

Hydrogeological Modelling of Oil Contaminated Site in Valmiera

Hidroģeoloģiskā modelēšana naftas produktu piesārņojumam Valmierā

Aivars Spalviņš¹, Kaspars Krauklis², Inta Lāce³, Daiga Pipira⁴, Sandra Karuša⁵, Inga Retiķe⁶, Madara Mame⁷, Linda Fībiga⁸

¹⁻³ Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija,

⁴⁻⁸ VSIA "Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs", Latvija

Kopsavilkums – Valmieras bijušās mazuta bāzes teritorija ir piesārņota ar naftas produktiem, un vieta nav reģistrēta kā piesārņota vai potenciāli piesārņota vieta (PPPV), tomēr projekta "INSURE" (CB Nr. 39) ietvaros tika plānots novērtēt iespējamo teritorijas ietekmi uz apkārtējo vidi. No 2016. gada līdz 2017. gadam SIA "Vides konsultāciju birojs" izpētīja bāzes teritorijas pazemes ūdeņu un grunts piesārņojumu. Izmantojot datus par pazemes ūdens piesārņojumu ar naftas produktiem, Valsts SIA "Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs" kopā ar Rīgas Tehnisko universitāti izveidoja piesārņotās teritorijas hidroģeoloģisko modeli. Noskaidrots, ka piesārņotais pazemes ūdens var sasniegt Gaujas upi aptuveni 60 gadu laikā. Bāzes apkārtņē, mālsmiltī, pazemes ūdens pārvar tikai 40 metrus 15 gados, bet 1,8 km līdz upei smilšakmenī noceļo 45 gados. Pirmajos 15 gados naftas produktu koncentrācija samazinās vismaz 60 reizi. Iespējama būtiska piesārņojuma masas samazināšanās mikroorganismu darbības ietekmē. Modelēšanas rezultāti pārliecina, ka naftas produktu piesārņojums pazemes ūdenī bijušajā mazuta bāzē praktiski neietekmē vides kvalitāti. Hidroģeoloģiskā un masu transporta modeļu veidošanas un izmantošanas aprakstus var izmantot modelēšanas speciālisti pazemes ūdens piesārņojumu izpētes metožu pilnveidošanai.

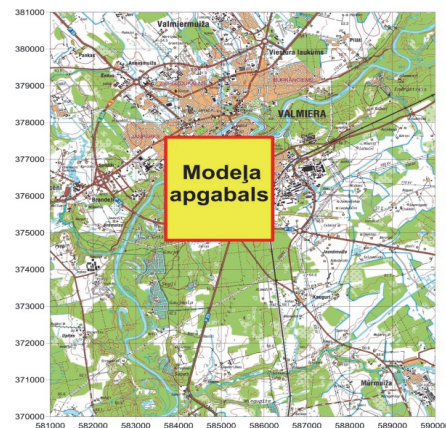
Atslēgas vārdi – Hidroģeoloģiskais modelis, naftas produkti, pazemes ūdens piesārņojums.

I. IEVADS

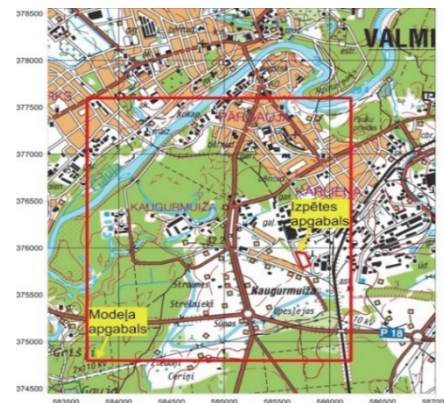
Centrālā Baltijas reģiona pārrobežu sadarbības projekta Nr. CB 39 "INSURE" (Inovatīva ilgtspējīga attīrīšana) ietvaros viens no uzdevumiem bija veikt izpēti Valmieras bijušās mazuta bāzes teritorijā, kas atrodas Kaugurmuižā, 1,8 km attālumā no Gaujas upes (skat. 1. un 2. att.). Saskaņā ar Valmieras pilsētas pašvaldības noslēgto līgumu naftas produktu piesārņojuma izpēti 2016.–2017. gadā veica SIA "Vides konsultāciju birojs" (VKB). Lai novērtētu pazemes ūdens piesārņojuma ietekmi uz apkārtējo vidi, Valsts SIA "Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs" (LVĢMC) kopā ar Rīgas Tehnisko universitāti (RTU) izveidoja lokālu hidroģeoloģisku modeli (HM). Tas izveidots, izmantojot ģeoloģiskās izpētes materiālus, LVĢMC datubāzes "URBUMI" un – datu nepietiekamības gadījumā – Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa (LAMO4) datus [1], un tas aizņem

2500 m × 2800 m laukumu. Modeļa plaknes aproksimācijas režģa solis ir 10 m (LAMO4 solis 250 m).

Modelis veidots ar programmatūras "Groundwater Vistas 6" (GV) [2] MODFLOW rīku [3]. Naftas produktu kustība pazemes ūdenī modelēta ar GV rīkiem MODPATH [4] un MT3D [5], kuri izmanto ar MODFLOW aprēķinātos datus par telpiskām pazemes plūsmām. Šajā pētījumā ģeoloģiskās vides porainība pieņemta 0,12.



1. att. Topogrāfiskā karte Valmieras apkārtnē ar hidroģeoloģiskā modeļa apgabala novietojumu.

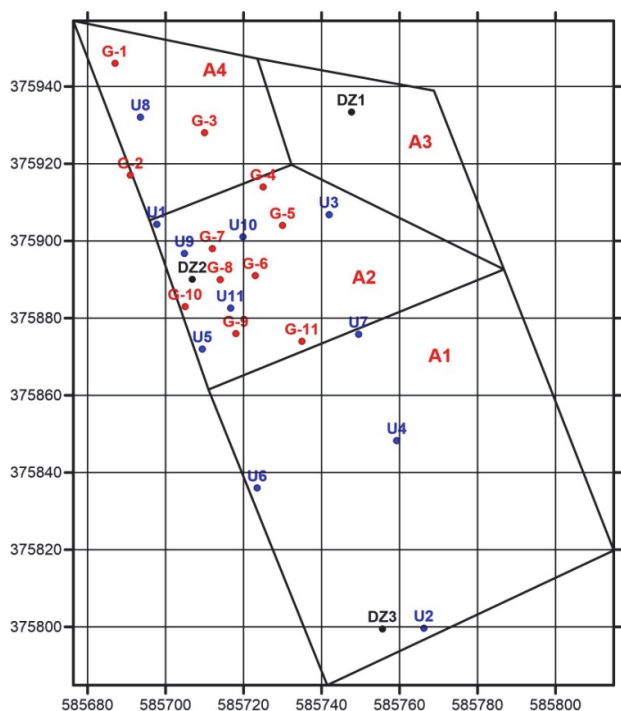


2. att. Hidroģeoloģiskā modeļa topogrāfiskā karte ar izpētes apgabalu.

Modelēšanas rezultātu vizualizācijai un sākuma datu apstrādei izmantota *SURFER 12* un *11* programma [6].

Modeļa digitālā reljefa karte veidota, izmantojot Latvijas Ģeotelpiskās aģentūras datus [7].

Bijušās mazuta bāzes piesārņojuma izpētei izmantotais apgabals un urbumu izvietojums skatāms 3. attēlā. Šajā apgabalā VKB speciālisti izveidoja vienpadsmit U tipa urbumus (U1, U2, ..., U11) pazemes ūdens līmeņu un piesārņojuma noteikšanai kvartāra ūdens horizontā Q. Trīs DZ tipa urbumi izmantoti pazemes ūdens līmeņa noteikšanai pamatiežu horizontā D2brt. Vienpadsmit G tipa urbumi (G1, G2, ..., G11) izmantoti grunts piesārņojuma noteikšanai. Četros apgabalos – A1, A2, A3, A4 – veikta augsnes (līdz 0,5 m dziļumam) piesārņojuma noteikšana.



3. att. Izpētes apgabals ar urbumu U, G, DZ izvietojumu un apgabaliem A1, A2, A3, A4.

Vidējais U tipa urbumu dziļums ir 6 metri, un tajos līdz 4 metru dziļumam noteikts grunts piesārņojums; G tipa urbumu dziļums ir 4 metri.

Grunts un ūdens paraugiem veiktas *BTEX*, naftas produktu un metālu analīzes, tāpat gruntīm veiktas granulometriskā sastāva, filtrācijas koeficienta, minerālo daļiņu blīvuma, organisko vielu un citas analīzes [9].

Informācija par pazemes ūdens un grunts piesārņojumu ir apkopota VKB pārskatos [8], [9].

Raksts vēltīts bijušās mazuta bāzes teritorijas pazemes ūdens piesārņojuma datormodelēšanas metodikas izklāstam un iegūto rezultātu skaidrojumam.

Piesārņojums pazemes ūdens plūsmā sasniedz Gaujas upi 60 gados. Pirmo 15 gadu laikā tas, pārvietojoties mālsmiltī, pārvar tikai 40 metrus. Tāpēc mazā pazemes ūdens plūsmas ātruma dēļ bāzes piesārņojuma izplūdes intensitāte ir niecīga. Pat tad, ja piesārņojums šajā mazuta bāzē daudz kārt pārsniegtu šobrīd novēroto, tas neradītu jūtamu kaitējumu Gaujas upei.

