

Automation of the Creation of Hydrogeological Data Profiles for Groundwater Systems

Pazemes ūdens sistēmu griezumu izveidošanas automatizācija

Kaspars Krauklis

Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, Latvija

Kopsavilkums – Hidroģeoloģiskā modeļa (HM) informācijas grafiskais attēlojums ietver sevī sākotnējo datu un modelēšanas rezultātu kartes atsevišķos modeļi iekļautos slāņos un arī vertikālo griezumu karšu veidā. Vertikālo griezumu kartes ne tikai satur datu apkopojumu atsevišķos HM slāņos, bet arī spēj attēlot starpslāņu mijiedarbību un parādīt tās iemeslus. Diemžēl ne modelējošās vides, ne ģeoloģiskās informācijas apstrādes sistēmas nepiedāvā šādu vertikālo griezumu kvalitatīvu ieguvī gar brīvi izvēlētu līniju. Tajā pašā laikā vertikālie griezumi ir vērtīgs lēmumu pieņemšanu atbalstošs rīks komerciālu lokālu HM izveidē – piesārņojuma kustības, sanitāro zonu, būvbedru atsūkņēšanas režīmu u.c. ar pazemes ūdens kustību saistītu uzdevumu risināšanai. Vertikālie griezumi reģionālo modeļu gadījumā ļauj labāk novērtēt pazemes ūdens kustības procesus plašākā teritorijā un ir arī lielisks diagnosticējošs rīks HM uzturēšanai un attīstībai. Mēģinājumi iegūt kvalitatīvu vertikālo griezumu atduras pret virkni problēmu, kas saistītas ar datu ieguvī, apstrādi un attēlojumu, un dažas no tām ir aprakstītas un risinātas šī raksta ietvaros. Ūdens līmeņu un vertikālās infiltrācijas izolīniju karšu ieguve ir uzskatāma par komplikētāko vertikālo griezumu izveidē. Problēmas risinājums reducējas līdz atbilstošai sākotnējo datu piesaistei un selektīvai interpolācijai, kas aprakstīta šajā rakstā. Kopumā darbs apraksta atsevišķus risinājumus, kuru pilna automatizācija jau veikta Rīgas Tehniskās universitātes Vides Modelēšanas centra izstrādē.

Atslēgas vārdi – Hidroģeoloģiskais modelis, interpolācija, LAMO, vertikālie griezumi.

I. IEVADS

Hidroģeoloģiskā modeļa (HM) vertikālie griezumi (VG) sniedz apkopotu informāciju par slāņu ģeometriju, ūdens līmeņiem un ūdens plūsmu gar izraudzīto griezuma līniju. HM VG ir karte, kas grafiski apraksta hidroģeoloģisko situāciju griezuma vietā. Tā kā VG attēlo modeļa datus no visiem HM slāņiem, tad šādas kartes sniedz informāciju par modelēto ūdens plūsmu izmaiņām starp slāņiem un iemesliem, kādēļ šādas izmaiņas ir notikušas. Līdz ar to VG kalpo par rīku, kas modelētājam un arī modelēšanas darbu pasūtītājam sniedz pamatojumu modelī ietvertu dabas procesu norises interpretācijai un ar to saistīto lēmumu pieņemšanai. VG izveides tematika apskatīta jau iepriekš rakstā [1], taču šajā rakstā ir apkopotas jaunākās atziņas un risinājumi, kuri jau ir realizēti automatizētas sistēmas veidā.

