzinājumā ar manuālo kalibrāciju - automātiskā kalibrācija izslēdz subjektīvās kalibrētāja sajūtas.

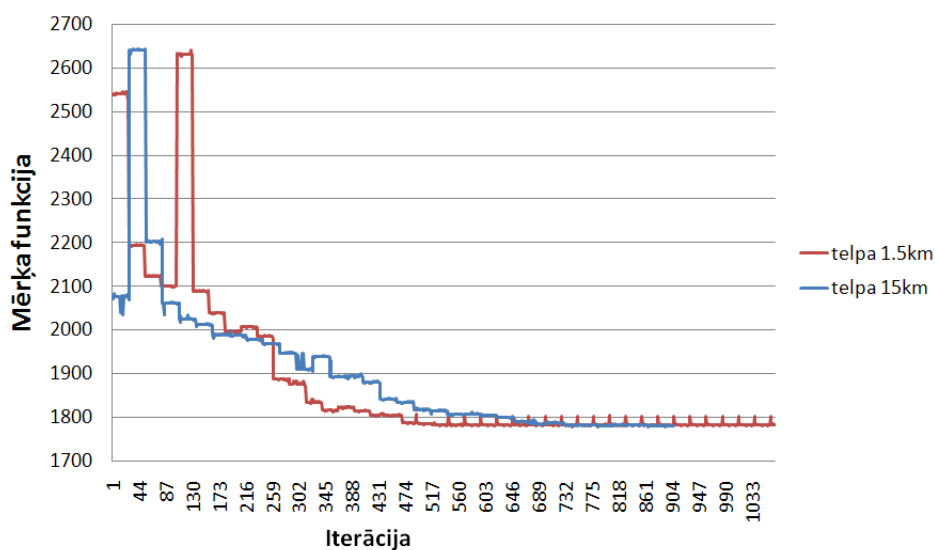
5.4. Svaru maiņas ietekme uz kalibrācijas aprēķinu rezultātiem

Salīdzināsim divus aprēķinus ar diviem dažādiem laika svāriem - 15/45 (augšējiem slāņiem ar kārtas numuru, kas mazāks par 19, $T_{dec} = 15$ gadi; dziļajiem slāņiem ar kārtas numuru, kas lielāks vai vienāds ar 19, $T_{dec} = 45$ gadi) un 2/40. Aprēķinu laika taupīšanas dēļ sākotnējie hidrauliskās vadītspējas koeficienti tiek nomainīti ar 5.1. tabulā dotajiem pēc standarta aprēķina kalibrācijas iegūtajiem hidrauliskās vadītspējas koeficientiem.

5.10. attēlā ir redzams, ka precīzāku sakrītību (mazāku mērķa funkciju) iegūst, pielietojot augšējiem slāņiem lielāku svara koeficientu, tāpēc turpmākajos kalibrācijas aprēķinos tiks izmantots standarta laika svāris 15/45.



5.10. att. Mērķa funkcijas izmaiņas iterāciju gaitā aprēķiniem ar atšķirīgiem laika svāriem



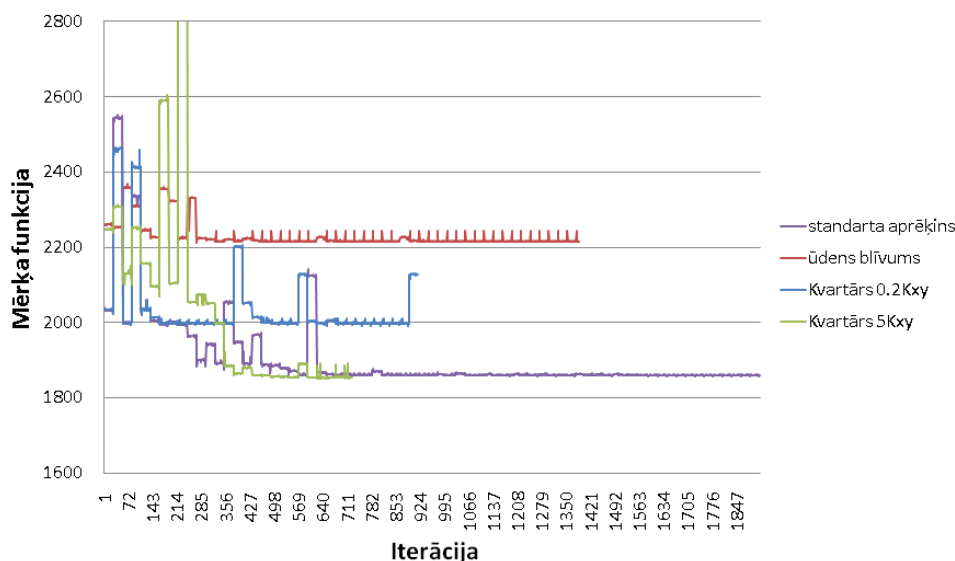
5.11. att. Mērķa funkcijas izmaiņas iterāciju gaitā aprēķiniem ar atšķirīgiem telpas svāriem

Kā redzams 5.11. attēlā mērķa funkcijas izmaiņas pie atšķirīgiem telpas svariem optimizējas praktiski uz vienu un to pašu skaitli 1780, kaut arī formulā (10) ietilpstošais telpas dekrementis R_{dec} atšķiras 10 reizes. No tā izriet, ka telpas svara parametra R_{dec} izmaiņa 10 reizes būtiski neietekmē kalibrācijas rezultātus, tāpēc šī bakalaura darba ietvaros tiek pieņemts, ka telpas svara koeficientam nav ietekme uz mērķa funkciju un kalibrācijas rezultātiem, līdz ar to arī šajā gadījumā tiek atstāti standarta aprēķinam definētie svāri.

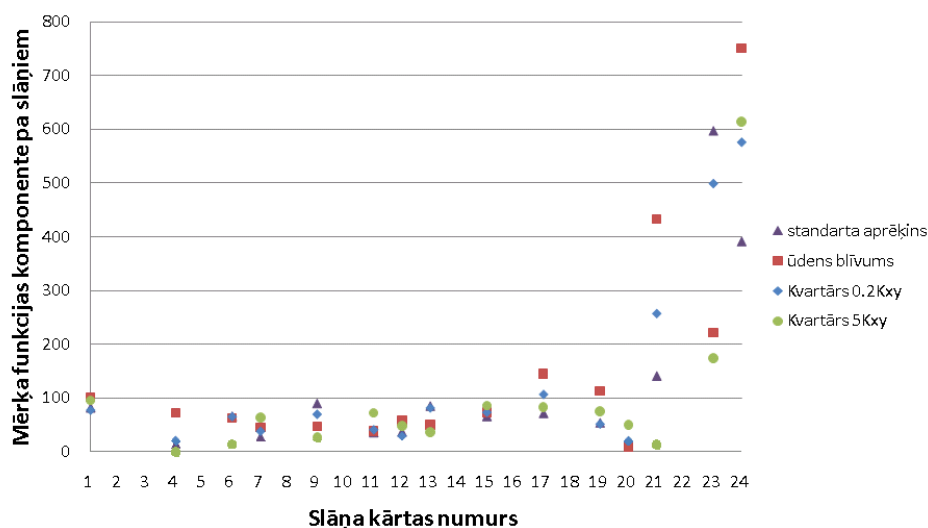
5.5. Citi kalibrācijas aprēķinu rezultāti

