

Rīgas Tehniskā universitāte

VIDES MODELĒŠANAS

CENTRS

**Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa
LAMO4 pielietošana piesārņojuma
kustības prognozei un analīzei**

*Piesārņojuma kustības trajektorijas un
kustības laika aprēķins*

Latvijas vides aizsardzības fonda projekts

(reģistrācijas numurs: 1-08/58/2022),

kuru īsteno Rīgas Tehniskās universitātes

Vides modelēšanas centrs

Projekta informatīvais pārskats

Rīga – decembris, 2022

Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa LAMO4 pielietošana piesārņojuma kustības prognozei un analīzei

Piesārņojuma kustības trajektorijas un kustības laika aprēķins

Projekta informatīvais pārskats par 1. etapu

Atskaitē ir aprakstīts piesārņojuma kustības modelēšanas simulācija visai Latvijas teritorijai, un tālāka iegūto datu matemātiska apstrāde. Ar iegūtiem datiem izveidotas LAMO4 mezglu datu tabulas, kas satur informāciju par ūdenī šķīstošā piesārņojuma ceļu no virszemes līdz gruntsūdeņiem, līdz pamatiežu ūdeņiem un līdz piesārņojuma galmērķim – atsevišķam pazemes slānim, ezeram, upei vai jūrai.

Pārskatā kopā ir 13 lappuses, 5 attēli un 2 tabulas.

Zin. vadītājs Dr.math. I. Eglīte, RTU VMC, decembris, 2022.

Izpildītāji: Mg.sc.ing. K. Krauklis, Mg.sc.ing. I. Lāce

Adrese:

Rīgas Tehniskā universitāte, Vides modelēšanas centrs

Zunda krastmala 10, Rīga, LV-1048, Latvija

Tālr. +371 22023316, +371 67089511

E-pasts: Irina.Eglite@rtu.lv

URL: <http://www.emc.rtu.lv/>

Saturs

1	Ievads.....	2
2	LAMO4 uzbūve.....	3
3	MODPATH datu modelis.....	4
4	Modelēšanas rezultāti.....	6
5	Modelēšanas rezultātu apstrāde.....	7
6	Rezultātu tabula.....	9
7	Secinājumi.....	10
8	Literatūras saraksts.....	11

1 Ievads

Latvijas reģionālais hidroģeoloģiskais modelis LAMO ar tā izstrādē iekļautiem LGIA, LVGMC un zinātniskā literatūrā iegūtiem datiem kopā ar modelēšanas rezultātā iegūto apraksta pazemes ūdens plūsmu, tās gada vidējās vērtības ikvienā valsts teritorijas daļā. Tā kā Groundwater Vistas [1] modelējošā vide satur apjomīgu modelēšanas līdzekļu kopu ne tikai ūdens plūsmas matemātiskam aprēķinam, bet arī tajā nonākušā piesārņojuma izplatības modelēšanai. Esošā projekta ietvaros tiek mēģināts atbildēt uz jautājumiem par piesārņojuma kustības virzienu, izplatības ātrumu un piesārņojuma koncentrācijas izmaiņām.

Pirmā etapa ietvaros tiek noteikts:

1. Cik ilgā laikā piesārņojums no virszemes nonāks kvartāra slānī (Q2).
2. Cik ilgā laikā piesārņojums no virszemes nonāks pamatiežu horizontā, kā arī tā koordinātes.
3. Piesārņojuma kustības kopējais laiks modelī, galapunkta koordinātes, un nosaukums, gadījumā, ja piesārņojuma galamērķis ir ezers, upe vai jūra.

Ņemot vērā LAMO reģionālo dabu, reālais piesārņojuma kustības virziens un laiks var atšķirties. Tomēr, piesārņojumam nonākot virszemē, iegūtie modelēšanas rezultāti sniegtu sākotnējo prognozi par tā tālāko izplatību. Modelēšanas rezultāti tiek apkopoti ikvienai Latvijas vietai ik pēc 250 metriem. Modelēšanā netiek iekļautas vietas, kurās LAMO4 modelī atrodas jūra, upes vai ezeri, t.i. hidrogrāfiskais tīkls, ūdens kustība tajā netiek pētīta ar esošiem modelēšanas līdzekļiem.