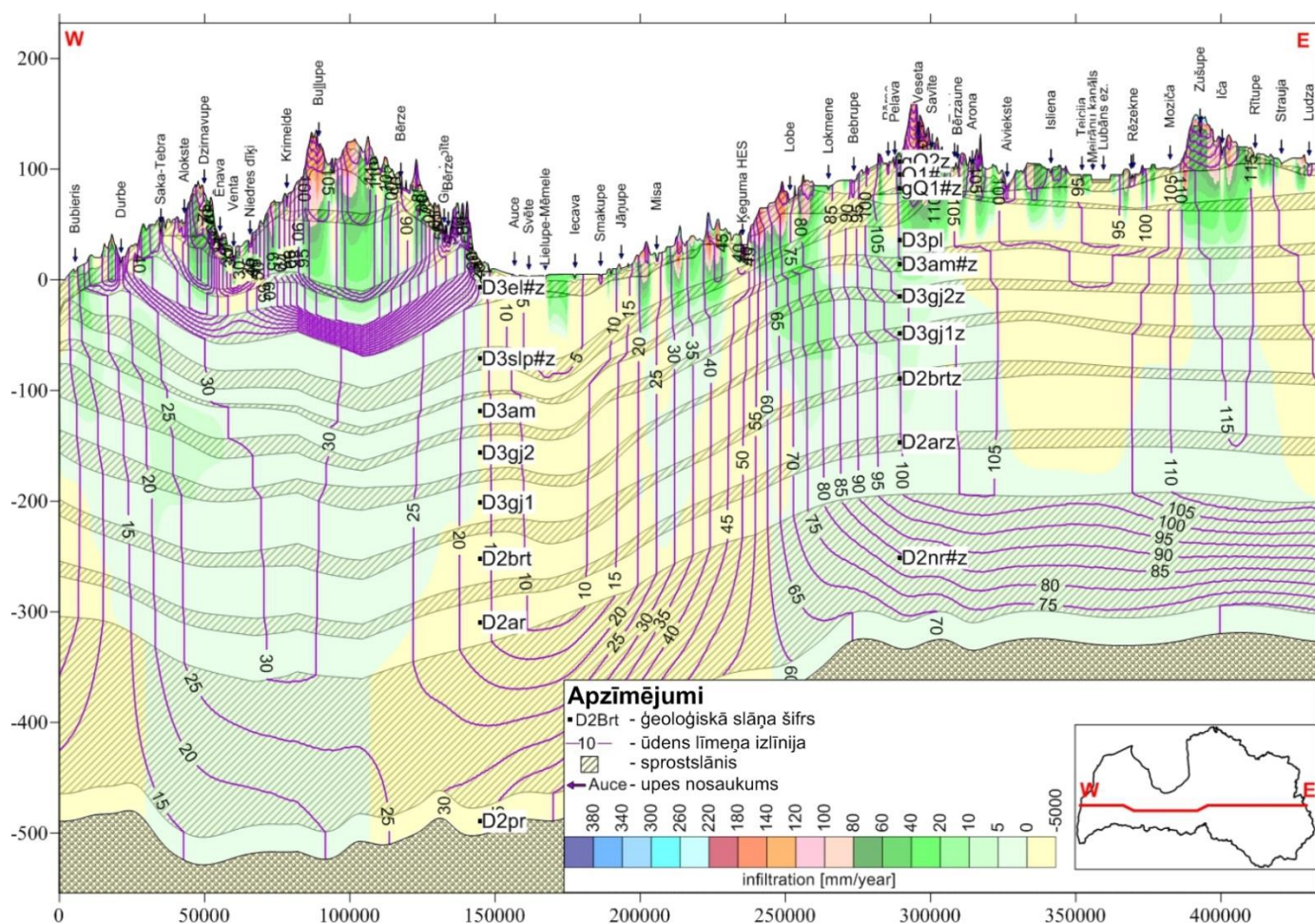
Neskatoties uz to, ka VG izveidē tiek izmantoti esošie dati par slāņu ģeoloģisko biežumu un novietojumu, kā arī dati par modelētajiem ūdens līmeņiem un plūsmām atsevišķos HM mezglos, lai iegūtu VG attēlojumu, tiek veikta ietilpīga šo sākotnējo datu apstrāde. HM dati tiek eksportēti, un no šiem datiem, kā arī no modelī neietilpstošās datu kopas tiek izdalīti atsevišķam VG nepieciešamie dati un veikta izolīniju kartes interpolācija, VG ietilpstošo karšu apvienošana un noformēšana.