I TABULA

PIESĀRŅOTĀS TERITORIJAS HIDROĢEOLÓĢISKĀ MODEĻA SHEMATIZĀCIJA

HM slāņa Nr.	Slāņa nosaukums	Slāņa kods	Filtrācijas koeficients, m/dnn	Slāņa biezums, m	Piezīmes
1.	Reljefs	Rel	10,00	0,02	Digitālais reljefs kā robežnoteikums
2.	Aerācijas zona	Aer	$2 \cdot 10^{-3} \cdot (*)$	0,50–13,90	Sprosts slānis
3.	Kvartārs	Q3	0,30 un 3,00	0,08–5,75	Pieslēgts Kaugurmuižas strauts; Gaujas palienē $k = 3,0$ m/dnn
4.	Kvartārs	Q2	0,30 un 3,00	0,10–7,19	Gaujas palienē $k = 3,0$ m/dnn
5.	Kvartārs	Q1	0,30 un 3,00	0,10–7,19	Pieslēgta Gauja; Gaujas palienē $k = 3,0$ m/dnn
6.	Kvartāra morēna vai Burtnieku alerolīti	gQ	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,02–4,81	Sprosts slānis
7.	Burtnieku	D2brt3	1,25–3,00	15,46–17,79	Pieslēgta Gauja; Gaujas palienē $k = 3,0$ m/dnn
8.	Burtnieku	D2brt2	1,25–1,64	15,46–17,79	
9.	Burtnieku	D2brt1	1,25–1,64	30,92–35,58	
10.	Arukilas	D2arz	$2 \cdot 10^{-3}$	25,18–26,95	Sprosts slānis
11.	Arukilas	D2ar	10,00	0,02	D2ar pjezometriskie ūdens līmeņi kā robežnoteikums

* – $(10^{-3} - 3,3)$

Režģa plaknes aproksimācijas solis 10 m, modeļa izmēri 2500 m × 2800 m

II. HIDROĢEOLÓĢISKĀ MODEĻA UZBŪVE

Valmieras piesārņotās teritorijas HM ir stacionārs, t. i., apraksta vidējos hidroģeoloģiskos apstākļus pamatiežu horizontos D2brt un D2ar un stāvokli ūdens horizontā Q 2017. gada vasarā.

Modelis aproksimē ģeoloģisko vidi ar telpisku 3D režģi, kuru veido $h \times h \times m$ izmēra paralelpedi (h režģa plaknes solis 10 m; m – mainīgs ģeoloģiskā slāņa biezums), kuru centros atrodas režģa mezgli.

Modeļa vertikālā shematizācija skatāma 1. tabulā. Tā ietver 11 režģa plaknes ar izmēru (250×280) mezgli. Šīs plaknes modelē ģeoloģiskos slāņus. Kopīgais mezglu skaits modeļa 3D režģī ir $11 \times 250 \times 280 = 770\,000$.

MODPATH atrisina algebrisku vienādojumu sistēmu [10]:

$$A \varphi = \beta - G \psi, \quad (1)$$

kur φ – atrisinājuma vektors ir pjezometriskais pazemes ūdens līmenis 3D režģa mezglos;

A – ģeoloģiskās vides ūdensvadāmību matrica, kuras elementu vērtības nosaka ģeoloģisko slāņu biezums (iegūts no virsmu z kartēm) un filtrācijas īpašības (k kartes);

β – pazemes ūdens plūsmu robežnoteikumu vektors;

ψ – pazemes ūdens līmeņu robežnoteikumu vektors;

G – matrica, kura ievēro ψ tipa noteikumu saites ar ģeoloģisko vidi.

Ja ir sagatavotas z un k kartes, kā arī dati par β un ψ robežnoteikumiem, tad GV automātiski izveido HM *MODFLOW* vidē [2].

Modelī Valmierai neizmanto β tipa noteikumus tāpēc, ka pazemes ūdens plūsmu noteikšana dabā ir ļoti problemātiska. Piemēram, infiltrāciju horizontam Q parasti iesaka modelēt kā β plūsmu [3], taču tās sadalījums nav zināms, tāpēc tas jāatrod modelētājam. Arī *LAMO4* β noteikumus izmanto tikai ekspluatācijas urbumu ražības modelēšanai.

LAMO4 un arī lokālajā HM Valmierai izmanto ψ noteikumus, jo to vērtības var droši noteikt. No 1. tabulas redzams, ka modeļa pirmo un vienpadsmito slāni izmanto ψ noteikumu uzdošanai, attiecīgi reljefa un horizonta D2ar pazemes ūdens līmeņu ψ karšu veidā. Arī Gaujas upes un Kaugurmuižas strauta līmeņi ir ψ noteikumi.

Kā G matricas elementi kalpo otrais un desmitais slānis (Aer un D2arz), kas ir sprostslnāņi; G matricā arī ietilpst elementi, kas saista upi un strautu ar HM režģi.

Lai pareizāk modelētu piesārņojuma migrāciju, horizonti Q un D2brt ir sadalīti trīs slāņos.

Aprēķinātie pazemes ūdens līmeņu sadalījumi (ϕ kartes) skatāmi pielikuma 3. a attēlā. Pirmā slāņa Rel kartē ietonēta Gaujas upes paliene, kurā Burtnieku smilšakmeņu gultne aizpildīta ar kvartāra aluviālajiem nogulumiem (modelī slāņi Q un D2brt3). Šī iemesla dēļ palienes laukumā slāņi $Q3$, $Q2$, $Q1$ un D2brt3 filtrācijas k kartēs fiksēts $k = 3,0$ m/dnn (skat. 1. tabulu). Šī vērtība būtiski atšķiras no mālsmilts $k = 0,3$ m/dnn horizontā Q [8].

Q horizontam ϕ kartes liecina par Kaugurmuižas strauta būtisko ietekmi apgabalā, kurā eksistē sprostslnānis gQ . Slāņa nulles biezuma apgabals ir redzams 3. attēlā.

Horizontam D2brt izmantota *LAMO4* k karte.

Pārskatā [8] gruntsūdeņu plūsma tika prognozēta uz dienviidiem. Tas norāda uz piesārņojuma ieplūdi 200 m attālumā esošajā strautā. Veicot papildu izpēti 2017. gada jūnijā [9], iegūtie pazemes ūdens līmeņu mērījumi liecināja par gruntsūdeņu plūsmu uz ZR. Kā redzams ϕ kartē, pazemes ūdens no bāzes teritorijas plūst uz Gaujas upi.

Var konstatēt, ka ϕ kartes horizontam Q un D2brt ir praktiski identiskas apgabalā, kurā nav sprostslnāņa gQ .

Ūdens plūsmas ātrums horizontā D2ar ir ievērojami mazāks nekā D2brt horizontā. Par to liecina atšķirīgās ϕ kartes šiem horizontiem. Atšķirības izsauca sprostslnānis D2arz.

Infiltrācijas plūsmu sadalījumi (q kartes) skatāmas Pielikuma 4. a attēlā.

$Q3$ slāņa q karte parāda, ka infiltrācijas plūsmas q_3 sadalījums HM augšējā daļā ir ļoti complicēts. Modelī tas ir aprēķināts automātiski kā plūsma q_{Aer} sprostslnānī Aer:

$$q_{Aer} = q_3 = g_{Aer} (\psi_{Rel} - \phi_{Q3}), \quad (2)$$

kur ψ_{Rel} , ϕ_{Q3} – ūdens līmeņi modeļa pirmajā un trešajā slānī; g_{Aer} – sprostslnāņa Aer ūdens vadāmība.

Formulu (2) HM var īstenot tāpēc, ka reljefa karte ir izmantota kā ψ tipa robežnoteikums. Plūsmas q_3 kalibrēšanu veic, mainot k_{Aer} karti (skat. sadaļu par HM kalibrēšanu) [10].

Nav ticams, ka modelētājs var sagatavot sarežģīto plūsmu $\beta_3 = q_3$ kā robežnoteikumu. Tāpēc ψ_{Rel} kartes izmantošana atbrīvo no tik grūta uzdevuma risināšanas, kā arī būtiski palielina modelēšanas rezultāta ticamību.

No q karšu salīdzinājuma slāņiem $Q3$, D2brt3, D2brt2, D2ar var konstatēt, ka, palielinoties to dziļumam, samazinās pozitīvas infiltrācijas plūsmas ietekme. Piemēram, tikai horizonta D2ar dienviņu-austrumu stūrī eksistē maza pozitīvā plūsma (0–40 mm/gadā). Infiltrācija mazuta bāzes apgabalā samazinās, palielinoties horizontu dziļumam: $Q3 = 120$ mm/gadā; D2brt3 ~ 80 mm/gadā; D2brt2 ~ 40 mm/gadā; D2ar < 0 mm/gadā. D2brt3 slāņa q kartēs skatāmi infiltrācijas plūsmu kropļojumi uz slāņa gQ robežas. Tie neietekmē piesārņojuma kustības modelēšanas rezultātu.

Modeļa pazemes plūsmu bilanci [m³/dnn] var iegūt, izmantojot *GV* rīku *Mass balance*. Rezultāts skatāms 2. tabulā. Balance sastādīta ūdens slāņiem, ievērojot ieplūdes un izplūdes plūsmas slāņu augšpusē un apakšā. Modelī kopumā ieplūst 6121,60 m³/dnn, no tiem 1948,54 m³/dnn kā rezultējošā atmosfēras infiltrācija 1948,54 = (2118,68–170,14) m³/dnn un 4172,41 = (4183,96–11,55) m³/dnn no slāņa D2ar.