Turpmākie mērķa funkcijas uzlabojumu meklēšanas virzieni ir sekojoši: kalibrācijas aprēķinos izmantot ūdens blīvuma korekciju; ģenerēt struktūru ar izmainītu kvartāra horizontālās vadītspējas koeficientu. Ūdens blīvuma korekcijas gadījumā tiek koriģēts ūdens blīvums kembrija slānim ($\rho = 1073 \frac{kg}{m^3}$) un ordovika-silūra nogulumu slānim ($\rho = 1044 \frac{kg}{m^3}$), pārējiem slāņiem ūdens blīvums paliek nemainīgs ($\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$), līdz ar to ir sagaidāms, ka vajadzētu uzlaboties abiem iepriekšminētajiem slāņiem. Kvartāra horizontālās vadītspējas maiņas gadījumā ģeoloģiski ļoti komplekso augšējo nogulumu slāņa kvartāra materiālu īpašībām tiek izmainīta anizotropija - vienā gadījumā horizontālā vadītspējas komponente tiktu palielināta 5 reizes, otrā gadījumā - samazināta 5 reizes.

Veikto aprēķinu mērķa funkcijas (5.12. att.) un mērķa funkcijas komponentes pa slāņiem (5.13. att.) parāda, ka visi aprēķini dod līdzīgus rezultātus, kuri galvenokārt atšķiras dziļākajos Cm, O-S un D 1-2 slāņos. Turklāt ir redzams, ka ūdens blīvuma korekcija un kvartāra horizontālās hidrauliskās vadītspējas samazināšana vai palielināšana 5 reizes nav devusi uzlabojumus mērķa funkcijas minimizācijā.



5.12. att. Mērķa funkcijas izmaiņas iterāciju gaitā dažādiem aprēķiniem



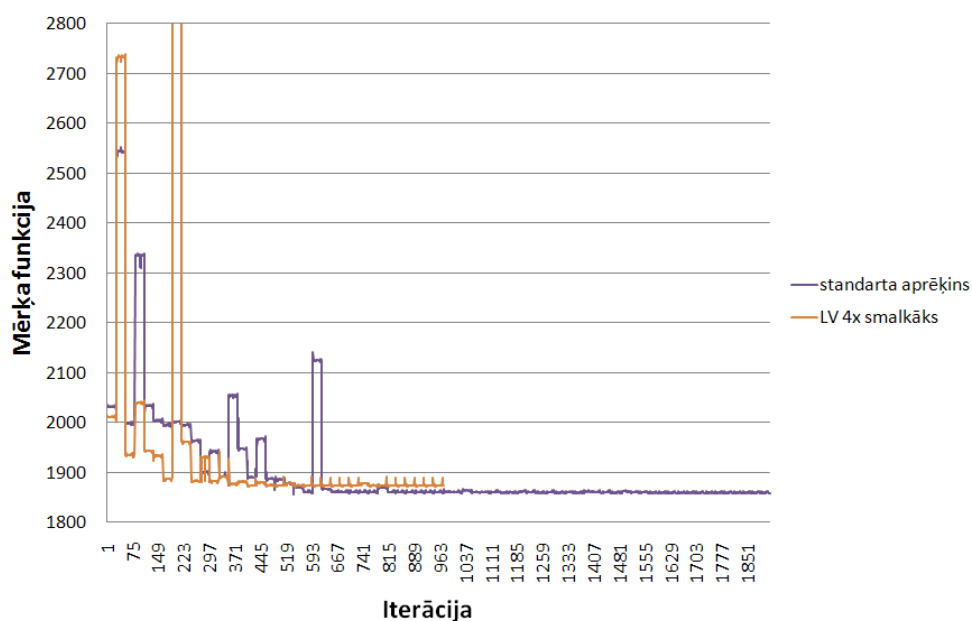
5.13. att. Mērķa funkcijas komponentes pa slāņiem dažādiem aprēķiniem

Apskatot 5.14. attēlā parādītās mērķa funkcijas komponentes aprēķinam ar koriģēto ūdens blīvumu, ir redzams, ka no sagaidāmajiem visu dziļo slāņu uzlabojumiem ievērojami ir uzlabojies tikai 23. slānis jeb ordoviks-silūrs, savukārt kembrijā un apakšdevona D 1-2 slānī ievērojami pasliktinās nesakritība starp novērotajiem un modelētajiem ūdens līmeņiem. Tam, kādēļ uzlabojumi ir vērojami tikai vienam no slāņiem ar koriģēto blīvumu mērķa funkcijā (11), var būt dažādi izskaidrojumi, kam nepieciešama tālāka izpēte. Vēl 5.14. attēlā ir redzams, ka kvartāra horizontālās vadītspējas pieckārtējas palielināšanas aprēķina gadījumā ir ļoti veiksmīgi minimizējies mērķa funkcijas komponente 21. slānī jeb D 1-2, kā arī šī aprēķina rezultāti uzrāda vislabāko sakritību O-S slānī, taču tāpat kā pārējie šajā apakšnodaļā minētie nestandarta aprēķini ievērojami pasliktina novēroto un modelēto līmeņu sakritības kembrija slānī.

5.6. Galīgo elementu režģa maiņas ietekme uz kalibrācijas aprēķinu rezultātiem

Tā kā neizdevās iegūt rezultātu uzlabojumus mainot svarus un veicot citus iepriekšminētos aprēķinus, tad rezultātu uzlabošanas iespējas jāmeklē citā virzienā - ir iemesls domāt, ka, sasmalcinot pamata režģi, būs vērojama labāka sakritība starp novērotajiem un modelētajiem datiem, jo intuitīvi ir saprotams, ka smalkāka un precīzāka pamata režģa gadījumā BAB apgabala reljefs un slāņu virsmas tiek attēlotas precīzāk, līdz ar to aprēķinātajam pjezometrisko ūdens līmeņu laukam arī vajadzētu būt precīzākam.

Lai pārbaudītu šo pieņēmumu, tiek veikts aprēķins, kura pamata režģī Latvijas teritoriju ieskaujošās līnijas iekšpusē trijstūru režģa ģenerēšanas palīgprogrammai tiek uzdots ģenerēt režģi, kura trijstūru laukums ir četras reizes mazāks par standarta aprēķina pamata režģa trijstūru laukumu Latvijas teritorijā (ja laukums ir 4 reizes mazāks, raksturīgais trijstūru malas garums samazinās 2 reizes - iegūst reljefu ar 2 reizes labāku izšķirtspēju).