Rīgas Tehniskās universitātes Vides Modelēšanas centrs (VMC) izstrādā hidroģeoloģiskus modeļus programmatūras “Groundwater Vistas” (GV) vidē [2]. Modeļa ieejas dati un modelēšanas rezultāti pamatā ir ar taisnstūra režģa struktūru ikvienam HM iekļautajam slānim. VG izveidē izmantoto algoritmu realizācija ir atkarīga no kopumā izmantotajām platformām un pieejamajiem līdzekļiem. Par HM paraugu turpmākā izklāstā tiks izmantots reģionālais HM LAMO-4 [3], ar ko tiek modelēta gada vidējā hidroģeoloģiskā situācija Latvijas teritorijā, ar modeļa kopējo izmēru $1900 \times 1200 \times 27 = 61,56 \times 10^6$ režģa mezglu, ar HM režģa plaknes aproksimācijas soli 250 metri.

Par vertikālā griezuma paraugu tiks izmantots VG W-E (1. att.). Šī griezuma līnija šķērso Latvijas teritoriju vidienē no rietumu robežas līdz austrumu robežai, novirzoties Zemgales daļā no koordinātes $Y = 290\,000$ LKS-92 sistēmā par 10 km. Šis griezums tajā iekļauto elementu ziņā ietver:

- ģeoloģiskā griezuma karšu kopu 27 slāņiem;
- ūdens līmeņu izolīniju karti;
- ūdens plūsmu vertikālās infiltrācijas izolīniju karti;
- novietotus ģeoloģisko slāņu šifru datus;
- novietotus ar VG krustojušo virszemes upju un ezeru nosaukumus;
- kartes paskaidrojumu bloku ar VG izmantoto elementu aprakstu un griezuma topogrāfisko novietojumu.

Neviens no iepriekš minētajiem elementiem nav tieši eksportējams no HM. Tajā pašā laikā šāda VG manuāla izveide ar esošo algoritmu prasītu vairākas dienas darba vienam speciālistam. Šīs situācijas risinājums ir maksimāls automatizācijas pielietojums VG izveidē.

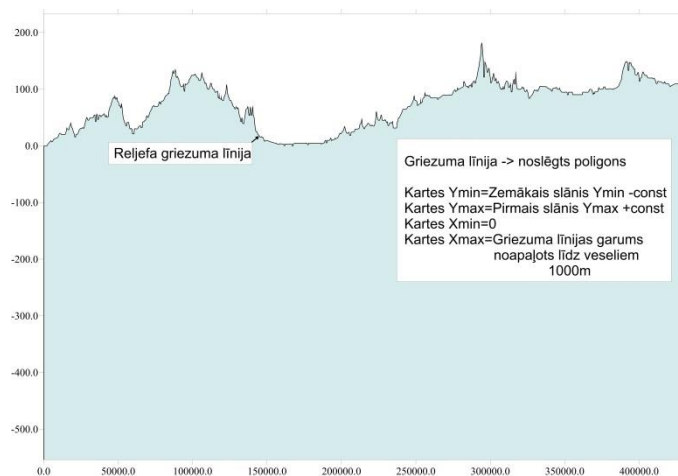


1. att. HM LAMO-4 vertikālais griezumā W-E.

II. ĢEOLOĢISKĀ GRIEZUMA KARŠU KOPA

Ģeoloģiskā VG izveidei ir nepieciešami HM ģeoloģisko virsmu dati. Šo datu ieguvei no HM ir pieejams datu eksports pa atsevišķiem slāņiem vai arī visu slāņu datu eksports 2D matricas veidā teksta failā. Pēdējā gadījumā ir jāizstrādā speciāla programmatūra, lai nodrošinātu datu kopas, kura satur tikai slāņu virsmu vērtības, sadalīšanu pa ģeoloģiskajiem slāņiem un koordinātu piešķiršanu vērtībām katrā mezglā. Pamatā ģeoloģisko datu virsmas ir pieejamas modeļa izstrādātājam kā modeļa sākotnējie dati, kuri modelēšanas simulāciju laikā nemainās. Eksportējot atsevišķa ģeoloģiska slāņa virsmu, tiek iegūta XYZ kopa. Griezumā līnija ieguvei nepieciešama virsmas datu lineāra interpolācija uz griezumā līnijā iekļautajām punktu koordinātēm. To ir iespējams realizēt, izstrādājot šim nolūkam speciālu programmatūru vai arī izmantojot jau gatavas izstrādnes. Griezumā datu iegūšanai iespējams izmantot "GoldenSoftware Surfer" [4] operāciju "GridSlice". Tā kā "Surfer" programma satur automatizācijas līdzekļus, visas ar virsmu apstrādi saistītās funkcijas ir iespējams noformēt ar "Scripter" interpretatoru izpildāmu skriptu failos. Ģeoloģiskās virsmas griezumā līnija ir noformējama kā poligons. Noslēgtas līnijas priekšrocības ir VG