II TABULA

HIDROĢEOLOĢISKĀ MODEĻA PAZEMES PLŪSMU BILANCE [M³/DNN]

Slāņa kods	Slāņa augša			Slāņa apakša			Kopā	Caur robežu	Upes, grāvji
	Ieplūde	Izplūde	2 + 3	Ieplūde	Izplūde	5 + 6			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q3	2118,68	-170,14	1948,54	347,72	-2078,45	-1730,73	217,79	0,10	-217,89
Q2	2078,45	-347,72	1730,73	371,23	-2095,37	-1724,14	6,60	-6,60	0,00
Q1	2095,37	-371,23	1724,14	551,07	-1658,27	-1107,20	616,94	-8,17	-608,77
D2brt3	1658,27	-551,07	1107,20	4545,57	-735,34	3810,23	4917,43	-230,07	-4687,36
D2brt2	735,34	-4545,57	-3810,23	4054,40	-257,37	3797,03	-13,20	13,20	0,00
D2brt1	257,37	-4054,40	-3797,03	4183,96	-11,55	4172,41	375,39	-375,39	0,00
Modelis	2118,68	-170,14	1948,54	4183,96	-11,55	4172,41	6120,97	-606,95	-5514,02

Atmosfēras nokrišņu vidējā infiltrācijas plūsma 101,60 mm/gadā = (0,365 · 1948,54) / (2,5 · 2,8); 2,5 km · 2,8 km = 7,0 km² – modeļa laukums

Komponentes $170,14 \text{ m}^3/\text{dnn}$ un $11,55 \text{ m}^3/\text{dnn}$ ievēro augšupejošo (negatīvo) plūsmu slānī Q3 un nelielo pozitīvo plūsmu horizontā D2ar (skat. 2. a attēlā q kartes slāņos Q3 un D2ar). Rezultējošā atmosfēras nokrišņu infiltrācija modelī ir $101,6 \text{ mm/gadā} = (0,365 \cdot 1948,54) / (2,5 \cdot 2,8)$.

Kopīgā pazemes pietece upēs ir $5514,02 \text{ m}^3/\text{dnn}$, no tiem $217,89 \text{ m}^3/\text{dnn}$ Kaugurmuižas strautā, $608,77 \text{ m}^3/\text{dnn}$ Gaujā, horizontā Q1, un $4687,36 \text{ m}^3/\text{dnn}$ Gaujā, slānī D2brt3. Caur HM apgabala robežu aizplūst $606,95 \text{ m}^3/\text{dnn}$.

Modeļa pazemes plūsmu bilance un 4. a attēla q kartes liecina, ka horizontam D2ar ir izšķiroša nozīme ticamu rezultātu iegūšanai, īpaši piesārņojuma masas transporta modelēšanā.

III. HIDROĢEOLOĢISKĀ MODEĻA IZVEIDOŠANA UN KALIBRĒŠANA

HM Valmierai iegūts, veidojot to no jauna. Pēc hidroģeoloģiskās izpētes rezultātā iegūtajiem datiem tika izvēlēta HM shematizācija (skat. 1. tabulu). HM veidošanai izmantoti šādi dati:

- detalizēta zemes reljefa virsmas karte ar plaknes soli 10 m ;
- izveidoti Kaugurmuižas strauta un Gaujas piesaistes faili HM;
- sprostsliāņu slāņu virsmas un gQ biežums no LAMO4, kas iegūts, izmantojot *GV* procedūru “*Telescopic mesh refinement*”. Tādējādi no LAMO4 iegūts lokāls HM ar vajadzīgo novietojumu, izmēru un plaknes soli h , kas izmantots jaunizveidotajam HM.

HM kalibrēšanai izmantotie izpētes rezultātā iegūtie un Valsts ģeoloģijas fonda (VGF) dati:

- mazuta bāzes rajonā veiktās hidroģeoloģiskās izpētes rezultātā iegūtie dati [9] – pamatiežu virsmas augstums ir $\sim 32 \text{ m}$ vjl. Līdz ar to kvartāra smilšu horizonts Q bāzes teritorijā sasniedz 16 m biežumu. 2017. gada augustā ar ūdeni piesātinātais horizonta Q biežums $m_Q = 14 \text{ m}$ un aerācijas zonas Aer biežums $m_{\text{Aer}} = 2 \text{ m}$;
- Gaujas upes palienē laika gaitā ir izveidojies smilšu sanesums, kurš atrodas slāņos Q3, Q2, Q1, D2brt3 [11];
- datus par pazemes ūdens piesārņojumu var attiecināt tikai uz 4 m biezu slāni Q3 bāzes teritorijā (U tipa izpētes urbumu dziļums $\sim 6 \text{ m}$, $m_{\text{Aer}} = 2 \text{ m}$);
- pazemes ūdens līmeņiem izpētes urbuma U11 tuvumā slāņos Q3 un D3brt3 ir jābūt $46,0 \text{ m}$ vjl un $43,5 \text{ m}$ vjl.

Lokālā HM kalibrāciju uzsāk ar slāņu virsmu (z kartes) izveidošanu. Sistēmā *GV* tikai pirmajam slānim Rel ir augšējā un apakšējā virsma z_0 un z_1 (*top 1* un *bot 1*). Pārējiem i -tiem slāņiem uzdod to apakšas virsmas z_i (*bot i*). Pirmā slāņa z_0 ir digitālais reljefs; $z_1 = (z_0 - 0,02) \text{ m}$ vjl., jo pirmā slāņa biežums ir $0,02 \text{ m}$.

No LAMO4 ņemtas virsmas z_9 un z_{10} (sprostsliāņa D2arz virsmas); virsma $z_{11} = (z_{10} - 0,02) \text{ m}$ vjl. dod $m_{\text{D2ar}} = 0,02 \text{ m}$ slānim D2ar, kuru izmanto ψ_{D2ar} robežnoteikumiem.

Analizējot LVĢMC urbumu datu bāzes un pārskata [9] datus, tika izveidota virsma z_5 slānim Q1. Ar LAMO4 datiem

par morēnas gQ biežumu m_{gQ} , bija iespējams izveidot virsmu $z_6 = (z_5 - m_{\text{gQ}}) \text{ m}$ vjl.

Burtnieku horizonts ir sadalīts trīs slāņos, kuru biežumi ir $m_{\text{D2brt3}} = m_{\text{D2brt2}}$; $m_{\text{D2brt1}} = m_{\text{D2brt3}} + m_{\text{D2brt2}}$. Var izveidot $z_8 = 0,5 (z_6 + z_9)$; $z_7 = 0,5 (z_6 + z_8)$.

Virsmas z_2 , kas nosaka reālo aerācijas zonas Aer biežumu m_{Aer} , nav zināma. To atrod, īstenojot divus eksperimentus.

Pirmajā eksperimentā $z_2 = (z_1 - 0,46) \text{ m}$ vjl.; $m_{\text{Q1}} = m_{\text{Q2}} = 0,02 \text{ m}$, t. i., izmanto $m_{\text{Aer}} = 0,5 \text{ m}$. Atbilstoši raksta [12] ieteikumam, k karti aerācijas zonai meklē kā faktoru reizinājumu:

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4, \quad (3)$$

kur k_1 ir ārējā konstante, kuras vērtību nosaka, HM kalibrējot; k_2 , k_3 un k_4 ir lokālo izmaiņu, slāņu ģeometrijas un infiltrācijas plūsmu korekcijas faktori. Pirmajā eksperimentā izmanto $k_2 = 1,0$ un $0,001$; $k_3 = k_4 = 1,0$. Faktora k_2 vērtība $0,001$ atbilst vietām, kurās ir Gaujas upe un Kaugurmuižas strauts. Faktors samazina virszemes ūdens objektu saiti ar ψ_{Rel} .

Pirmā eksperimenta mērķis ir atrast k_1 zonai Aer un k_{gQ} un k_{D2arz} sprostsliāņiem gQ un D2brt3, lai urbuma U11 tuvumā $\Phi_{\text{Q3}} = 46,0 \text{ m}$ vjl., $\Phi_{\text{D2brt}} = 43,5 \text{ m}$ vjl. No 1. tabulas seko, ka šo noteikumu nodrošina $k_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/dnn}$, $k_{\text{gQ}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/dnn}$, $k_{\text{D2arz}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/dnn}$.

Otrajā eksperimentā atrod faktisko m_{Aer} un $z_2 = z_1 - m_{\text{Aer}}$:

$$m_{\text{Aer}} = \psi_{\text{Rel}} - \Phi_{\text{Q3}}, \text{ ja } q_3 > 0; \quad (4)$$

$$m_{\text{Aer}} = 0,46, \text{ ja } q_3 < 0;$$

$$k_3 = m_{\text{Aer}} / 0,46. \quad (5)$$

Īstenojot ģeometrisko pārveidojumu (4), jānovērš negatīvu m_Q biežumu parādīšanās, ja $m_{\text{Q2}} = m_{\text{Q1}} = 0,02 \text{ m}$. Faktora k_3 izmantošana rada stāvokli, kurā ir atrasts faktiskais m_{Aer} , samazinot slāņa Q3 ar ūdeni piesātināto biežumu. Infiltrācijas plūsmas q_{Aer} nav izmainīta.

Pēc pirmā un otrā eksperimenta veikšanas urbuma U11 tuvumā $m_Q = 14 \text{ m}$. Šeit slāņu Q3, Q2, Q1 biežumiem jābūt $m_{\text{Q3}} = 4 \text{ m}$; $m_{\text{Q2}} = m_{\text{Q1}} = 5 \text{ m}$, jo dati par piesārņojumu urbumos ir iegūti 4 m dziļumā (skat. 1. a att.).