Pirmajā etapā tiek veikta MODPATH [2] simulācija. Ar tās palīdzību izvēlētās vietās novietotie matemātiskie punkti – ūdens piles bez svara un tilpuma pārvietošanas līdz ar pazemes ūdens plūsmu, to kustības trajektorija un patērētais laiks tiek fiksēti. Kopumā, šajā etapā ietverti – MODPATH modeļa izveide un simulācija, datu apkopošanai nepieciešamās pētnieciskās datorprogrammas izstrāde un pielietojums, un iegūto datu imports MS ACCESS datu bāzē.

2 LAMO4 uzbūve

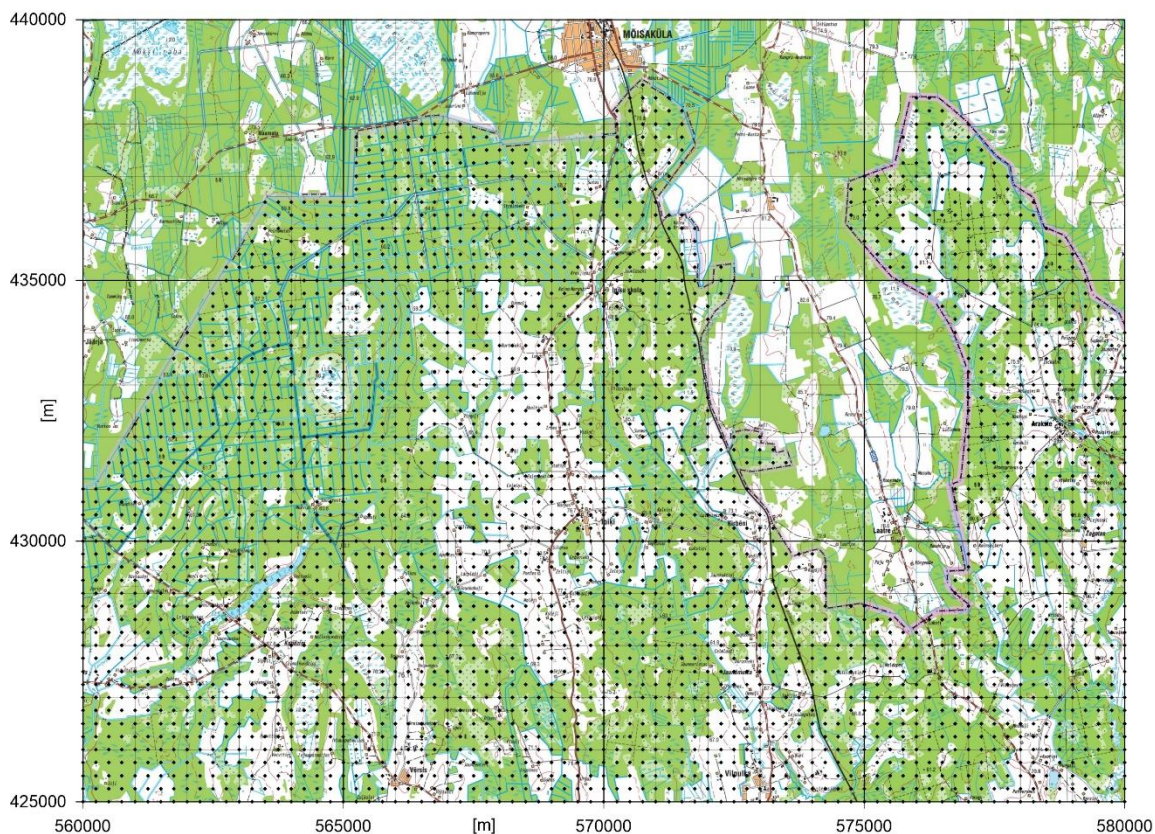
Latvijas reģionālais hidroģeoloģiskais modelis LAMO, tā 4. versija ir vispilnīgākā datu krātuve par ģeoloģisko slāņu ģeometriju un filtrācijas īpašībām, pazemes ūdens līmeņiem un plūsmām, pazemes un virszemes ūdens (upju, ezeru, jūras) mijiedarbību. LAMO modelis apraksta gada vidējos Latvijas hidroģeoloģiskos apstākļus un modelē aktīvo pazemes dzeramā ūdens zonu. LAMO ietver 27 slāņus, no reljefa līdz D2pr slānim, skat. Tabula 2.1. Kopējais modeļa šūnu skaits $27 \times 1200 \times 1800 = 61.56$ miljoni šūnu, no kurām aktīvajā zonā ir aptuveni puse. Vairāk par LAMO mājaslapā http://www.emc.rtu.lv/lamo_lv.htm un modelim veltītās publikācijās [3] un [4].