kartes noformējuma uzdošanā. Arī VG kartes attēlojuma noformēšanā iespējams izmantot jau gatavus "Surfer" sistēmas līdzekļus. HM augšējā slāņa VG un apakšējā slāņa VG (2. att.) nosaka kartes vertikālo izmēru [m vjl], ņemot vērā HM augšējā slāņa VG augstāko punktu un zemākā slāņa zemāko punktu.



2. att. Reljefa griezumā līnija.

III. ŪDENS LĪMEŅU IZOLĪNIJU KARTES

Ūdens līmeņu izolīniju karte sniedz informāciju par ūdens līmeni VG attēlotajos slāņos, kā arī sniedz priekšstatu par starpslāņu pazemes ūdens līmeņu izmaiņām (1. att.). Tāda karte satur jaunus apkopotus datus un nav iegūstama tiešā veidā no HM Modflow [5] GV modelējošās sistēmas. Katram modeļa slānim ikvienā šūnā tiek aprēķināti ūdens līmeņi, un tie ir eksportējami virsmu veidā. VG griezuma datu iegūšanai ir iespējams izmantot "Surfer GridSlice" operāciju. Šādi iegūtiem datiem būtu jāatrodas izvēlētajā slāņa viduspunktā, kas ir patiesā šo modelēšanas rezultātu atrašanās vieta modelī – modeļa šūnas vidū. Griezuma līnijām pa ūdens līmeņu virsmām nav sasaistes ar ģeoloģiskā griezuma datiem. Lai veiktu šādu sasaisti, būtu nepieciešams atrast ģeoloģiskā slāņa viduslīnijas Z koordināti pēc formulas (1) un nomainīt Z koordinātes ūdens līmeņu VG datiem:

$$Z_{\text{viduslīnija}} = (Z_i \text{ slānim} + Z_{i+1} \text{ slānim})/2. \quad (1)$$

Izstrādājot izolīniju karti, ir jānodrošina taisnstūra režģa plaknes aproksimācijas solis un jāaprēķina režģa izmēri ar nepieciešamo režģa mezglu skaitu L (garums) un Z (augstums) virzienā. VG gadījumā garums ir jāsamazina vismaz līdz pilnam modeļa režģa plaknes aproksimācijas solim; LAMO-4 gadījumā tie ir 250 m. Mazāka soļa, nekā tas ir HM, izvēle L virzienā neuzlabo VG precizitāti, taču lielāks izvēlētais solis var samazināt precizitāti. VG augstumu ierobežo ģeoloģisko slāņu