Lai nodrošinātu šo noteikumu, ir jāizmanto izmainītais $m_Q = m_{\text{Q3}} + 0,04$:

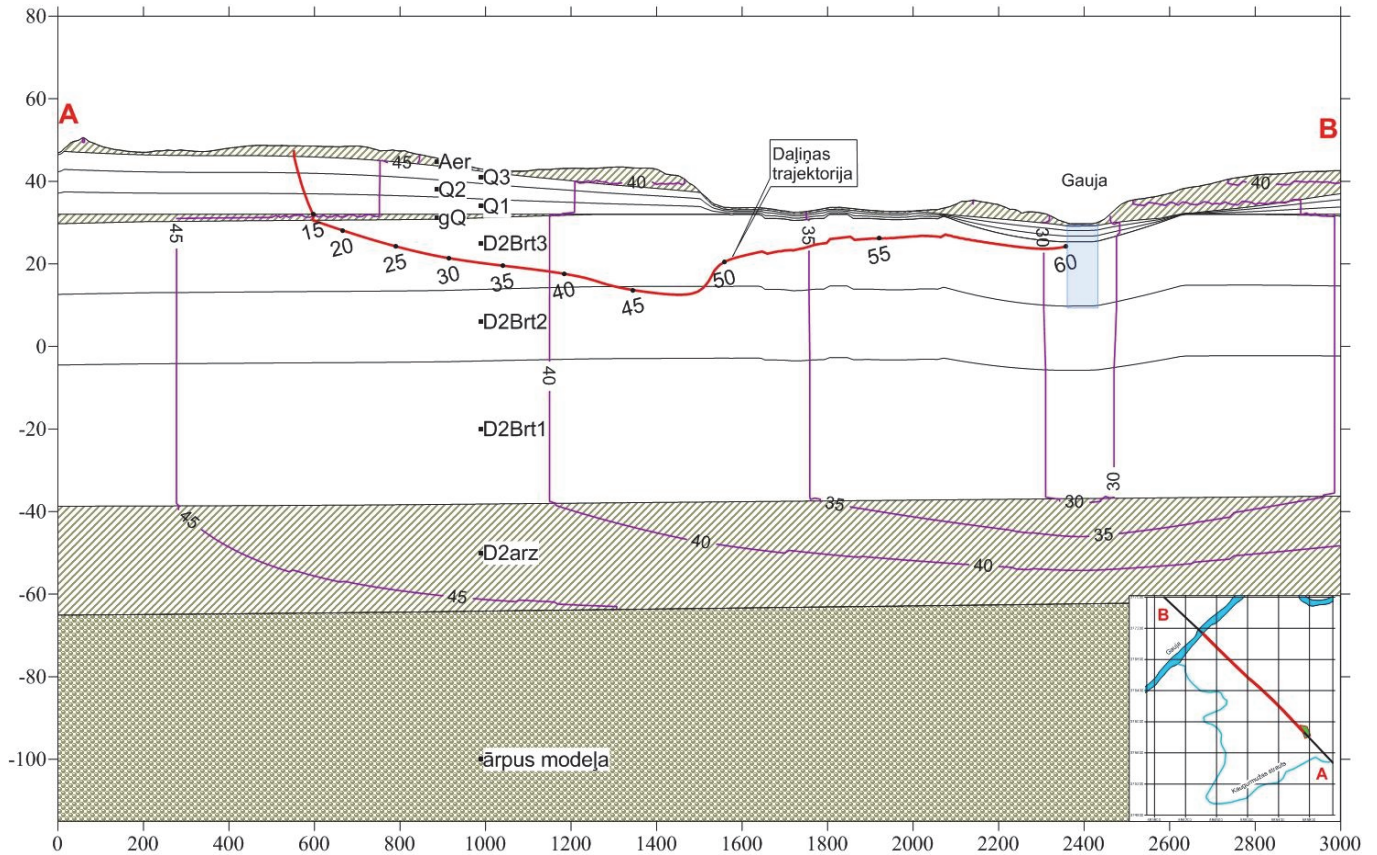
$$m_Q = z_2 - z_5; z_3 = z_2 - 2 m_Q / 7; z_4 = 0,5(z_3 + z_5). \quad (6)$$

Modeļa kalibrāciju noslēdz infiltrācijas plūsmas q_3 korekcijas faktora k_4 aprēķināšana:

$$k_4 = (2,5/\Delta\Phi)^{0,9}, \text{ ja } \Delta\Phi = (\psi_{\text{Rel}} - \Phi_{\text{Q3}}) > 2,5;$$

$$k_4 = 1, \text{ ja } \Delta\Phi < 2,5. \quad (7)$$

Faktors k_4 modelī novērš pārāk lielas, dabā neiespējamās infiltrācijas plūsmas. Piemēram, pirms pārveidojuma (7) infiltrācija slānī Q3 pārsniedza 700 mm/gadā .



4. att. MODPATH ūdens daļiņas trajektorijas vertikālais griezum.

IV. PROGRAMMAS MODPATH IZMANTOŠANA PIESĀRŅOJUMA KUSTĪBAS PĒTĪŠANAI

Programma MODPATH aprēķina ūdens daļiņas kustību telpā un laikā. MODPATH darbojas HM vidē, kuru izveido MODFLOW programma. Ja ir jāpēta ūdenī izšķīduša piesārņojuma kustība, MODPATH izmantošana dod ļoti būtisku informāciju.

Ūdens daļiņu ievieto urbumā U11 slānī Q3, piesārņojuma centrā. Daļiņas trajektorija ir skatāma 4. attēlā:

- pirmajos 15 gados daļiņa sasniedz D2brt3 slāni. Daļiņas ceļa garums ir 40 m; vidējais kustības ātrums v ir $\sim 2,5$ m/gadā. Var prognozēt, ka mazā pazemes plūsmas ātruma dēļ bāzes piesārņojuma izplūdes intensitāte būs niecīga;
- slāņos D2brt3 un D2brt2 daļiņa pavada 45 gadus, līdz tā sasniedz Gaujas upi. Daļiņas ceļa garums – 1800 m; pēc iekļūšanas slānī D2brt3, v ir ~ 22 m/gadā; Gaujas upes tuvumā – v ir ~ 80 m/gadā;
- apgabalā, kur darbojas augšupejošās (negatīvās) plūsmas (skat. 4. a att.), daļiņas trajektorija tuvojas zemes virsmai.

Daļiņas mazais ātrums horizontālā Q ir izskaidrojams galvenokārt ar $k = 0,3$ m/dnn mālsmiltij. Gaujas palienē daļiņa pārvietojas ātrāk, jo šeit $k = 3,0$ m/dnn (skat. 1. tabulu).

MODPATH nedod informāciju par piesārņojuma koncentrācijas un masas izmaiņām laikā un telpā. Tādus datus var iegūt, izmantojot programmu MT3D.

V. AR PROGRAMMU MT3D IEGŪTIE REZULTĀTI

Izmantojot programmu MT3D, veikti skaitliskie eksperimenti, kuros pazemes ūdens piesārņojums slānī Q3 modelēts, izmantojot relatīvās koncentrācijas $C_r = 100\%$ avotu trīs režģa šūnās, kurām atbilst maksimālās BTEX komponentu koncentrācijas (skat. Pielikuma 1. a att. un 1. a tabulu). Koncentrāciju C_r un faktiskās koncentrācijas saista vienādojums:

$$C_t = 0,01 C_r \cdot C_{\max}, \quad (8)$$

kur C_t un C_{\max} ir aprēķinātā laikā mainīgā koncentrācija piesārņojuma avotā.

Vispārīgāku, tomēr mazāk uzskatāmu rezultātu varētu iegūt, ja MT3D izmantotu sarežģītāku izkļiedētu piesārņojuma avotu, kuru veidotu režģa šūnas, kurām to koncentrācijai būtu izmantoti 1. a attēla dati.

Par MT3D ieejas datu aprēķinu skat. Pielikuma iedaļu "Pazemes ūdens piesārņojums izpētes apgabalā".

Programma MT3D avota koncentrāciju $C_r = 100\%$ izmanto masas M_{100} aprēķinam, kā $C = 100$ kg/m³. Tāpēc masu M_{100} , kg, ar faktisko masu M_c , ja $C = C_{\max}$, mg/m³, saista formula:

$$M_c, g = C_{\max} \cdot U; \quad U = M_{100} \cdot 10^{-5}, \quad (9)$$

kur U ir relatīvā piesārņojuma masa. Bezdimensiju parametrs U (skat. 5. att.) ir MT3D aprēķinu rezultāts.

Īstenoti trīs skaitliskie eksperimenti 100 gadu laikam:

- ievēro tikai ūdens kustību (advekcija);
- papildus ievēro vielas degradāciju ar $t_{0,5} = 10$ gadi;
- pirmajā eksperimentā pēc 25 gadiem likvidē piesārņojuma avotu.

Pirmais un otrais eksperiments dod informāciju par piesārņojuma koncentrācijas un masas izmaiņu laikā un telpā, ja nelikvidē avotu. Otrajam eksperimentam $t_{0,5} = 10$ gadi ņem vērā, ka horizontā D2brt piesārņojuma destrukcijas ātrums būs mazāks nekā horizontā Q. Rakstā [15] tam izmanto $t_{0,5} = (2-3)$ gadi. Trešais eksperiments parāda piesārņojuma avota likvidācijas ietekmi.

Izmantota "finite difference" metode; laika solis 73 dienas = 0,2 gadi. Metode precīzi aprēķina piesārņojuma masu, taču tai piemīt ievērojama skaitliskā dispersija. Šī iemesla dēļ nav īpaši pētīta dispersijas ietekme uz piesārņojuma kustību, jo šo ietekmi demonstrē izmantotā metode.

Relatīvās piesārņojumu koncentrācijas pēc 25 un 60 gadiem pirmajam eksperimentam slāņos Q1 un D2brt3 skatāmas Pielikuma 5a. attēlā.