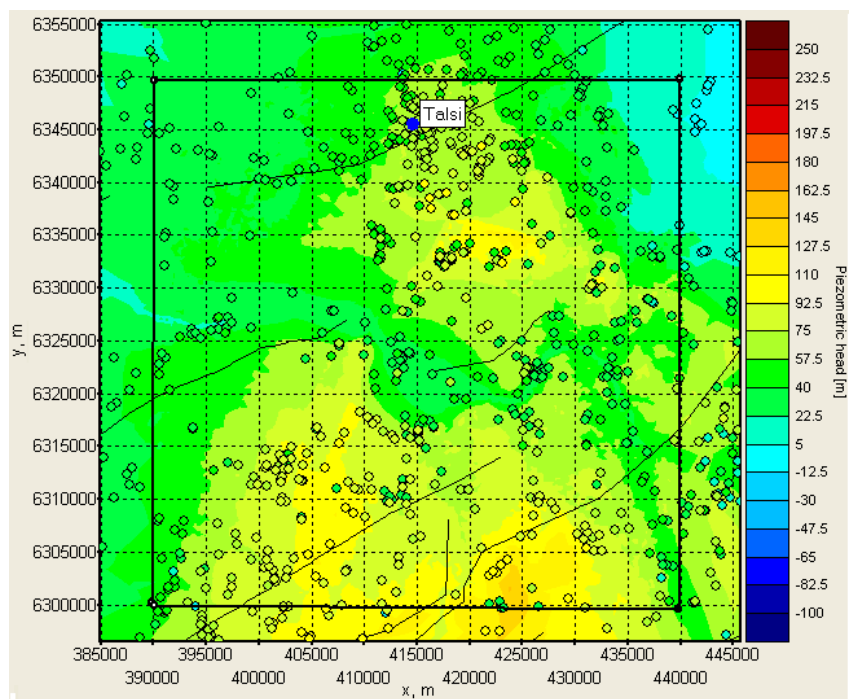


5.14. att. Mērķa funkcijas izmaiņas iterāciju gaitā aprēķiniem ar atšķirīgiem pamata režģiem

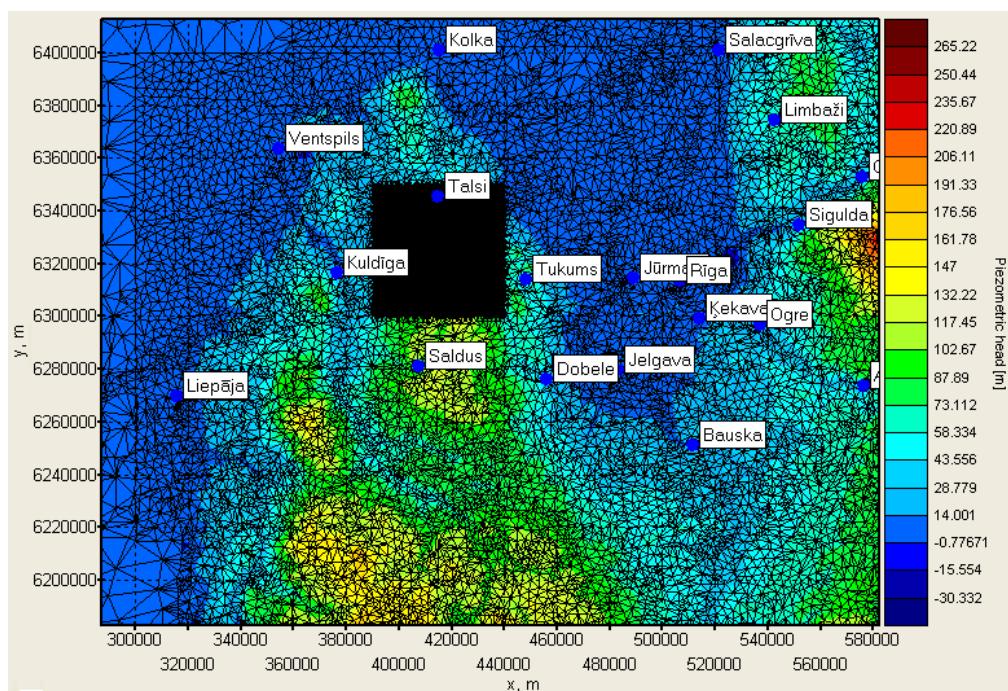
Kā redzams 5.14. attēlā, arī pamata režģa smalcināšana Latvijas teritorijā nav ienesusi mērķa funkcijas minimizācijā nekādus ievērojamus uzlabojumus.

Tā kā iepriekšējie meklējumi nav devuši būtisku uzlabojumu mērķa funkcijas minimizācijā visā BAB apgabalā, un nav iespējams tālāk smalcināt visu BAB modeļa pamata režģi, tad ir vērts pārbaudīt, vai atsevišķa apgabala sasmalcināšana (5.15. att.) uzlabo novērojumu un modeļa atrisinājuma sakritību apskatītajā apgabalā. Šajā konkrētajā piemērā tiek izveidota līnija (5.15. att. (a)), kuras iekšpusē režģi veidojošo trijstūru laukums tiek uzdots 100 reizes mazāks nekā līniju ieskaujošā režģa trijstūru laukums (5.15. att. (b)), līdz ar to raksturīgais trijstūru malas garums samazinās 10 reizes, un režģa izšķirtspēja palielinās 10 reizes. Sasmalcināšanas apgabals tiek izvēlēts vienā no iepriekš minētajām slikti sakrītošajām vietām - Talsu tuvumā; apgabala laukums ir 50 reiz 50 kilometri.

Salīdzinot kopējo mērķa funkciju (5.16. att.) standarta aprēķinam un aprēķinam ar sasmalcināto apgabalu pie Talsiem (Talsi), ir redzams, ka kopējai mērķa funkcijai, kas raksturo visu BAB apgabalu, šāda pieeja nav devusi būtiskus uzlabojumus, kas arī bija sagaidāms, ņemot vērā pēdējo apskatīto kalibrācijas aprēķinu rezultātu (5.14. att.). Vienīgā acīmredzamā atšķirība starp 5.16. attēlā redzamajām standartaprēķina un aprēķina ar sasmalcināto apgabalu pie Talsiem mērķa funkcijām ir tāda, ka, tā kā pamata režģi ir ievērojami pieaudzis punktu skaits, mērķa funkcijas minimizācija gadījumā, kad ir 100 reizes smalkāk sasmalcināts apgabals pie Talsiem, notiek lēni un ļoti ilgi (diennaktī Kvaziņūtona L-BFGS minimizācijas algoritms izdara aptuveni 200 iterāciju), līdz ar to globālā mērogā papildu punktu pievienošana pamata režģim ievērojami kavē mērķa funkcijas minimuma meklēšanu un nerada būtiskus uzlabojumus.