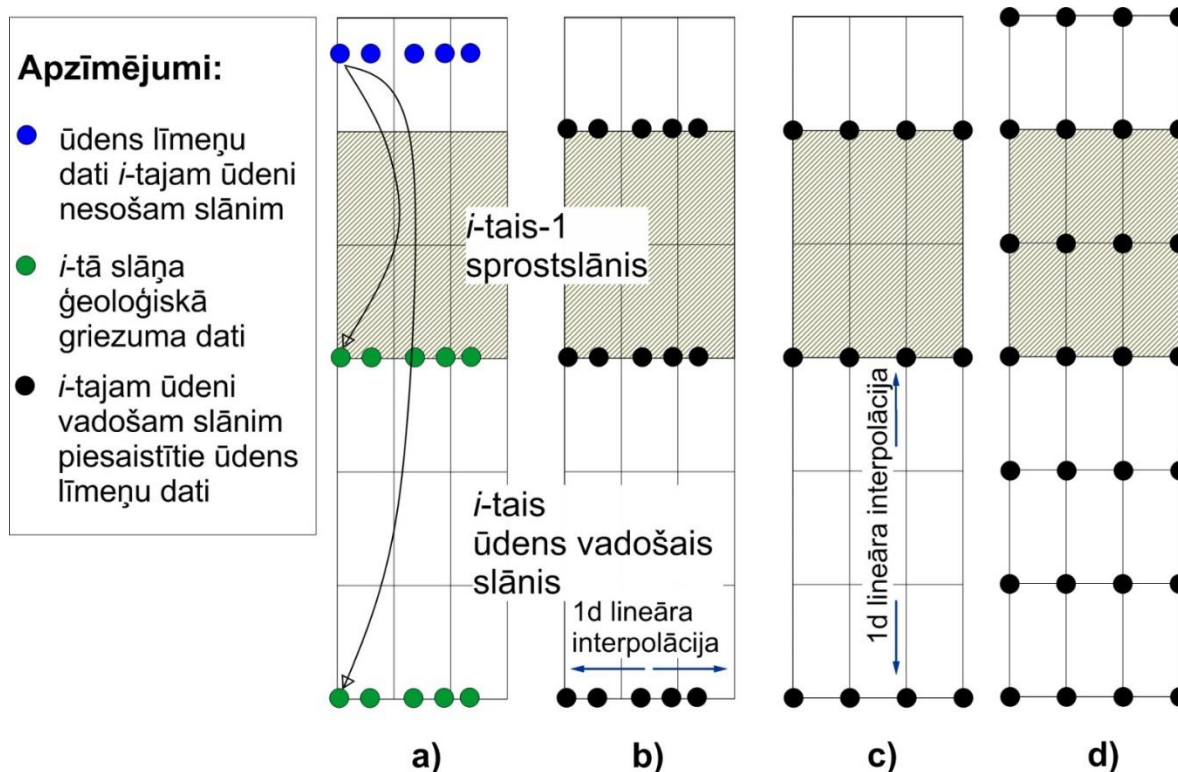
griezuma maksimālā un minimālā vērtība. Vertikālās VG aproksimācijas solis ir 0,5 m, kas nodrošina pietiekami augstu detalizāciju izolīnijām vertikālajā griezumā gan LAMO-4, gan lokālo modeļu gadījumā.

Ņemot vērā, ka atsevišķā ūdens nesošā slānī ūdens līmenis ir praktiski vienāds, tad ūdens līmeņu griezuma datu piesaiste pie ģeoloģiskā slāņa vidus nav pietiekama situācijā, kad slāņa vertikāle aptver vairākus režģa mezglus. Līdz ar to ūdens līmeņa vērtība ir jāpiesķir katram atsevišķā slāņa mezglam pa vertikāli, tieši vai interpolējot. Sprosts slāņos datiem nav reālu mērījumu kvalitātes, un tie ir nevadoši horizontālā virzienā. Līdz ar to sprotslāņu dati nav izmantojami ūdens līmeņu VG izolīniju kartes iegūšanai.

Ūdens līmeņu izolīniju kartes izveides algoritms redzams 3. attēlā, kur ietverti četri soļi:

- i -tā ūdens slāņa ūdens līmeņu vērtību sasaiste ar i -tā ģeoloģiskā slāņa augšas un apakšas koordinātēm;
- piesaistīto ūdens līmeņu vērtību lineāra interpolācija L virzienā;
- i -tā ūdens slāņa ūdens līmeņu konstanto vērtību piesķiršana Z virzienā i -tā slāņa ietvaros;
- j -tā sprotslāņa ūdens līmeņu vērtību lineāra interpolācija Z virzienā, izmantojot $j-1$ un $j+1$ ūdens slāņu datus pa vertikāli.

Izstrādājot ūdens līmeņu izolīniju kartes, tika izmēģinātas "Surfer" sistēmā esošās interpolācijas metodes "Nearest Neighbour" un "Inverse Distance To Power" [6].



3. att. Ūdens līmeņu datu interpolācija.