Tabula 2.1. LAMO4 vertikālā stratigrāfija

HM slāņa Nr.	*	Slāņa nosaukums	HM slāņa kods	Laukums, tūkst. km ²	m_{vid} , m
1		Reljefs	relh	71,29	0,02
2		Aerācijas zona	aer	71,29	0,02
3		Bezspiediena kvartārs	Q2	71,29	5,77
4		Augšējā morēna	gQ2z	71,29	22,20
5		Spiediena kvartārs	Q1#	7,4	6,13
6		Apakšējā morēna	gQ1#z	9,7	9,3
7		Ketleru	D3ctl#	5,32	61,46
8		Ketleru	D3ctlz	5,79	10,52
9		Zagares	D3zg#	7,43	42,65
10		Akmenes	D3akz	7,95	11,05
11		Kursas	D3krs#	9,34	22,34
12		Elejas	D3el#z	9,24	27,58
13		Daugavas	D3dg#	32,14	30,37
14		Salaspils	D3slp#z	35,78	12,67
15		Plavīnu	D3pl	43,80	22,76
16		Amatas	D3am#z	45,14	8,97
17		Amatas	D3am	46,21	21,91
18		Upper Gauja	D3gj2z	48,80	11,62
19		Upper Gauja	D3gj2	50,92	26,34
20		Lower Gauja	D3gj1z	53,11	13,17
21		Lower Gauja	D3gj1	56,13	31,55
22		Burtnieku	D2brtz	58,09	15,41
23		Burtnieku	D2brt	68,74	45,02
24		Arikula	D2arz	68,74	15,02
25		Arikula	D2ar	68,74	40,03
26		Narva	D2nr#z	71,29	116,67
27		Pernava	D2pr	71,29	25,00

3 MODPATH datu modelis

Modelēšanas eksperimentā tiek iekļauti ikviena LAMO aktīvās daļas mezgla koordinātes, uzdodot tās kā modelējamo daļiņu trajektorijas sākumpunktus. Sākotnējā daļiņu kopā tiek iekļautas vairāk kā 1.1 milj. daļiņu. Kopējo pārklājumu Latvijas teritorijā var redzēt 3.1. att., daļiņas ir izvietotas ik pēc 250 metriem.



3.1. att. Daļiņu pārklājums Ipiķu apkārtnē, Latvijas ziemeļos

Tajā pat laikā sākotnējā datu kopa iekļauj arī tās daļiņas, kas atrodas uz upēm, ezeriem un jūras. Visi šie hidrogrāfiskā tīkla objekti hidroģeoloģiskā modelī kalpo par robežnoteikumiem, ar tiem uzdoto ūdens līmeni ikvienā piesaistes mezglā ietekmējot ūdens līmeņus ūdeni vadošiem slāņiem. Daļiņa, savā trajektorijā atduroties robežnoteikumu datiem, savu kustību beidz. Līdz ar to daļiņas novietošana uz upes ezera vai jūras modelēšanas eksperimenta gaitā beigs savu kustību neuzsāks. Eksperimentam nederīgo daļiņu atdalīšana bez speciāli tam paredzētas, izstrādātas datorprogrammas vai skripta ir apgrūtināta. Ņemot vērā to, ka modelēšanas datu pēcapstrādei arī ir nepieciešama programmatūra, modelēšanas eksperimentam nederīgo daļiņu atdalīšana tika šīs, vēlākā stadijā nepieciešamās datorprogrammas ietvaros.