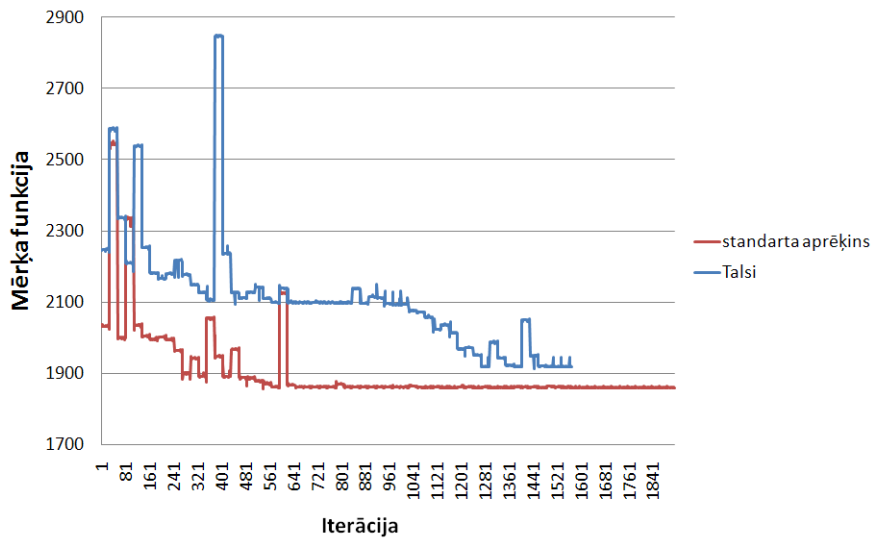
(a)



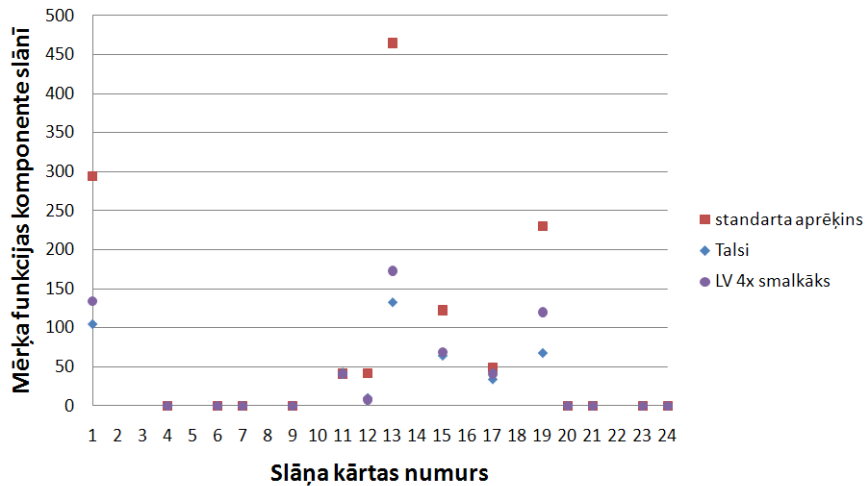
(b)

5.15. att. (a) Līnija, kas ieskauj sasmalcināto apgabalu pie Talsiem un tās iekšpusē esošie datubāzes urbumi; (b) Pamata režģa daļa ar iekļauto sasmalcināto režģi (krāsu skala attēlo pjezometrisko ūdens līmeni kvartārā)

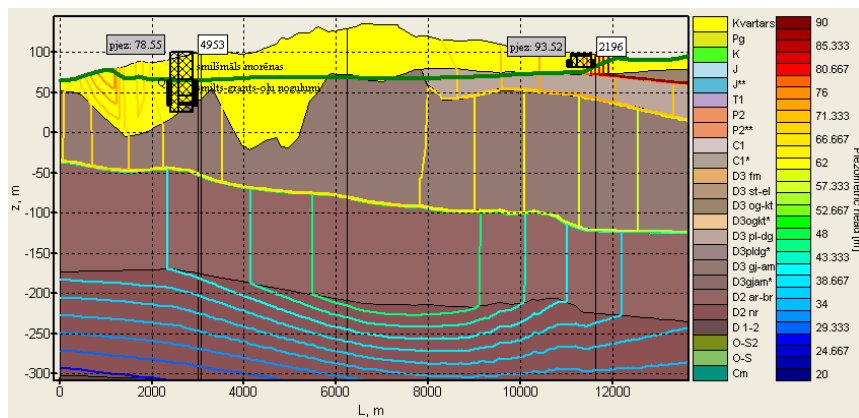
Tagad pievērsīsim uzmanību tikai interesējošajam sasmalcinātajam apgabalam pie Talsiem (5.15. att.) un apskatīsim šajā apakšnodaļā iepriekš minēto aprēķinu mērķa funkcijas komponentes pa slāņiem no pēdējās (labākās) iterācijas (5.17. att.). Mērķa funkcija tiek rēķināta tikai uz tiem 5.15. (a) attēlā redzamajiem urbumu punktiem, kurus ieskauj melnā līnija.



5.16. att. Kopējās mērķa funkcijas izmaiņa iterāciju gaitā standarta aprēķinam, aprēķinam ar sasmalcinātu apgabalu un aprēķinam ar sasmalcinātu apgabalu un pamata režģī pievienotiem datubāzes urbumiem

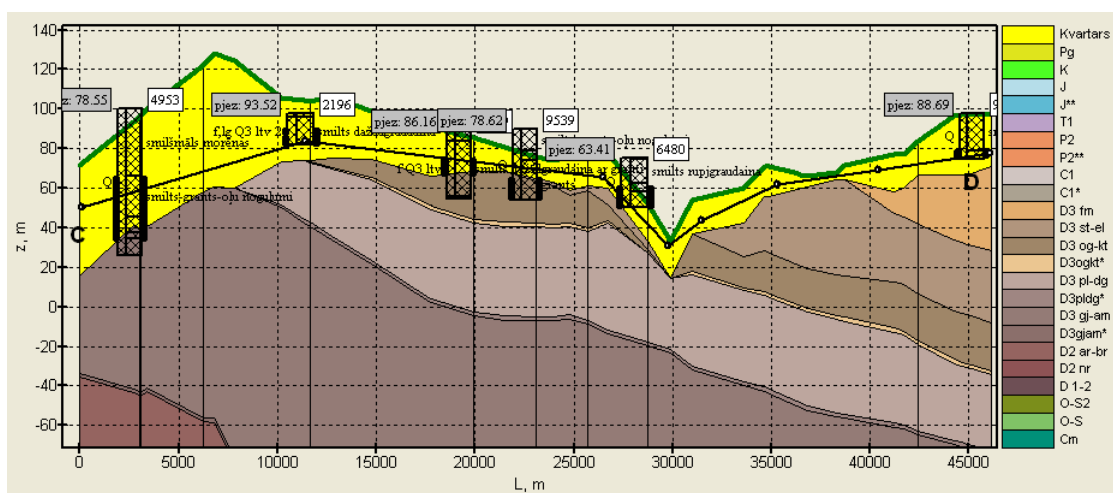


5.17. att. Mērķa funkcijas komponentes slānī aprēķiniem ar atšķirīgiem pamata režģiem sasmalcinātajā apgabalā pie Talsiem