Izmantojot šīs metodes, neizdevās pilnībā novērst izolīniju defektus ūdens slāņu daļā, kur kontūrlīnijai jābūt vertikālai, un sprostslnāņu daļā, kur izolīnijām jābūt vienmērīgi sadalītām pa horizontāli. Tajā pašā laikā “Inverse Distance To Power” interpolācijas metodes izmantošana ar pielāgotu mezglu meklēšanas rādiusu var būt saprātīgs kompromiss gadījumos, kad nav iespēju pilnībā realizēt 3. attēlā atveidoto algoritmu.

IV. INFILTRĀCIJAS UN BTA KONTŪRKARTES

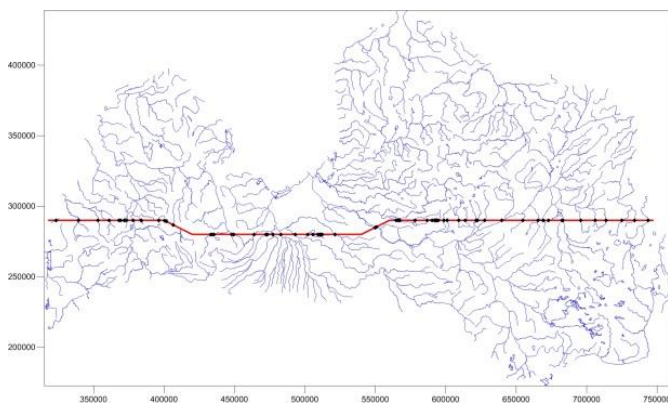
Ūdens plūsmu vertikālās infiltrācijas kontūrkartes iegūšanai nepieciešamie dati tiek ņemti tikai no HM sprostslnāņiem. Ūdens plūsmu pa vertikāli nosaka vertikāles nevadošākie posmi. Sprostslnāņa vertikālā infiltrācija, izmantojot aizkrāsotu kontūru, parādīta 1. attēlā. Tā kā ūdens nesošajam slānim blakus esošie sprostslnāņi ir ar atšķirīgām infiltrācijas vērtībām, tad ūdens nesošā slāņa infiltrācija ir mainīgs lielums. Infiltrācijas kontūrkartes izveides algoritms ir līdzīgs ūdens līmeņu kontūrkaršu izveides algoritmam:

- j -tā sprostslnāņa infiltrācijas vērtību sasaiste ar j -tā ģeoloģiskā slāņa augšas un apakšas koordinātēm;
- piesaistīto sprostslnāņa infiltrācijas vērtību lineāra interpolācija L virzienā;
- j -tā sprostslnāņa infiltrācijas vērtību konstanto vērtību piešķiršana Z virzienā i -tā slāņa ietvaros;
- i -tā ūdens nesošā slāņa infiltrācijas vērtību lineāra interpolācija Z virzienā, izmantojot $i-1$ un $i+1$ sprostslnāņu datus pa vertikāli.

Šis algoritms ir izmantojams arī “Barošana-Tranzīts-Atslodze” (BTA) VG izolīniju karšu izveidei, infiltrācijas griezumam datu vietā izmantojot r funkcijas kartes griezumam datus, kas detalizēti skatīti rakstā [7].

V. VIRSRĀKSTI UN ĢEOLOĢISKO SLĀŅU ŠIFRI

VG karte pamatā ietver sevī datus, kuri ietver attālumu no griezumam līnijas sākuma [m] L virzienā un augstumu [m vjl] Z virzienā. Šādam attēlojumam nav tiešas saiknes ar topogrāfisko koordinātu sistēmu. Viens no iespējamiem veidiem, kā sasaistīt VG ar virszemi, ir atrast un uz kartes attēlot griezumam līnijas krustpunktus ar virszemē esošajiem objektiem. LAMO-4 gadījumā pie šādu virszemes objektu kopas pieder upes un ezeri (4. att.).



4. att. W-E griezumam krustpunkti ar LAMO-4 hidrogrāfisko tīklu.