Bez koordinātu kopas izveides būtisks ir arī daļiņu izvietojums slāņa vertikālē, pirmkārt jau paša modeļa slāņa izvēle. 2021.-2022. gados Vides Modelēšanas centra realizētā LVAF projekta [5] ietvaros pazemes ūdeņu aizsargātības kartes izveidei tika lietots MODPATH eksperiments visai Latvijas teritorijai, par sākumpunktu daļiņām izvēloties pamatiežu virsmas augšu ar modelēšanu pretēji ūdens plūsmas virzienam modelī. Tas nozīmēja, ka daļiņai patiesībā tika uzdots galapunkts ar modelēšanas simulāciju to virzot uz sākumpunktu. Esošā eksperimenta ietvaros šī pieeja nav attaisnojama, jo pamata izpētes objekts ir ūdenī šķīstošs piesārņojums, kas izlijis, ir nonācis uz zemes virsmas. Šajā gadījumā par loģisku un adekvātu būtu uzskatāma daļiņu novietošana uz reljefa virsmas. Diemžēl, LAMO uzbūve to nepieļauj. Pamata iemesls slēpjas hidroģeoloģisko modeļu izveides specifiskā – modeļa gan augšējā, gan apakšējā slānim tiek piesaistīti robežnoteikumi ikvienā slāņa mezglā – konstants ūdens līmenis. Ņemot vērā iepriekš nodaļā aprakstīto par MODPATH daļiņas kustības nesavietojamību ar modeļa mezglā piesaistītiem robežnoteikumiem, daļiņu ievietošanai modeļa pirmajā slānī nav nozīmes. Nākamais slānis ir aerācijas zona, kas viennozīmīgi varētu būt atbilstošais slānis daļiņu novietošanai. Tā kā modeļa pamatdaļā reljefa slāņa biezums ir 0.02 m, tad daļiņas novietošana aerācijas zonas augšpusē ir ekvivalenta daļiņas novietošanai uz reljefa. Diemžēl, iedziļinoties LAMO izbūves specifiskā, var secināt, ka arī šī pieeja ir nederīga. Aerācijas zona LAMO modelī ir definēta kā sprostslānis, kura filtrācijas koeficients kalibrē modeļa virszemes pieteci caur nokrišņiem un iztvaikošanu. Līdz ar to ir iespējams izmantot vien aerācijas zonas apakšu vai arī kvartāra slāņa Q2 augšu kā MODPATH daļiņu sākuma atrašanās vietu. Tas nozīmē, ka faktiski piesārņojuma kustības aprēķinam no reljefa līdz kvartāra slānim ir nepieciešams atsevišķs matemātisks aprēķins, ņemot vērā zināmo aerācijas zonas biezumu un pieņemot vidējo augsnes filtrācijas koeficientu vai arī izmantojot augsnes koeficientu karti Latvijas teritorijai.

Papildus tam, arī MODPATH modelēšana ar tik apjomīgu daļiņu kopu ir pilnā apmērā Groundwater Vistas (GV) vidē ir neiespējama. Darbinot šo modelēšanas eksperimentu, programma vienkārši pārtrauc savu darbību. Šī problēma ir sastopama arī aktuālajā GV 8 versijā. Viens no risinājuma veidiem – sadalīt daļiņas uz vairākiem modelēšanas eksperimentiem, bet otrs – darbināt MODPATH bez GV čaulas, kā atsevišķu datorprogrammu.