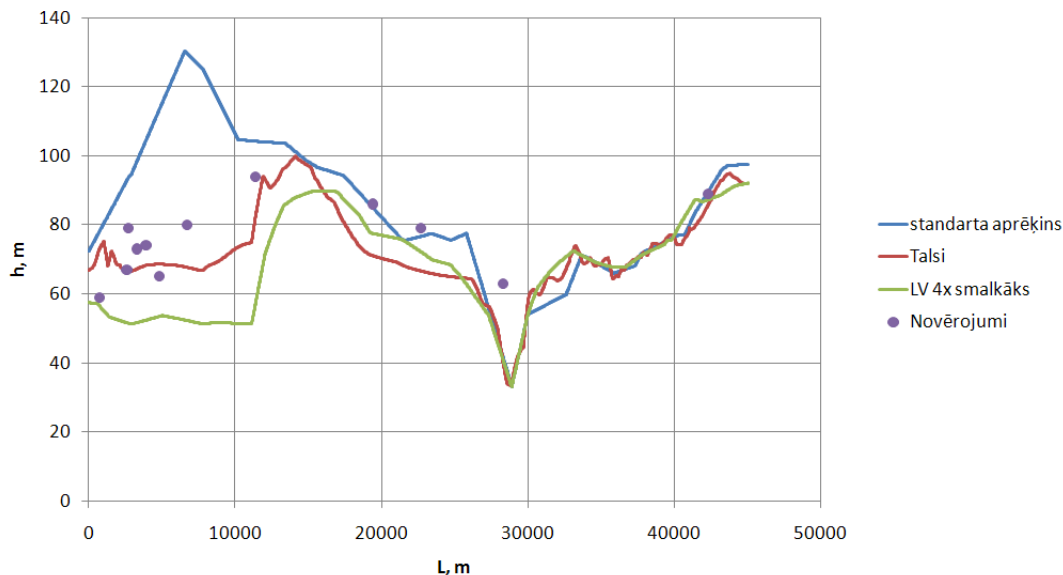


5.18. att. Vertikālais griezumā pie Talsiem pēc kalibrācijas aprēķinam ar sasmalcināto apgabalu pie Talsiem

5.17. attēlā ir redzams, ka mērķa funkcija ir uzlabojusies visos iespējamajos slāņos gan Latvijas teritorijas režģa sasmalcināšanas, gan it īpaši Talsu apgabala režģa sasmalcināšanas gadījumā. No tā varam secināt, ka pamata režģa smalcināšana būtisku uzlabojumu dod sasmalcinātajā režģa apgabalā, taču kopējo BAB apgabala mērķa funkciju praktiski neietekmē vai ietekmē ļoti nedaudz. Uzlabojums ir arī redzams, salīdzinot vertikālos griezumus pie Talsiem (5.7. att. un 5.18. att.), kur vertikālā griezuma apgabalā pie abiem attēlotajiem urbumiem sasmalcinātā apgabala kalibrācijas rezultātu 5.18. attēla gadījumā izolīnijas atspoguļo urbumu novērojumiem daudz labāk sakrītošus datus nekā standarta aprēķina h izolīnijas.



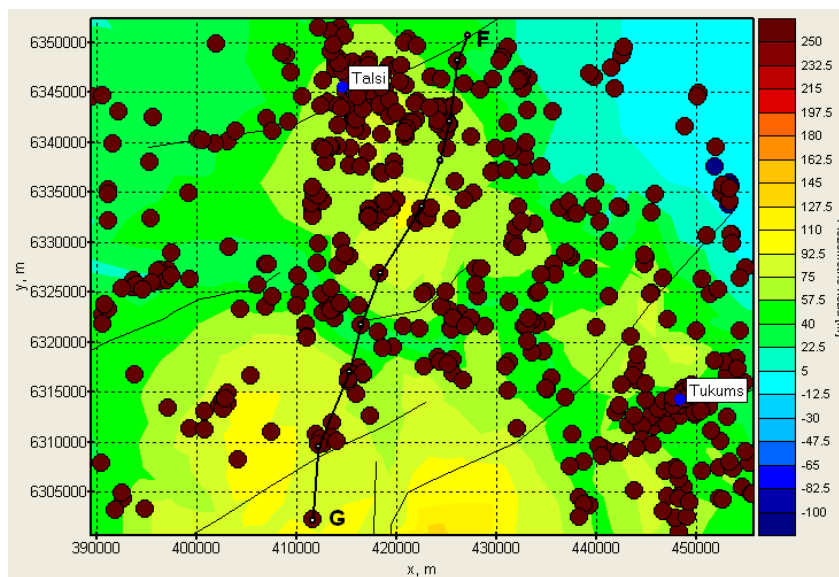
5.19. att. 1D griezuma līnija CD kvartāra slānī



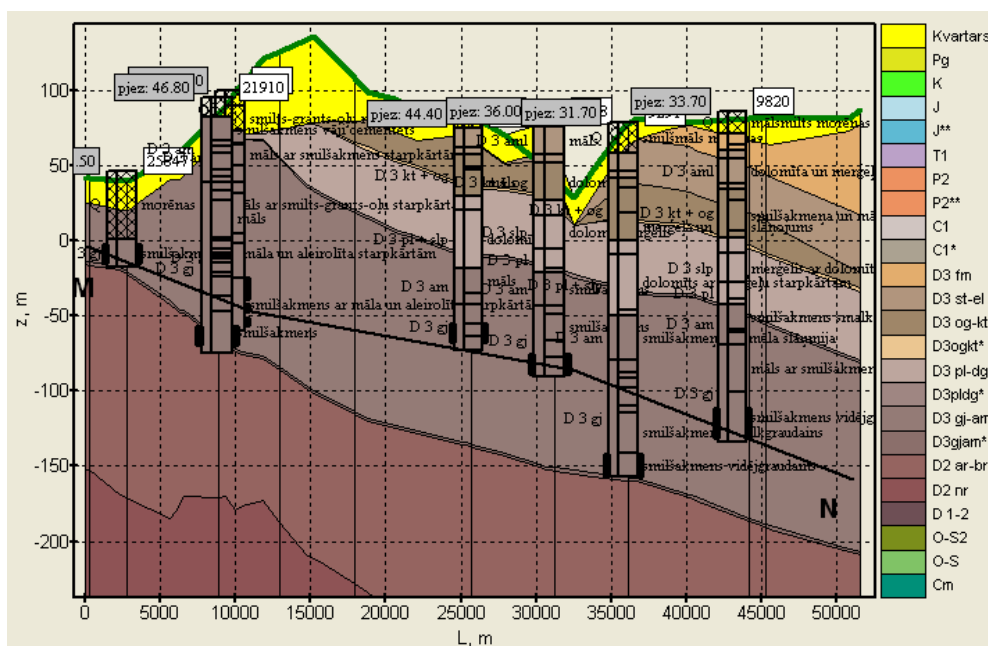
5.20. att. Pjezometriskie ūdens līmeņi pēc kalibrācijas aprēķiniem ar atšķirīgiem pamata režģiem gar 1D griezuma līniju CD kvartāra slānī un novērotie pjezometriskie ūdens līmeņi