Var konstatēt, ka augšupejošas plūsmas dēļ jau pēc 25 gadiem slānī Q1 (arī Q2 un Q3) radies koncentrāciju apgabals, kura austrumu robeža sakrīt ar nulles infiltrācijas līniju (skat. 4a. att.). Koncentrāciju sadalījumi slāņos Q1 un D2brt3 šajā apgabalā ir identiski, jo šeit neeksistē sprostslānis gQ. Pēc 60 gadiem koncentrāciju sadalījumi slāņos Q1 un D2brt3 nemainās, jo ir iestājies līdzsvars starp piesārņojuma ieplūdi upē un izplūdi no bāzes.

Otrajam un trešajam eksperimentam nav parādīti relatīvo koncentrāciju sadalījumi, jo tie principiāli neatšķiras no pirmajā eksperimentā iegūtajiem.

Slāņos Q3, Q2, Q1 un D2brt3 ierīkoti virtuāli monitoringa urbumi 3.1, 4.1, 5.1, 5.2 un 7.1, 7.2, 7.3. Urbumi 3.1, 4.1, 5.1 un 7.1 atrodas tuvu piesārņojuma avotam, urbumi 5.2 un 7.2 novietoti 600 m attālumā no upes, bet urbums 7.3 ir pie upes. Katram monitoringa urbūmam GV sistēma izveido hidrogrāfu, kas parāda relatīvo koncentrāciju izmaiņu laikā.

Monitoringa urbūmu hidrogrāfi skatāmi pielikuma 6. a attēlā. Hidrogrāfi pēc to rakstura un stacionārajām vērtībām sakārtoti trīs grupās: (3.1, 4.1, 5.1), (7.1) un (7.2, 7.3). Hidrogrāfs 5.2 nav izmantots, jo tas ir identisks hidrogrāfam 7.2. Hidrogrāfu stacionārās vērtības apkopotas III. tabulā.

Pirmās grupas hidrogrāfu stacionārās vērtības, %, mainās pirmā un otrā eksperimenta robežās no 7,0 līdz 55,0; hidrogrāfam 7.1 – no 0,75 līdz 1,65; trešajā grupā no 0,001 līdz 0,130. Visiem hidrogrāfiem stacionārā vērtība ir nulle trešajā eksperimentā. Pirmās grupas hidrogrāfi stacionāro vērtību sasniedz 10–15 gados. Palielinoties ģeoloģiskā slāņa dziļumam, hidrogrāfu izmaiņas ātrums un stacionārās vērtības samazinās. Otrajā eksperimentā stacionārās vērtības ir tikai nedaudz mazākas nekā pirmajā eksperimentā (skat. 3. tabulu), t. i., piesārņojuma avota tuvumā vielas destrukcija maz ietekmē koncentrāciju sadalījumu.

III TABULA

RELATĪVO KONCENTRĀCIJU, %, HIDROGRĀFU STACIONĀRĀS VĒRTĪBAS PĒC 100 GADIEM

Monitoringa urbuma Nr.	Eksperimenta numurs		
	1	2	3
3.1	55,00	52,4000	0,00
4.1	24,10	21,8000	0,00
5.1	9,00	7,0000	0,00
7.1	1,65	0,7500	0,00
7.2	0,13	0,0045	0,00
7.3	0,05	0,0010	0,00

Hidrogrāfa 7.1 stacionārās vērtības 1,65 un 0,75 norāda uz piesārņojuma koncentrācijas samazināšanos slānī D2brt3 – attiecīgi 60 un 133 reizes pirmajam un otrajam eksperimentam. Hidrogrāfs stacionāro vērtību sasniedz pēc 25 gadiem. Koncentrācijas pirmajam eksperimentam samazinās piesārņojuma atšķaidīšanās dēļ, bet otrajā eksperimentā kā papildu faktors darbojas piesārņojuma destrukcija.

Trešās hidrogrāfu grupas stacionārās vērtības pirmajā un otrajā eksperimentā norāda uz līdzsvara iestāšanos starp piesārņojuma avotu izdalīto masu un tās ieplūdi upē un arī vielas degradāciju otrajā eksperimentā. Destrukcijas dēļ hidrogrāfu 7.2 un 7.3 vērtības attiecīgi samazinās: 0,13 → 0,0045 un 0,05 → 0,001, t. i., 29 un 50 reizes, salīdzinot ar pirmo eksperimentu. Stacionāro vērtību hidrogrāfi sasniedz tikai pēc 70–80 gadiem. Trešajā eksperimentā abu hidrogrāfu vērtību maksimumi gandrīz sasniedz pirmā eksperimenta stacionāros līmeņus (skat. 6. a att.).

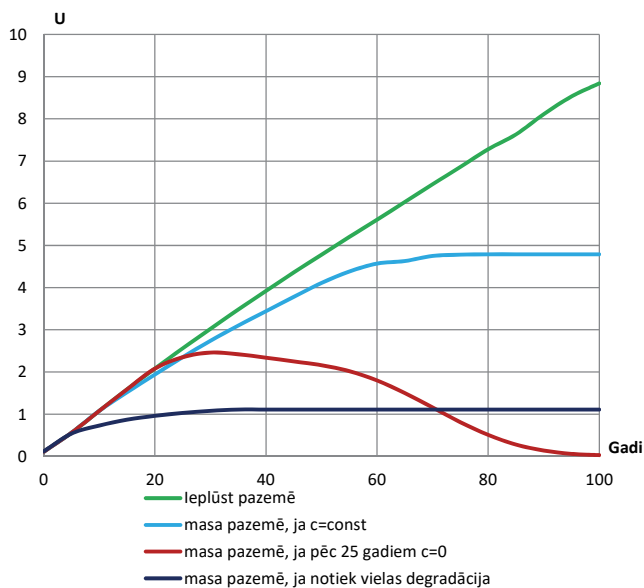
Piesārņojuma relatīvās masas izmaiņas trijiem eksperimentiem skatāmas 5. attēlā. Pirmajam un otrajam eksperimentam piesārņojuma avota izdalītā masa palielinās lineāri. Trešajā eksperimentā tā aug tikai pirmajos 25 gados.

Pirmajā eksperimentā pēc 60 gadiem notiek procesa stabilizācija līmenī $U = 4,8$, kad piesārņojuma masas ieplūde upē ir vienāda ar avota izplūdes masu.

Otrajā eksperimentā piesārņojuma sabrukšanas dēļ jau pēc 20 gadiem notiek procesa stabilizācija līmenī $U \sim 1,0$. Ļoti iespējams, ka dabā intensīva naftas produktu degradācija notiek horizontā Q mikroorganismu darbības rezultātā.

Trešajā eksperimentā upes ietekmes dēļ relatīvā masa pēc 60 gadiem samazinās ātrāk. Eksperiments pierāda, ka piesārņojuma avota likvidācija ir obligāts priekšnoteikums vides atveseļošanai. Tomēr vides pašattīrīšanās process nav ātrs, jo tam nepieciešami vismaz 75 gadi pēc avota likvidācijas.

Pirmais eksperiments dod maksimālo piesārņojumu pazemes ūdenī. Aptuvenais bāzes piesārņojuma vecums ir 60 gadi, kam atbilst $U = 4,6$. Izmantojot formulu (9), aprēķina BTEX masu $M_c = 44,32 \times 4,6 = 203,9$ grami; $C_{max} = 44,32 \text{ mg/m}^3$ (skat. IA. tabulu). Piesārņojuma avota izdalītā masa 60 gados ir $44,32 \times 5,7 = 252,6$ grami ($U = 5,7$).



5. att. Relatīvās masas izmaiņas laikā līdz 100 gadiem.

Avota intensitāte ir tikai $0,012 \text{ g/dnn} = 252,6 / (60 \cdot 365)$. Pat ja senāk piesārņojuma koncentrācija pazemes ūdenī bijušajā mazuta bāzē daudzkārt pārsniedza pašreiz novēroto, bāzes piesārņojums nevar ietekmēt Gaujas upi, jo tās rezultējošā pazemes pietece pie Valmieras ir $1200 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{dnn}$ [16]. Ievērojot virszemes pietece, upes vidējā gada caurtece pie Valmieras ir vismaz $1200 \cdot 10^3 \cdot 3 = 3600 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{dnn}$.

Ja modeļa slāņa Q3 biezums bāzes teritorijā nebūtu 4.0 m, tad ar MT3D programmu iegūtie rezultāti būtu kļūdaini, jo aprēķina sākuma dati par piesārņojuma avotu nebūtu saskaņoti ar eksperimentāli iegūtajiem datiem par pazemes ūdens piesārņojumu. Pareizas ģeoloģisko slāņu ģeometrijas izmantošana ir būtisks noteikums ticamu rezultātu iegūšanai ar MT3D programmu.

VI. SECINĀJUMI

Lai novērtētu Valmieras bijušās mazuta bāzes naftas produktu piesārņojuma kaitējumu pazemes ūdeņiem, Valsts SIA "Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs" kopā ar Rīgas Tehnisko universitāti izveidoja un izmantoja piesārņotās teritorijas lokālu hidroģeoloģisko modeli. Modelis izveidots izmantojot hidroģeoloģiskās izpētes [8], [9], urbumu datu bāzes, VĢF un Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa LAMO4 datus. Modelēšanas rezultāti pārlicina, ka naftas produktu piesārņojums pazemes ūdeņu bijušajā bāzē praktiski neietekmē vides kvalitāti. Hidroģeoloģiskā un piesārņojuma masu transporta modeļa veidošanas un izmantošanas aprakstus var izmantot modelēšanas speciālisti pazemes ūdens piesārņojuma pētīšanas metožu pilnveidošanai.

Lokālais Valmieras hidroģeoloģiskais modelis izveidots projekta "INSURE" (CB Nr. 39) ietvaros.

Latvijas hidroģeoloģiskais modelis LAMO4 ir izveidots, īstenojot Valsts pētījumu programmu "EVIDenT".