4 Modelēšanas rezultāti

Modelēšanas simulācijas rezultātā tiek izveidots daļiņu kustības trajektoriju jeb traseru fails, kas ietver sevī informāciju par katras daļiņas kustību – atrašanās vietu koordinātes un augstums (m vjl) izvēlētajā laikā no kustības sākuma, slāņa numurs. Viena trasera eksporta datu fragments redzams 4.1. att., savukārt apskatāmā trasera grafiskais

Particle Number	X	Y	Z	Time	Layer
500578	467500	296750	8.662638	0	2
500578	467500	296750	8.66151	0.774818	3
500578	467625	296769.3	7.07781	1160.383	3
500578	467789.8	296843.5	5.03628	2579.822	4
500578	467789.8	296843.5	-1.15889	7624.079	5

4.1. att. Modpath rezultāta faila fragments

attēlojums uz kartes redzams 4.2. att., kur augšējais skaitlis zilā krāsā ir modeļa slāņa numurs, kurā tajā brīdī ir nonākusi daļiņa, bet apakšējais – ceļošanas laiks gados.



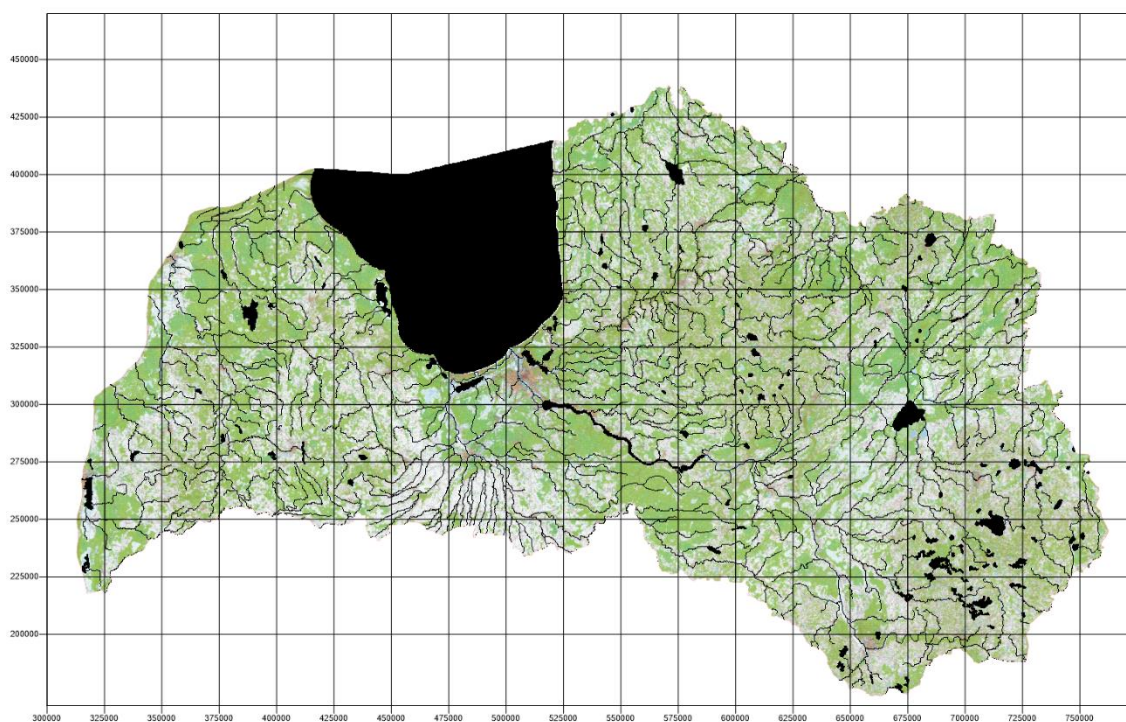
4.2. att. Atsevišķas daļiņas kustības trajektorija blakus Kalnciemam

Apskatāmā daļiņa nogrimst līdz kvartāram Q2 (3. slānis), īsu posmu ceļo tajā, līdz nogrimst līdz D3dg (13. slānis), kurā pavada pamata laiku līdz nonāk zem Vecbēztes apvadkanāla, tad paceļas atpakaļ uz kvartāru, un savu ceļu beidz sastopoties ar robežnoteikumiem, t.i. vienkārši papildinot kanālu. Kopējais daļiņas kustības laiks ir 53 gadi.