Izmantosim PAIC izstrādātās programmas HiFiGeo iespējas un apskatīsim viendimensio-nālu (1D) griezumu kvartāra un D3 gj-am slānī. 1D griezums ir vertikālajā griezumā definēta

līnija, kuras garumā var iegūt piezometriskā ūdens līmeņa sadalījumu. Vispirms aplūkosim 5.2. (a) attēla vertikālo griezumumu pa līniju AB, kas ir novilkta caur vairākiem urbumiem, kuru filtrs atrodas kvartāra slānī. Vertikālā griezuma skatā (5.2. (b) att.) novelk līniju CD (5.19. att.) kvartāra slāņa iekšpusē (uzskatāmības labad, veidojot 5.19. attēlu ir pietuvināta 5.2. (b) attēla augšējā daļa).



(a)



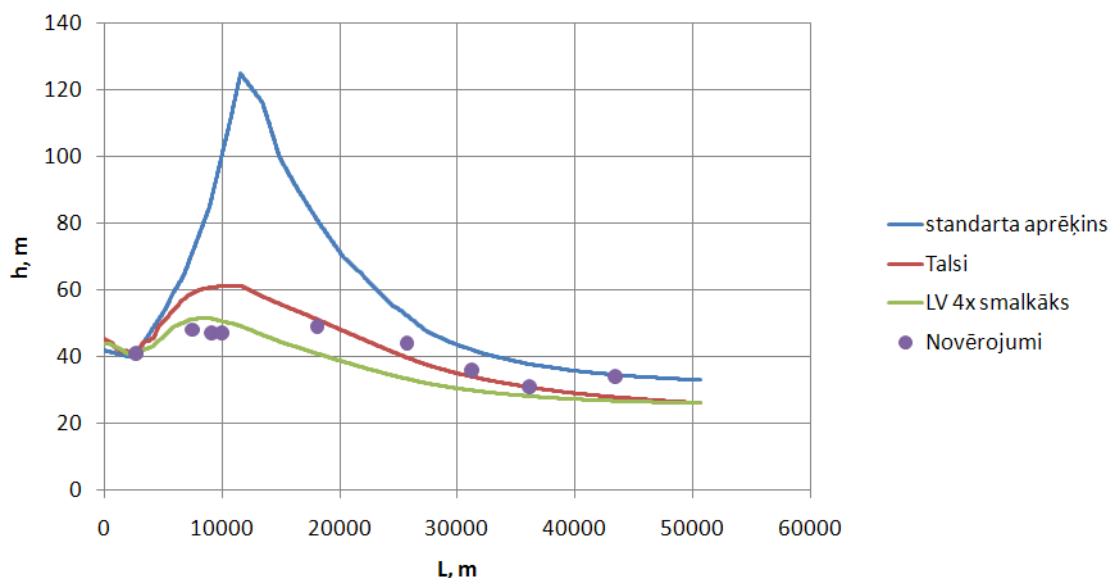
(b)

5.21. att. (a) caur D3 gj-am urbumiem (sarkanie punkti) novilkta vertikālā griezuma līnija FG Talsu tuvumā; (b) pa līniju FG izdarītais vertikālais griezumums Talsu tuvumā un 1D griezuma līnija MN D3 gj-am slānī

5.20. attēlā ir redzamas piezometriskā ūdens līmeņa līknes līnijas CD garumā, un var vizuāli novērtēt, ka vislabākā sakritība visas līnijas CD garumā ir aprēķinām ar sasmalcināto

apgabalu pie Talsiem. Līnijas CD beigu daļā aiz garuma atzīmes $L = 30000$, vizuāli novērtējot, visi 5.21. attēlā redzami aprēķinu rezultāti ir vienlīdz labi sakrītoši.

Veiksim analīzi arī augšdevona Gaujas - Amatas horizontā, un novelkam BAB apgabala kartē vertikālā griezuma līniju FG (5.21. (a) att.) un iegūstam vertikālo griezumu (5.21. (b) att.), kurā novelkam 1D griezuma līniju MN. Līdzīgā veidā, kā tas tiek darīts kvartāra gadījumā, iegūst pjezometriskā ūdens līmens līknes kalibrācijas aprēķiniem ar dažādiem pamata režģiem līnijas MN garumā (5.22. att.).



5.22. att. Pjezometriskie ūdens līmeņi pēc kalibrācijas aprēķiniem ar atšķirīgiem pamata režģiem gar 1D griezuma līniju MN D3 gj-am slānī un novērotie pjezometriskie ūdens līmeņi

5.22. attēlā ir redzams, ka kalibrācijas aprēķini ar mainītiem pamata režģa parametriem uzrāda labāku sakrītību nekā standarta aprēķina rezultāti. Tas apstiprina, ka lokāla režģa smalcināšana lokālajā apgabalā uzlabo modelēto un novēroto pjezometriskā ūdens līmeņu sakrītību.

Izejot no secinājuma par to, ka pamata režģa smalcināšana būtisku uzlabojumu dod samalcinātajā režģa apgabalā, var spriest, ka, lai uzlabotu mērķa funkciju visā BAB apgabalā, būtu daudzkārt jāsamalcina viss BAB modeļa pamata režģis, taču jāņem vērā, ka līdz ar pamata režģa samalcināšanu ievērojami pieaug modeļu veidojošo punktu skaits. Un kā jau tas ir redzams 5.16. attēlā, daudzkārtēja režģa smalcināšana (piemēram, režģi veidojošo trijstūru laukuma samazināšana 100 reizes) ievērojami apgrūtina minimizācijas algoritma darbību. Turklāt vēl ir jāņem vērā tas, ka pirms kalibrācijas aprēķinu veikšanas ir jāiegūst modeļa atrisinājums, kas arī ierobežo maksimālo iespējamo punktu skaitu BAB ģeometriskā modeļa tilpuma režģī, jo kā tiek novērots praksē - cenšoties samalcināt pārāk lielu apgabalu pārāk smalki, programmai pietrūkst atmiņas resursu, lai iegūtu pjezometriskā ūdens līmeņu sadalījumu attiecīgajai BAB modeļa ģeometrijas modifikācijai.