Šajā virszemes objektu kopā var ietilpt arī pilsētas, pagasti, rūpnīcas un nozīmīgi valsts ceļi. Ģeometriski šie objekti ir līnijas, kuras sastāv vismaz no diviem koordinātu punktiem (L_0, Z_0, L_1, Z_1). Arī griezumam līnija satur vismaz divus punktus (L_2, Z_2, L_3, Z_3). Caur diviem uz līnijas blakus esošiem punktiem ir iespējams sastādīt taisnes vienādojumu. Divu taisņu krustpunktu ir iespējams noskaidrot, atrisinot vienādojumu sistēmu (2):

$$\begin{cases} (L - L_1)/(L_0 - L_1) = (Z - Z_1)/(Z_0 - Z_1) \\ (L - L_3)/(L_2 - L_3) = (Z - Z_3)/(Z_2 - Z_3) \end{cases} \quad (2)$$

Atrastās krustpunkta koordinātes (L, Z) var novērtēt, vai tās atrodas starp griezumam līnijas izvēlētajiem punktiem. Viens no iespējamajiem veidiem ir pārbaudīt vienādību (3):

$$\begin{aligned} & \sqrt{(L_2 - L)^2 + (Z_2 - Z)^2} + \sqrt{(L_3 - L)^2 + (Z_3 - Z)^2} = \\ & = \sqrt{(L_2 - L_3)^2 + (Z_2 - Z_3)^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Alternatīvs risinājums šai operācijai būtu izmantot jau gatavus ģeotelpisko datu apstrādes līdzekļus, piemēram, *ESRI* “ArcGIS” sistēmu [8], kurā krustpunktu atrašanai ir pieejams rīks “Intersect”, taču tādā gadījumā objektiem jābūt noformētiem *ESRI* “Shapefile” formātā.

Atrastajam krustpunktam ir jāzina VG koordinātes. Pa L tās ir attālums no griezumam līnijas sākumpunkta, savukārt Z koordinātes pamatā tiek izmantota HM augšējā ģeoloģiskā slāņa punkta Z vērtība jau aprēķinātajā attālumā no griezumam līnijas sākumpunkta.

Ģeoloģiskā slāņa šifra uzdošana uz VG kartes nepieciešama, lai uzlabotu kartes lasāmību. HM modelī *GV* vidē netiek glabāta informācija par slāņu nosaukumiem; zināmi ir tikai slāņu kārtas numuri. Sasaistot slāņa kārtas numuru modelī ar slāņa ģeoloģisko šifru, izvēlētajā attālumā no VG sākuma tiek aprēķināts slāņa viduspunkts, izmantojot formulu (1).

VI. AUTOMATIZĀCIJAS RISINĀJUMI

VMC izmantotajā griezumam izveides sistēmā pilnībā tika automatizēta VG kartes izveide no nepieciešamo karšu – ģeoloģisko, ūdens līmeņu un ūdens plūsmu – ieguves jebkuram HM, kas izstrādāts *GV* vidē, līdz pat sagatavoto līniju, kontūrkaršu un uzrakstu apvienošanai un noformēšanai VG kartes veidā. Attiecībā uz 1. attēlu, var teikt, ka raksta tapšanas brīdī vienīgais ar programmatūru neautomatizētais bloks ir apzīmējumu daļa un karte ar VG atrašanās vietu.

Šī kompleksā uzdevuma izpildei tiek izmantotas “Surfer” programmas iespējas, iesaistot “Scripter” izpildāmos skriptus, *USGS* “GW_Chart” programmu [9] “Modflow” aprēķināto HM plūsmu eksportam, vadības failu kopu un VMC izstrādātās programmas datu interpolācijai, apstrādei un datu formātu konversijai. Programmatūras turpmākā attīstība saskatāma šādos virzienos: veikspējas paaugstināšana, programmatūras nošķiršana no komerciālās “Surfer” vides, *web* interfeisa izveide reģionālajam HM LAMO un jaunas funkcionalitātes pievienošana – vertikālā griezumam izveide atsevišķā uzdotā

punktā. Šo uzdevumu realizācija ir tieši atkarīga no tam nepieciešamā mērķfinansējuma.