5 Modelēšanas rezultātu apstrāde

Modelēšanas rezultātu apkopošanai un papildināšanai tika izstrādāts automatizācijas līdzeklis Fortran (Intel Visual Fortran) programmēšanas valodā sastādīta datorprogramma. Visi tālāk aprakstītie rezultāti iegūti, izmantojot šo automatizāciju.

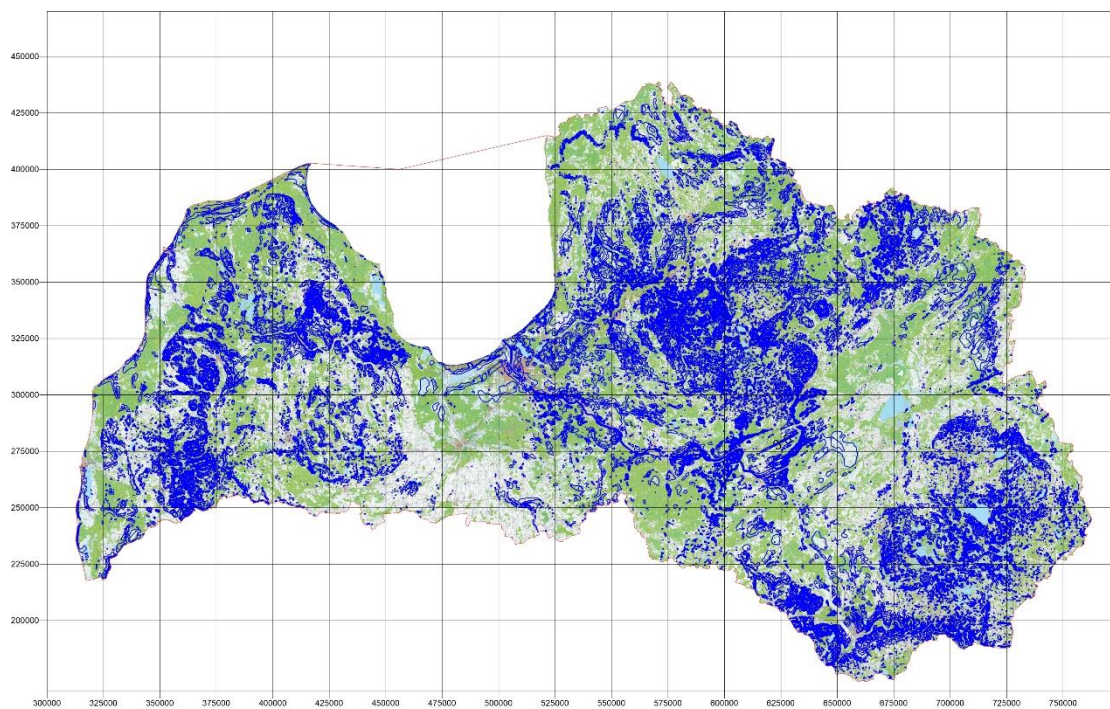
Pirmkārt, tiek atsijātas tās daļiņas, kuru sākuma atrašanās koordinātes sakrīt ar upju, ezeru vai jūras modeļa piesaistes koordinātēm. Atsijāto daļiņu skaits pārsniedz 178 tūkstošus, to grafiskais attēlojums uz kartes redzams 5.1. att. Lai arī pamatā par



5.1. att. Atsijātie traseri, melno punktu kopa uz kartes

nederīgām atzītas daļiņas, kas ir novietotas uz jūras teritorijas, arī sauszemē esošās aizņem ievērojamu platību. Tam par iemeslu ir reģionālā modeļa plaknes režģa aproksimācijas soļa lielums – 250 metri.

Ņemot vērā daļiņu sākumpunktu novietojumu – tiešā saskarē ar kvartāra Q2 slāni, bija nepieciešams aprēķināt daļiņas ceļošanas laiku no zemes virsas jeb reljefa slāņa līdz kvartāram. Risinājumam tika izmantota aerācijas zonas biezuma karte. Kartes izolīnijas skatāmas 5.2. att. Tā kā aerācijas zonas biezuma karte ir jūtami fragmentēta, var minēt, ka minimālais biezums ir 0.04 m, maksimālais biezums 47 m, bet vidējais biezums ir 2.4 m.