Izdarītos secinājumus par BAB apgabala režģa smalcināšanu var vispārināt uz modeļa ģeometrijas uzlabošanas principiem. Smalcinot režģi, tiek uzlabota modeļa izšķirtspēja un līdz ar to modeļa atrisinājuma precizitāte, taču tās uzlabojumus ir iespējams iegūt arī citos veidos, jo kā tas tiek minēts 4.1. apakšnodaļā - modelis tiek veidots ar mērķi dabā notiekošos procesus attēlot ar maksimāli iespējamo vienkāršību. No tā izriet, ka, lai panāktu labākus uzlabojumus starp novērotajiem un modelētajiem pjezometriskajiem ūdens līmeņiem, var ieviest vispārējus uzlabojumus un korekcijas paša ģeometriskā modeļa režģa izveidē gan attīstot skriptu, gan iekļaujot modelī BAB V0 versijā neizmanto to ģeoloģisko informāciju vai uzlabojot esošās informācijas izmantošanu. Ieviešot tik vērīnīgus uzlabojumus, tiktu iegūta nākamā BAB hidroģeoloģiskā modeļa versija - BAB V1.

6. SECINĀJUMI

Darba ietvaros tika veikta modeļa kalibrācijas algoritmu testēšana, modeļa kalibrācija un vairāku parametru ietekmes izpēte uz kalibrācijas rezultātu.

Izmantojot automātisko kalibrāciju bija iespējams uzlabot manuālās kalibrācijas rezultātus, kā arī objektīvāk novērtēt iegūto rezultātu, izmantojot mērķa funkciju.

Visi ievadā minētie darba uzdevumi ir izpildīti, taču mērķis - atrast visoptimālākos hidrauliskās vadītspējas parametrus ir izpildījies daļēji - labākais iegūtais kalibrācijas aprēķinu rezultāts visā BAB apgabalā šī darba ietvaros ir sākotnēji apskatītajam standarta aprēķinam (2. pielikumā var apskatīt hidrauliskās vadītspējas koeficientus standarta aprēķinam (st. apr.) un aprēķinam ar sasmalcināto režģa apgabalu pie Talsiem). Sākotnējie standarta aprēķina parametri intuitīvi bija izraudzīti ļoti veiksmīgi.

Kopējā mērķa funkcija raksturo vidējo nesakritību slāņos reiz slāņu skaits, kuros ir veikti urbumu novērojumi, tāpēc var būt tā, ka gadījumā, ja, veicot citu aprēķinu, mērķa funkcija uzlabojas, tas nenozīmē, ka uzlabojumi ir notikuši visā BAB apgabalā jebkurā telpas punktā, bet gan ir iespējams, ka ir slāņi vai apgabali, kur rezultāti pēc kalibrācijas pasliktinās.

BAB hidroģeoloģiskajā modelī vislielākās nesakritības starp novērojumiem un modelētajiem rezultātiem ir dziļajos slāņos - kembrijā, ordovikā-silūrā un vidus un apakšdevonā.

Veicot kalibrācijas aprēķinu, kam laika dekrementa augšējiem slāņiem ar kārtas numuru mazāku vai vienādu ar 19 ir salīdzinoši mazs, nevar iegūt rezultātu uzlabojumus salīdzinājumā ar standarta aprēķina rezultātiem.

Telpas svāra rādiusa R_{dec} izmantošana praktiski neietekmē aprēķina rezultātus.

Veicot korekcijas ūdens blīvumam un kvartāra materiālu īpašību anizotropijai, nav novērojama rezultātu uzlabošanās.

Veicot izmaiņas BAB pamata režģī, globalā mērogā kopējā mērķa funkcijā nav novērojami uzlabojumi.

Apskatot mērķa funkcijas komponentes slāņos 100 reizes sasmalcinātajā apgabalā, ir redzams, ka aprēķinu gadījumos ar smalcinātiem pamata režģiem ir vērojama labāka sakritība starp novērojumiem un modelētajiem lielumiem smalcinātā apgabala iekšienē nekā standarta aprēķinam, no kā izriet, ka režģa smalcināšana izraisa lokālus mērķa funkcijas uzlabojumus.

Lai iegūtu vēl labākus kalibrācijas rezultātus, ir jāveic uzlabojumi BAB ģeometriskā modeļa struktūrā, kas noved pie BAB hidroģeoloģiskā modeļa nākamās versijas - BAB V1 - izstrādes.

PATEICĪBAS

























Darba autore izsaka pateicību PAIC un VTPMML kolektīvam par atbalstu darba tapšanā. Īpašs paldies Andrejam Timuhinam par vērtīgajiem komentāriem, ieteikumiem un paskaidrojumiem.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] *Darcy's Law* [tiešsaiste] - [atsauce 18.04.2011.]. Pieejams:
<http://www.ngwa.org/programs/educator/lessonplans/darcy.aspx>
- [2] *Thinking about groundwater modeling in a pre-computer age* [tiešsaiste] -
[atsauce 18.04.2011.]. Pieejams: <http://www.groundwatergo.com/blog/thinking-about-groundwater-modeling-in-a-pre-computer-age/>
- [3] *Technological Context of the 1986 Trial* [tiešsaiste] - [atsauce 15.04.2011.]. Pieejams:
<http://serc.carleton.edu/woburn/issues/stateoftheart1986.html>.
- [4] **Kumar, C. P.** *Groundwater flow models*. Roorkee : National Institute of Hydrology, 2006.
- [5] **Spalvins, A., Janbickis, R., Slangens, J., Gosk, E., Lace, I., Viksne, Z., Atruskievics, J., Levina, N., Tolstovs, J.** Hydrogeological model "Large Riga". In: *Boundary Field Problems and Computers*. Riga : Riga Technical University, State Geological Survey of Latvia; Copenhagen : Geological Survey of Denmark and Greenland, 1996, p. 102.
- [6] *Latvijas Enciklopēdiskā vārdnīca* [tiešsaiste] - [atsauce 19.04.2011.]. Pieejams:
<http://www.letonika.lv/groups/default.aspx?g=1&r=1>.
- [7] **Sennikovs, J., Virbulis, J., Bethers, U.** Mathematical model of the Baltic artesian basin. In: *EGU General Assembly 2011*, Geophysical Research Abstracts, 2011, vol 13
- [8] **Иодказис, В. И.** *Формирование и освоение эксплуатационных ресурсов подземных вод Прибалтики*. Вильнюс : Москлас, 1980. 176 с.
- [9] *LU 69. zinātniskās konferences apašsekciņa "Baltijas artēziskā baseina pazemes ūdeņi"* [tiešsaiste] - [atsauce 19.04.2011.]. Pieejams: <http://www.puma.lu.lv/zinas/t/4573/>.
- [10] **Levins, I., Levina, N., Gavēna, I.** *Latvijas pazemes ūdeņu resursi*. I. Dzilnas red. Rīga : Valsts ģeoloģijas dienests, 1998. 24 lpp.
- [11] **Istok, J.** *Groundwater Modeling by the Finite Element Method*. Washington : American Geophysical Union, 1989. 495 p.
- [12] *Darcy's law* [tiešsaiste] - [atsauce 03.05.2011.]. Pieejams:
http://uqu.edu.sa/files2/tiny_mce/plugins/filemanager/files/4282164/Darcy.pdf.