VII. LITERĀTŪRAS SARAKSTS

- [1] A. Spalviņš, "Geological Model of Latvia Developed at Riga Technical University (2010–2015)," *Boundary Field Problems and Computer Simulation*, vol. 55, pp. 5–11, Dec. 2016. <https://doi.org/10.7250/bfpcs.2016.001>

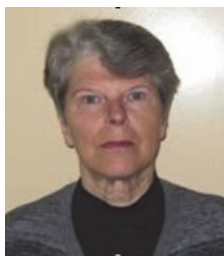
- [2] Environmental Simulations, Inc. *Groundwater Vistas. Version 6, Guide to using*, 2011.
- [3] W. Harbaugh, "MODFLOW-2005, U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model: The Ground-Water Flow Process," *US Geological Survey Techniques and Methods 6-A16*, chap. 16, book 6. Virginia: U.S. Geological Survey, Reston USGS, 2005 [Online]. Available: http://inside.mines.edu/~epoeter/583CSM/DOC4_MODFLOW2005-TM6A16.pdf
- [4] D. W. Pollok, *User's Guide for MODPATH/MODPATH-Plot, Version 3: A Particle Tracking Post-Processing Package for MODFLOW, the US Geological Survey Finite-Difference Groundwater Flow Model*, Virginia: U.S. Geological survey, Sep. 1994 [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/of/1994/0464/report.pdf>
- [5] C. Zheng and P. P. Wang, *MT3D99 A Modular Three Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems*. Alabama University, Tuscaloosa, 1999.
- [6] Golden Software, Inc., *SURFER-12 for Windows, Users manual, Guide to Using*, 2015.
- [7] Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūras digitālie reljefa dati.
- [8] P. Birzgalis, Pārskats "Ar naftas produktiem potenciāli piesārņotās mazuta saimniecības teritorijas izpētes stratēģijas izstrāde, ietverot teritorijas topogrāfisku uzmērīšanu Valmierā, Dzelzceļa ielā 9", SIA Vides konsultāciju birojs, Rīga, 20 lpp., 2016.
- [9] P. Birzgalis, Pārskats "Par ģeoloģiskās izpētes darbiem objektā mazuta bāze Valmierā, Dzelzceļa ielā 9, SIA Vides konsultāciju birojs, Rīga, 15 lpp., 2017.
- [10] A. Spalviņš, J. Slangens, I. Lāce, K. Krauklis, and O. Aleksāns, "Efficient Methods Used to Create Hydrogeological Model of Latvia," *International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.MO.S)*, vol. 6, no. 5, Oct. 2013
- [11] M. Indulēvičs, *Pārskats par inženierģeoloģisko izpēti objektam "Valmieras ģenerālpilns"*. Rīga: Latgiprogorstorj, VĢF Inv. Nr. 10293, 1985.
- [12] A. Spalviņš, K. Krauklis, and I. Lāce, "Ģeoloģisko slāņu ūdens filtrācijas koeficienta kartes Latvijas hidroģeoloģiskajā modelī," *Latvijas Universitātes 75. zinātniskā konference, Starptautiskais simpozijums "Smiltis un stikls"*, Latvijas Universitāte, Zinātnisko rakstu krājums, 21–30. lpp., 2017.
- [13] MK 2002. gada 12. marta noteikumi Nr. 118, "Ūdens kvalitātes normatīvi pazemes ūdeņu stāvokļa novērtēšanai un prasības pazemes ūdeņu attīrīšanai piesārņotās vietās".
- [14] MK 2005. gada 25. oktobra noteikumi Nr. 804, "Noteikumi par augsnes un grunts kvalitātes normatīviem".
- [15] E. R. Weiner, *Applications of Environmental Aquatic Chemistry. A Practical guide*, CRC Press, p. 400, 2007.
- [16] A. Spalviņš, J. Slangens, I. Lāce, O. Aleksāns, K. Krauklis, V. Skibelis, and I. Eglīte, "The Novel Updates of the Hydrogeological Model of Latvia," *Boundary Field Problems and Computer Simulation*, vol. 54, p. 23, Dec. 2015. <https://doi.org/10.7250/bfpcs.2015.005>



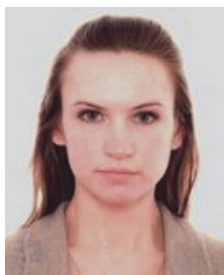
Aivars Spalviņš was born in Latvia. In 1963, he graduated from the Riga Polytechnical Institute (since 1990 – Riga Technical University) as a Computer Engineer. A. Spalviņš is the Head of the Environment Modelling Centre of RTU. His research interests include computer modelling of groundwater flows and migration of contaminants.
E-mail: Aivars.Spalvins@rtu.lv



Kaspars Krauklis received the Master's degree in Computer Systems from the Riga Technical University in 2007 and the Certificate in Teaching of Engineering Sciences from the Institute of Humanities of RTU in 2005. He is a researcher at the Environment Modelling Centre of RTU.
E-mail: kasparskrauklis@gmail.com



Inta Lāce was born in Latvia. In 1971, she graduated from Riga Polytechnical Institute (since 1990 – Riga Technical University) as a Computer Engineer. In 1995, I. Lāce received the Master's degree in Applied Computer Science. Since 1991, she is a researcher at the Environment Modelling Centre of RTU.
E-mail: intalace@yahoo.com



Daiga Pipira graduated from the University of Latvia as a Geologist. In 2015, she received the PhD in the field of Bedrock Geology. D. Pipira is the Head of the Subsoil Department at the State Ltd. "Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre".
E-mail: daiga.pipira@lvgmc.lv



Sandra Karuša received the Master's degree in Geology from the University of Latvia in 2016 and currently is a PhD student. S. Karuša is a hydrogeologist in the Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre (LEGM) and deals with groundwater modeling, groundwater management issues and subsoil microbiology biodiversity and ecological services.
E-mail: sandra.karus@lvgmc.lv



Inga Retiķe received the Master's degree in Environmental Science from the University of Latvia (UL), Faculty of Geography and Earth Sciences in 2012. Currently she is a PhD student at the UL and working as a hydrogeology expert in the Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre. Main research topics are groundwater status assessment in Latvia according to the European legislation; groundwater hydrochemistry with respect to multivariate statistics and chemistry forecasting tools.
E-mail: inga.retiķe@lvgmc.lv



Madara Mame received the Master's degree in Geography from the University of Latvia in 2013. Works as a hydrogeologist in the Latvian Environment, Geology and Meteorology Center since 2016.
E-mail: madara.mame@lvgmc.lv



Linda Fībiga received the Master's degree in Heat, Gas and Water Technology from Riga Technical University in 2008. Currently she is working in the Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre (LEGM) dealing with river basin management issues.
E-mail: linda.fibiga@lvgmc.lv

Hydrogeological Modelling of Oil Contaminated Site in Valmiera

Aivars Spalviņš¹, Kaspars Krauklis², Inta Lāce³, Daiga Pipira⁴, Sandra Karuša⁵, Inga Retiķe⁶, Madara Mame⁷, Linda Fībiga⁸

¹⁻³ Riga Technical University, Latvia, ⁴⁻⁸ Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre, Latvia

The former black fuel (mazut) storage area in Valmiera is contaminated by oil products. However, until now, no research was done on the evaluation of the contaminated area influence on the quality of groundwater and soil pollution. In 2016-2017, the company "Vides konsultāciju birojs" investigated the area in order to obtain information on the contamination. The Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre together with Riga Technical University have developed the local hydrogeological model for the research on the groundwater contamination and its migration in the groundwater flow. The model base was extracted from the hydrogeological model of Latvia (*LAMO4*). It has been found out that contaminated groundwater may reach the River Gauja in 60 years. During the first 15 years in sandy loam only 40 metres can be covered. The remaining 45 years may be spent to reach the river that is located 1.8 km from the base. During the first 15 years, due to dilution, the concentration of contaminants drops 60 times. During this time period, intensive contaminant destruction may take place. Results of hydrogeological modelling convince that groundwater contamination has only slight influence on the base area environmental quality.

Descriptions of the building and using the hydrogeological and contaminant transportation models can be useful for modellers dealing with groundwater contamination problems.

Keywords – Contaminated groundwater, hydrogeological model, oil products.

I. PIELIKUMS

A. Pazemes ūdens piesārņojums izpētes apgabalā

Pazemes ūdeņu piesārņojuma modelēšanai ar *MT3D* programmu bija jāveic *BTEX* komponentu *B* (benzols), *T* (toluols), *E* (etilbenzols) un *X* (ksilolu summa) eksperimentāli iegūto datu [8] apstrāde. Aprēķina apgabalā ar izmēru $36 \text{ m} \times 38 \text{ m} = 1368 \text{ m}^2$ (skat. 1a. att.) izmantota *Kriging* interpolācijas metode [7]. Apgabalā iekļauti urbumi U1, U10, U11, kuros piesārņojuma koncentrācija ir lielāka par fonu $0,25 \text{ mg/m}^3 = 0,25 \text{ } \mu\text{g/l}$ komponentēm *B*, *T*, *E* un $1,0 \text{ mg/m}^3$ *X* komponentei. Fona koncentrāciju uz apgabala perimetru nodrošina palīgurbumi, kuri novietoti 2 m attālumā viens no otra. IA. tabulā skatāms aprēķina rezultāts: vidējā koncentrācija C_{vid} , masa *M* un koncentrācija avotā $C_{\text{avotā}}$ trīs piesārņojuma avota šūnās.

Izmantotās fona koncentrācijas ir tuvas MK noteikumu [13] normatīvajiem mērķlielumiem, $\mu\text{g/l}$: $B = 0,2$; $T = E = X = 0,5$; vidējās koncentrācijas ir būtiski mazākas par robežlielumiem, $\mu\text{g/l}$: $B = 5$; $T = 50$; $E = X = 60$.