5.2. att. Aerācijas zonas biežums

Atbilstoši, pie augsnes filtrācijas koeficienta 0.5 metri diennaktī vietā, kur aerācijas zonas biežums ir 2 metri, ūdenī izšķīdušam piesārņojumam kvartāra Q2 sasniegšanai būs nepieciešams $2:0.5=4$ diennaktis. Ar datorprogrammu tiek atrasts daļiņas sākumpunktam atbilstošais aerācijas zonas biežums, daļiņas ceļojuma laikam tiek pieskaitīts aerācijas zonas šķērsošanai nepieciešamais.

Treškārt, ikvienai daļiņai, atbilstoši sākotnējam projekta uzdevumam, ir jāizdala dati par kvartāra Q2 šķērsošanas laiku, pamatiežu horizonta šķērsošanas laiku un vietu, kā arī trasera galapunkta atrašanās vietu, slāni un kopējo ceļošanas laiku. Papildus tam, gadījumā, ja daļiņa savu kustību beidz kaut kur hidrogrāfiskā tīklā – ezerā, upē vai jūrā, šī objekta nosaukums ir atsevišķi jāiegūst. Daļiņai, piemēram, sasniedzot Lielupi, vienīgā informācija, kas ir pieejama eksportējot datus, ir galapunkta slāņa numurs un koordinātes (4.1. att.). Ar datorprogrammas palīdzību tiek pārbaudīts, vai daļiņas galapunkts atrodas kādā modeļa hidrogrāfiskā tīkla piesaistes vietā. Atbilstības gadījumā, tiek daļiņas galapunktam tiek papildus piešķirts ‘mērķa vietas’ nosaukums, piemēram, Lielupe. Atsevišķi būtu izdalāms jautājums, ja trasera galapunkts atrodas aiz valsts robežas. Tādā gadījumā tiks piešķirta mērķa vieta ar nosaukumu ‘aiz valsts robežas’. Ņemot vērā to, ka LAMO4 modelī faktiski nav pieejama nekāda informācija par hidroģeoloģiskiem apstākļiem ārpus valsts teritorijas, tad šāda trasera turpmāko ceļu nav iespējams izsekot.

6 Rezultātu tabula

Modelēšanas datu apstrādes rezultātā tika izveidota datu bāzes tabula ar 969 tūkstošiem derīgu ierakstu un datu bāzes tabula ar atsijātiem 178 tūkstošiem ierakstu. Pirmās tabulas fragments ir redzams Tabula 6.1.

Tabula 6.1. Daži ieraksti no daļiņu kustības datu bāzes

x sākuma	y sākuma	ceļošanas laiks [dienas]	dziļākais slānis	mērķa slāņa nr.	mērķa vieta	x galapunkts	y galapunkts	laiks sasniedzot Q2 [dienas]	x sasniedzot pamatiežus	y sasniedzot pamatiežus	laiks sasniedzot pamatiežus [dienas]
662500	173000	790	3	1	nav	662749	173139	0	0	0	0
661750	178750	784949	25	3	Daugava	657076	194044	6	661790	178934	77150
673750	174000	1301	3	3	Riču ez.	672734	174375	10	0	0	0
672500	174250	14619	3	1	Riču ez.	672500	174250	4	0	0	0
673250	174250	1351	3	3	Riču ez.	672929	174625	8	0	0	0
673500	174250	1477	3	3	Riču ez.	672917	174625	1	0	0	0

Apskatot pirmo ierakstu, var pamanīt, ka tabulas pēdējās četrās ailēs ir nulles. Ieraksts apliecina, ka ūdenī šķīstošais piesārņojums sasniegs kvartāra ūdeņus tajā pašā dienā. Kolonnā “dziļākais slānis” minēts, ka daļiņas dziļākais sasniegtais slānis ir 3 (kvartārs), tad līdz pamatiežiem, uz ko attiecināmas pēdējās trīs kolonnas, šī daļiņa nenonāk. Daļiņa galarezultātā nonāca iztvaikošanas zonā 1. slānī, vietai nav atsevišķa nosaukuma. Otrā ierakstā daļiņa sasniedza pamatiežus, aizceļoja līdz pat 25. slānim (D2ar), tad atkal ar augšupejošu plūsmu tika uznesta atpakaļ uz 3. slāni kvartārs, nonākot Daugavā. Daļiņas kopējais kustības laiks ir ievērojams – $784949:365=2150$ gadu.