- [13] **Kruseman, G. P.** *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. Wageningen : International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1994. 373 p.
- [14] **Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L.** *The Finite Element Method Volume 1: The Basis Fifth edition*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. 689 p.
- [15] **Eaton, T.T.** On the importance of geological heterogeneity for flow simulation. **In:** *Sedimentary Geology*. New York, 2005. Volume 184, Issue 3-4, p.187-201.
- [16] **Carrera, J., Alcolea, A., Medina, A., Hdialgo, J., Slooten, L.J.** Inverse problem in hydrogeology. **In:** *Hydrogeology journal*, 2005, N 1, p. 206-222.
- [17] **Tellinghuisen, J.** *et. al.* Inverse vs. classical calibration for small data sets. *Fresenius' journal fo analytical chemistry*, 2000, N 6, p. 585-588.
- [18] **Sykes, A.O.** *An Introduction to Regression Analysis* [tiešsaiste] - [atsauce 16.05.2011.]. Pieejams: http://www.law.uchicago.edu/files/files/20.Sykes_.Regression.pdf.
- [19] **Gordon, K.S.** Nonlinear regression. **In:** *Encyclopedia of Environmetrics*. Chichester : John Wiley & Sons, 2002, vol 3, p. 1405-1411.
- [20] **Torfs, P., Bier, G.** Automatic model calibration using a universal approximator **In:** *Calibration and reliability in groundwater modelling: coping with uncertainty. Proceedings of the ModelCARE '99 conference in Zurich, Zurich, Switzerland, September 20-23, 1999*, p. 236-242.
- [21] *Quasi-Newton Minimisation with Limited Storage* [tiešsaiste] - [atsauce 17.05.2011.]. Pieejams: <http://www.maharramov.com/cgi-bin/load.pl?ID=30;s=;>
- [22] **PAIC (2002)** *HiFiGeo v.3.5 for Windows Lietotāja rokasgrāmata*. Rīga : SIA "Procesu analīzes un izpētes centrs", 2002.

1. PIELIKUMS. BAB MODELĪ IEKĻAUTIE ĢEOLOĢISKIE SLĀŅI

1		Kvartars	Kvartars - Kvartāra horizonts
2		Pg	Pg - Paleogēna horizonts
3		K	K - Krīta horizonts
4		J	J - Juras horizonts
5		J**	J** - Juras sprosslānis
6		T1	T1 - Apakštriasa nogulumu slānis
7		P2	P2 - Augšperma horizonts
8		P2**	P2** - Augšperma sprosslānis
9		C1	C1 - Apakškarbona nogulumu slānis
10		C1*	C1* - Apakškarbona sprosslānis
11		D3 fm	D3 fm - Augšdevona Famena komplekss
12		D3 st-el	D3 st-el - Augšdevona Stipiņu - Elejas sprosslānis
13		D3 og-kt	D3 og-kt - Augšdevona Ogres - Katlešu horizonts
14		D3ogkt*	D3ogkt* - Augšdevona Ogres - Katlešu sprosslānis
15		D3 pl-dg	D3 pl-dg - Augšdevona Pļaviņu - Daugavas horizonts
16		D3pldg*	D3pldg* - Augšdevona Pļaviņu - Daugavas sprosslānis
17		D3 gj-am	D3 gj-am - Augšdevona Gaujas - Amatas horizonts
18		D3gjam*	D3gjam* - Augšdevona Gaujas - Amatas sprosslānis
19		D2 ar-br	D2 ar-br - Vidusdevona Arukilas - Burtnieku horizonts
20		D2 nr	D2 nr - Vidusdevona Narvas sprosslānis
21		D 1-2	D 1-2 - Vidus un Apakšdevona horizonts
22		O-S2	O-S2 - Augšsilūra - Ordovika horizonts
23		O-S	O-S - Ordovika - Silūra sprosslānis
24		Cm	Cm - Kembrija horizonts

2. PIELIKUMS. VISOPTIMĀLĀKIE HIDRAULISKĀS VADĪTSPĒJAS KOEFICIENTI

Nr.	Modeļa slānis	K_h , pirms	K_v , pirms	K_h , st. apr.	K_v , st. apr.	K_h , Talsi	K_v , Talsi
1	Kvartars	1	1	0.087	0.087	0.368	0.368
2	Pg	10	1	7.523	0.752	3.659	3.659
3	K	2	1	1.746	0.175	1.428	0.143
4	J	1E-05	1E-05	1.347E-06	1.347E-06	3.916E-05	3.916E-05
5	J**	10	1	7.244	0.724	2.102	0.210
6	T1	1E-04	1E-04	1.376E-04	1.376E-04	3.000E-04	3.000E-04
7	P2	2	0.2	2.613	0.261	4.590	4.590
8	P2**	1E-06	1E-06	1.395E-06	1.395E-06	8.561E-06	8.561E-06
9	C1	2	0.2	2.724	0.272	1.019	0.102
10	C1**	1E-04	1E-04	7.908E-05	7.908E-05	1.878E-04	1.878E-04
11	D3 fm	2	0.2	2.477	0.248	0.840	0.084
12	D3 st-el	1E-04	1E-04	7.124E-05	7.124E-05	2.098E-05	2.098E-05
13	D3 og-kt	1	0.1	0.542	0.054	0.241	0.024
14	D3ogkt*	1E-06	1E-06	4.320E-07	4.320E-07	5.924E-08	5.924E-08
15	D3 pl-dg	10	1	6.788	0.679	1.858	0.186
16	D3pldg*	1E-07	1E-07	5.960E-08	5.960E-08	8.401E-09	8.401E-09
17	D3 gj-am	2	0.2	2.000	0.200	1.193	0.119
18	D3gjam*	2E-07	2E-07	2.531E-07	2.531E-07	2.398E-07	2.398E-07
19	D2 ar-br	2	0.2	1.532	0.153	0.386	0.039
20	D2 nr	1E-09	1E-09	1.369E-08	1.369E-08	1.914E-09	1.914E-09
21	D 1-2	2	0.2	2.730	0.27	2.896	0.290
22	O-S2	2	0.2	1.527	0.153	0.488	0.049
23	O-S	1E-09	1E-09	7.516E-10	7.516E-10	7.501E-10	7.501E-10
24	Cm	1	0.5	1.563	0.782	6.467	3.233
25	infīltrācija	6.37E-05 mm/s		5.25E-04 mm/s		7.21E-05 mm/s	

Bakalaura darbs "Baltijas artēziskā baseina hidroģeoloģiskā modeļa kalibrācija" ir izstrādāts LU Fizikas un matemātikas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums izveidots patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autore: Ilze Stankevica

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai.

Vadītājs: Dr. Phys. Jānis Virbulis

Recenzents: asoc. profesors, Dr. Phys. L. Buligins

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā

Metodiķe:

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

Komisijas sekretārs: docents Dr. Phys. I. Driķis