Kopīgā *BTEX* masa ir 6,38 grami, un vidējā koncentrācija ir $9,72 \text{ mg/m}^3$. Piesārņojuma avotā fiksēta $C_{\text{avotā}} = 44,32 \text{ mg/m}^3$. Šo lielumu izmanto *BTEX* piesārņojuma faktisko koncentrāciju un masas aprēķinos.

B. Grunts piesārņojums izpētes apgabalā

Pārskata [8] dati par grunts piesārņojumu nav izmantoti modelēšanas eksperimentos. Tie ir apstrādāti ar *Kriging* metodi aprēķina apgabalā ar izmēru $26 \text{ m} \times 14 \text{ m} = 364 \text{ m}^2$ (skat. 2a. att.). Apgabalā iekļauti urbumi G10 un U11, kuru koncentrācijas pārsniedz 25 mg/kg . Fona koncentrāciju uz apgabala perimetru nodrošina palīgurbumi, kuri novietoti 2 m attālumā viens no otra. IIA. tabulā ir skatāms aprēķina rezultāts četriem parauga ņemšanas intervāliem: vidējā koncentrācija C_{vid} un masa *M*. Kopīgā masa $M = 6565,5 \text{ kg}$; intervālos: $M_{01} = 538,1 \text{ kg}$, $M_{12} = 3639,6 \text{ kg}$, $M_{23} = 2179,8 \text{ kg}$ un $M_{34} = 470,3 \text{ kg}$. Naftas produktu summas vidējā koncentrācija visos paraugu ņemšanas intervālos pārsniedz MK noteikumu [14] normatīvu $B = 500 \text{ mg/kg}$; intervālā (1–2) C_{vid} pārsniedz normatīvu $C = 5000 \text{ mg/kg}$.

Nav pārliecības, ka aprēķina rezultāti patiesi atbilst faktiskajam grunts piesārņojumam bijušajā mazuta bāzē, jo rezultātu faktiski nosaka dati tikai vienā urbumā (G10). Kopīga *BTEX* svara daļa 8,5 % intervālā (3–4) nav raksturīga mazutam [15]. Iespējams, ka bāzes teritorijā notikuši citu naftas produktu izlijumi.

IA. TABULA

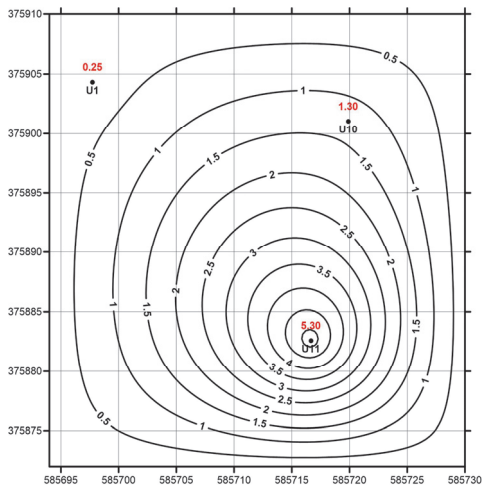
KOPSAVILKUMS PAR PAZEMES ŪDENS PIESĀRŅOJUMA APRĒĶINU IZPĒTES APGABALĀ

Vielā	Benzols	Toluols	Etilbenzols	Ksilols	<i>BTEX</i>
1	2	3	4	5	2 + 3 + 4 + 5
V_c	1823,60	1013,70	1150,40	3314,00	13301,70
C_{vid} , mg/m^3	1,33	0,74	0,84	6,81	9,72
<i>M</i> , g	0,87	0,49	0,55	4,47	6,38
C_{fona} , mg/m^3	0,25	0,25	0,25	1,00	1,75
$C_{\text{avotā}}$, mg/m^3 (trīs šūnās)	6,07	3,37	3,83	31,05	44,32
Aprēķina laukums – 1368 m^2 ; Q3 slāņa biezums – 4 m; porainība – 0,12; C_{vid} , mg/m^3 , = $V_c / 1368$; V_c – “ <i>Kriging</i> tilpums” (skat. 1a. att.); M , g, = $1368 \cdot 4 \cdot 0,12 \cdot 0,001 \cdot C_{\text{vid}}$; $C_{\text{avotā}}$, mg/m^3 , = $C_{\text{vid}} \cdot 1368 / 300$					

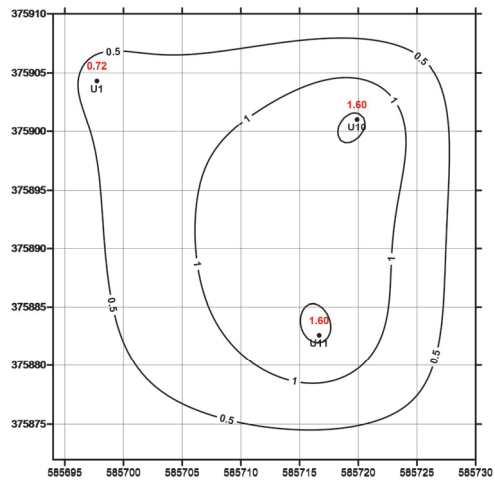
IIA. TABULA

KOPSAVILKUMS PAR NAFTAS PRODUKTU KONCENTRĀCIJU UN MASU GRUNTĪ ČETROS PARAUGU ŅEMŠANAS INTERVĀLOS (0–1) M, (1–2) M, (2–3) M, (3–4) M

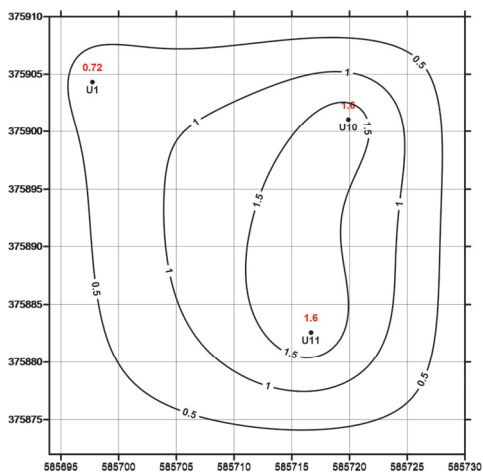
Intervāls	0–1	1–2	2–3	3–4	Kopā
1	2	3	4	5	2 + 3 + 4 + 5
V_c	195 874,0	2 584 895,0	1 548 129,0	333 996,0	4 662 894,0
C_{vid} , mg/kg	538,1	7101,4	4253,1	917,6	12810,2
<i>M</i> , kg	275,8	3639,6	2179,8	470,3	6565,5
C_{fona} , mg/m^3	25,0	25,0	25,0	25,0	100,0
Aprēķina laukums – 364 m^2 ; grunts intervāla biezums – 1 m; porainība – 0,12; grunts blīvums – 1,6; C_{vid} , mg/kg = $V_c / 364$; V_c – “ <i>Kriging</i> tilpums” (skat. 2a. att.); M , kg, = $364 \cdot 1 \cdot 0,88 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} \cdot C_{\text{vid}}$					