Ņemot vērā to, ka lietotāja interaktīvas WEB saskarnes izveide ir paredzēta noslēdzamajos etapos, esošā izstrāde pagaidām ir tikai ACCESS datu bāzes formā bez papildus lietotāja saskarnes ērtai atsevišķa ieraksta apskatei. Ieraksts par ikvienu LAMO4 aktīvo šūnu, kurai nav piesaistīta jūra, ezers vai upe, šajā etapā un arī nākamajos tiks veidota/papildināta viena tabulas ieraksta veidā. WEB saskarnes izstrādes laikā ikviens atsevišķs ieraksts ar programmatūras līdzekļiem tiks transformēts par tabulu, kā tas tika darīts VMC izpildītā LVAF projekta laikā 2021. gadā [5].

Ar izstrādāto datorprogrammu iegūtās tabulas tiek importētas MS ACCESS datu bāzē, kas šajā gadījumā ir paveikto eksperimentu praktisks apliecinājums. WEB saskarnes izstrādes gaitā iegūtās tabulas tiks importētas MySQL datu bāzē, kas atšķirībā no MS ACCESS pieļauj vairākus vienlaicīgus pieslēgumus datu bāzei, un ir optimizēta darbam tīklā.

7 Secinājumi

Projekta pirmā etapā “Piesārņojuma kustības trajektorijas un kustības laika aprēķins” atbilstoši darba uzdevumam realizēti sekojoši punkti:

1. Aprēķināts piesārņojuma kustības laiks līdz galamērķim – ūdenstecei, atslodzes apgabalam vai nogrimstot.
2. Aprēķinātas piesārņojuma galamērķa koordinātas un nosaukums.
3. Aprēķināts piesārņojuma pirmā kontakta laiks ar kvartāra slāni un koordinātes plaknē.
4. Aprēķināts piesārņojuma pirmā kontakta laiks ar pamatiežu slāni un koordinātes plaknē.
5. Vairāk kā 1. milj. tabulu apkopojums MS ACCESS datubāzē. Katrai tabulai tiks turpināta izstrāde nākamajos projekta etapos, papildinot to ar jaunu informāciju. Datu bāzē viens ieraksts atbilst datiem par ūdenī šķīstošā piesārņojuma kustību vienai LAMO modeļa režģa šūnai.

8 Literatūras saraksts

- [1] Groundwater Modeling Software, ESI Software, 2022. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.groundwatermodels.com/ESI_Software.php.
- [2] Pollock, David W., User Guide for MODPATH Version 6—A Particle-Tracking Model for MODFLOW, Virginia: USGS, 2012.
- [3] Spalviņš, A., Krauklis, K., Lāce, I., Mačāns, A., Šķibelis, V., Eglīte, I., Goldbergs, L., Aleksāns, O., Tabaka, I., Šlangens, J. Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa LAMO4 lietošana vides problēmu risināšanai. No: *Latvijas ekosistēmu dinamika klimata ietekmē*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 2018. 81.-87.lpp. ISBN 978-9934-18-381-2.
- [4] Spalviņš, A., Krauklis, K., Lāce, I., Aleksāns, O. Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa LAMO izveidošana, izmantošana un pilnveidošana. *Boundary Field Problems and Computer Simulation*, 2018, Vol. 57, 5.-14.lpp. ISSN 2255-9124. e-ISSN 2255-9132. Pieejams: doi:10.7250/bfpcs.2018.001
- [5] Vides Modelēšanas centrs, Projekts “Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa LAMO4 pilnveidošana un tā rezultātu publiskošana”, [Tiešsaiste]. Pieejams: http://www.emc.rtu.lv/LVAF_2021.htm.