VII. SECINĀJUMI

Apkopotas būtiskākās problēmas un to risināšanas algoritmi hidrogeoloģisko modeļu vertikālo griezumņu izveidē. Komplicētākā no tām – ūdens līmeņu izolīniju kartes iegūšana, kas atrisināta ar šī raksta trešajā nodaļā aprakstītu oriģinālu lineāras interpolācijas algoritmu. Visi aprakstītie algoritmi ir praktiski realizēti programmatūras veidā, tādējādi automatizējot hidrogeoloģisko modeļu vertikālo griezumņu izveidi.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] A. Spalviņš, J. Šlangens, O. Aleksāns, I. Lāce and K. Krauklis, "Geological profiles as efficient means for expounding results provided by hydrogeological model of Latvia," in *2014 Proc. 14th SGEM Multidisciplinary Scientific Geo-Conference*, vol. 2, pp. 401–408. <https://doi.org/10.5593/sgem2014/b12/s2.052>
- [2] *Environmental Simulations*, Inc. Groundwater Vistas. Version 6, Guide to using, 2011.
- [3] A. Spalviņš, "Latvijas hidrogeoloģiskā modeļa izveidošana Rīgas Tehniskajā universitātē (2010–2015)," *Boundary Field Problems and Computer Simulation*, vol. 55, pp. 5–11, Dec. 2016. <https://doi.org/10.7250/bfpcs.2016.001>
- [4] *SURFER-12 for Windows*, Users manual, Guide to Using, Golden Software Inc., 2015, [Online]. Available: http://downloads.goldensoftware.com/guides/Surfer12_Users_Guide_Priview.pdf
- [5] W. Harbaugh, "MODFLOW-2005, U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model: The Ground-Water Flow Process," *US Geological Survey Techniques and Methods 6-A16*, chap. 16, book 6. Virginia: U.S. Geological Survey, Reston USGS, 2005. <https://doi.org/10.3133/tm6a16>
- [6] J. C. Davis, "Statistics and Data Analysis in Geology," New York, USA: John Wiley and Sons, 1986.
- [7] A. Spalviņš, K. Krauklis, and I. Lāce, "Finding of Groundwater Recharge, Transit and Discharge Areas," *Boundary Field Problems and Computer Simulation*, vol. 56, pp. 12–16, Dec. 2017. <https://doi.org/10.7250/bfpcs.2017.002>
- [8] *ESRI 2017. ArcGIS Desktop: Release 10.6*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- [9] R. B. Winston, "Graphical User Interface for MODFLOW," Version 4: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-315, 2000.



Kaspars Krauklis received the Master's degree in computer systems from Riga Technical University (RTU) in 2007 and the Certificate in Teaching of Engineering Sciences from the Institute of Humanities of RTU in 2005. He is a Researcher with the Environment Modelling Centre of RTU.

E-mail: kaspars.krauklis@rtu.lv
<https://orcid.org/0000-0002-0138-649X>

Automation of the creation of hydrogeological data profiles for groundwater systems

Kaspars Krauklis

Riga Technical University, Riga, Latvia

The graphical representation of a hydrogeological model includes the initial data maps and simulation result maps for individual layers included in the model and also in the form of profile maps. The latter contains a collection of data not only from individual layers of a hydrogeological model, but also represents interlayer interactions and the reasons for it. Unfortunately, neither modeling environments nor geological information processing systems offer high-quality profiles along a freely chosen line. At the same time, vertical profiles are a valuable decision-making tool in the case of commercial local hydrogeological models, by which it simulates contamination movements, calculates sanitary zones, excavations, and other tasks related to the groundwater flow. Vertical profiles in the case of regional models allow better assessment of groundwater flow processes in a wider area, and they can be used as an excellent diagnostic tool for the maintenance and development of hydrogeological models. Attempts to obtain a qualitative vertical profile encounters with series of problems with data mining, processing, and displaying, some of which are described and addressed within the current article. The extraction of water levels and vertical infiltration isoline contours is considered to be more difficult in the creation of a vertical profile. The solution to the problem is reduced to the appropriate initial data acquisition and selective interpolation described in this article. In general, the article describes individual solutions, which have already been fully automated in the RTU Environmental Modeling Centre.

Keywords – Geological profiles, hydrogeological model, interpolation, LAMO.