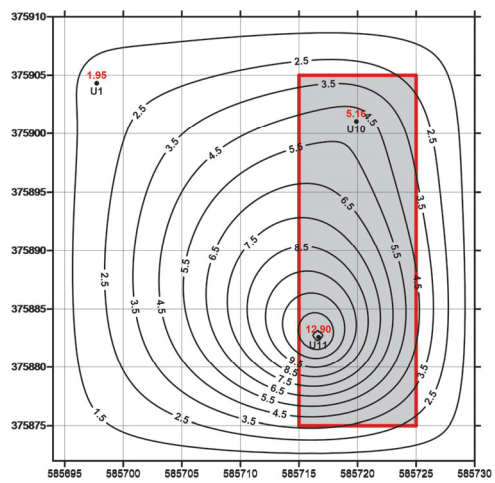
benzols



toluols

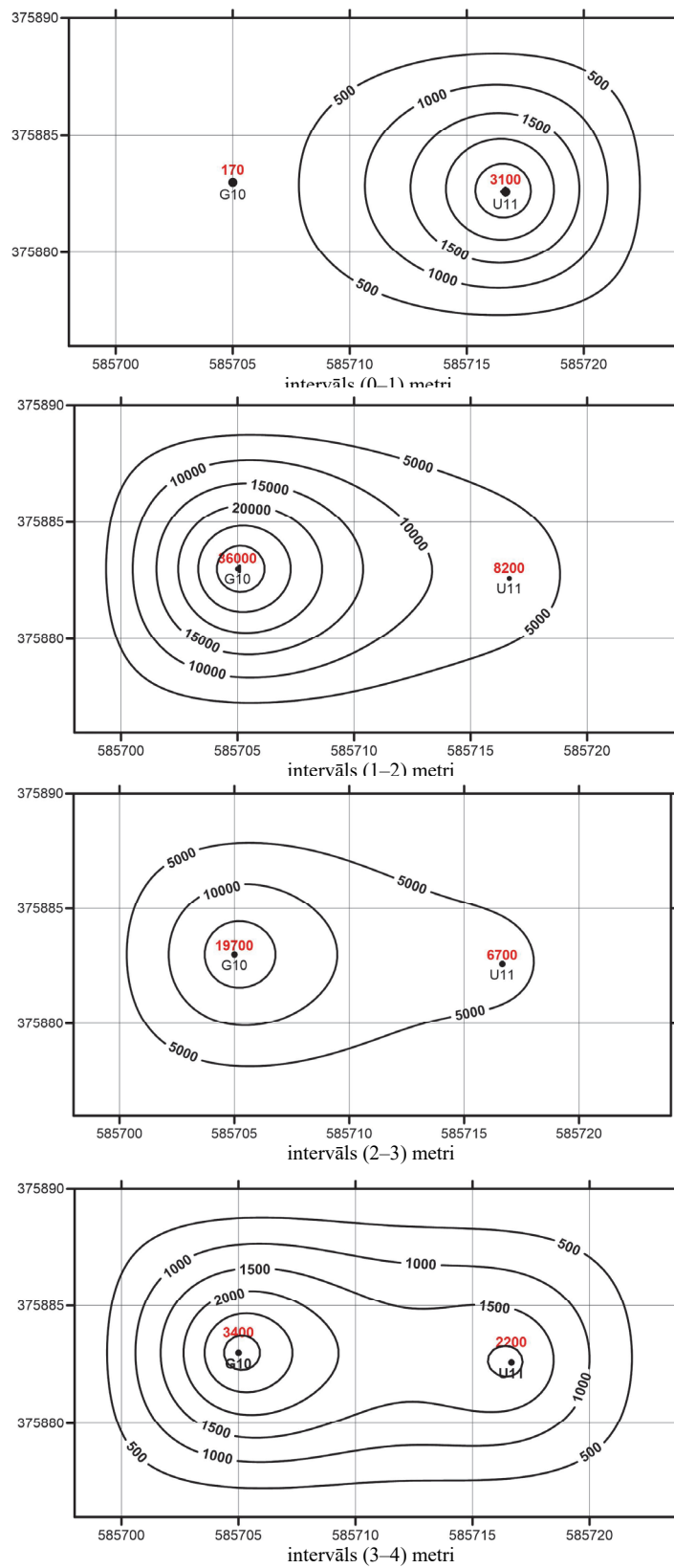


etilbenzols

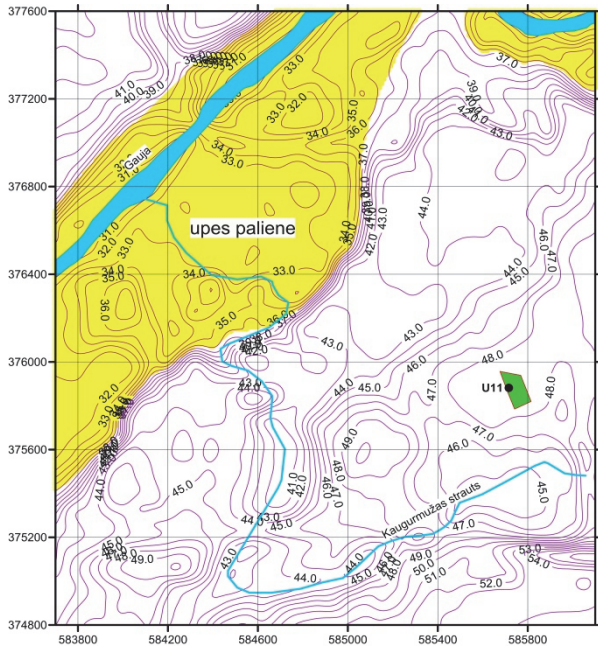


ksiloli

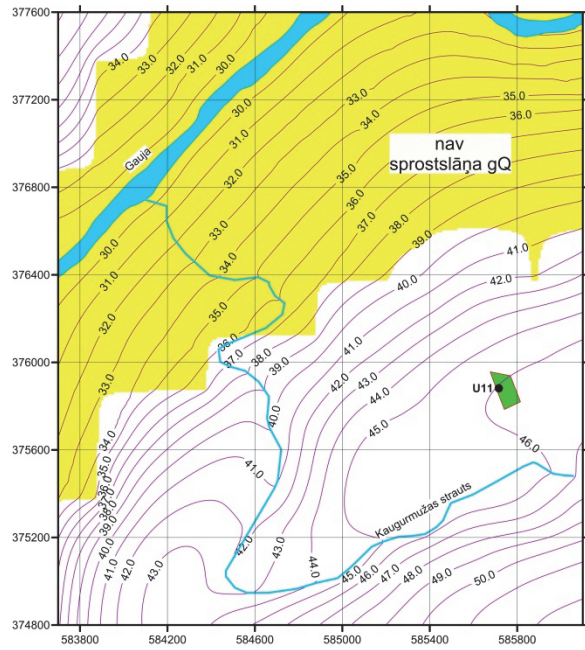
1a. att. Gruntsūdens *BTEX* komponentu koncentrācijas aprēķina apgabalā, mg/m^3 ; ksilolu kartē ietonētas trīs koncentrācijas avota šūnas.



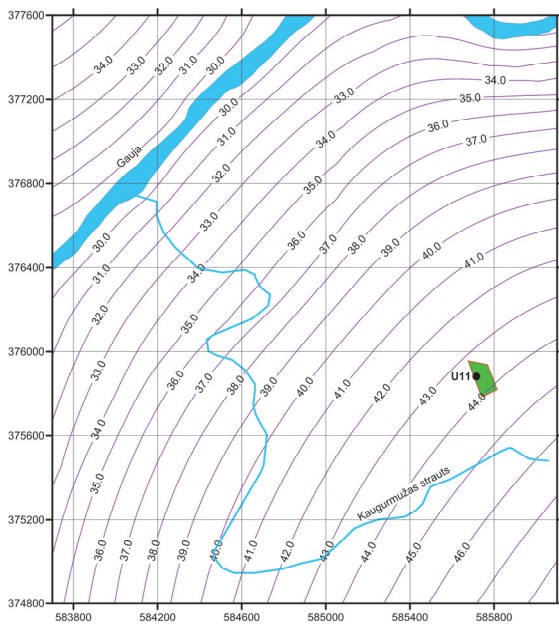
2a. att. Naftas produktu koncentrācija gruntī, mg/kg.



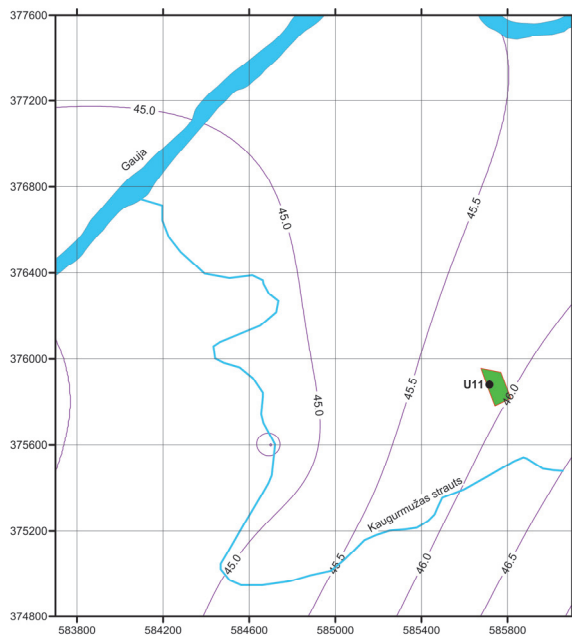
reljefs ar Gaujas upes palienu



pazemes ūdens līmeņu sadalījums Q horizontā

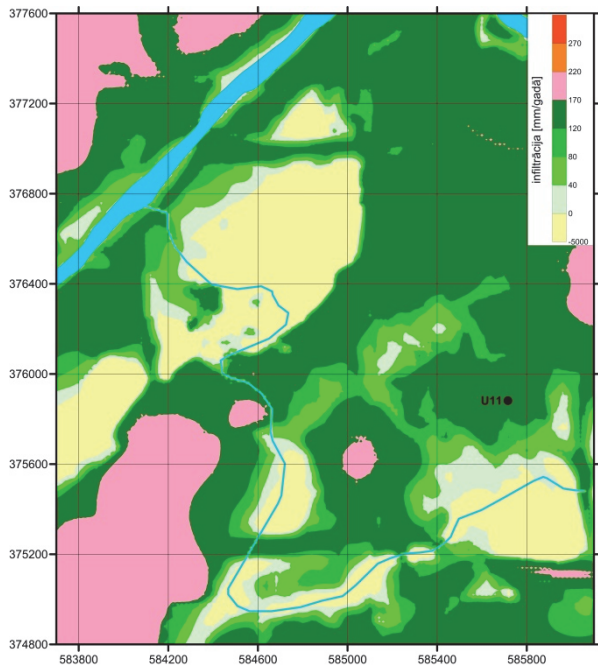


pazemes ūdens līmeņu sadalījums D2brt horizontā

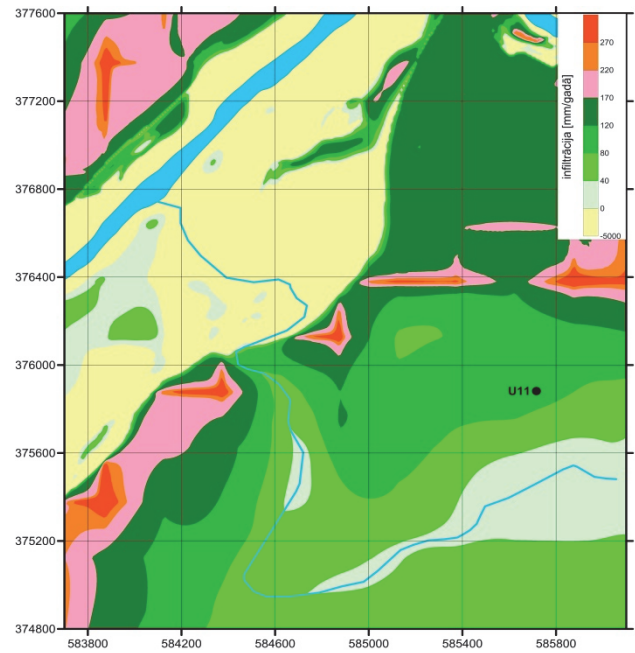


pazemes ūdens līmeņu sadalījums D2ar horizontā

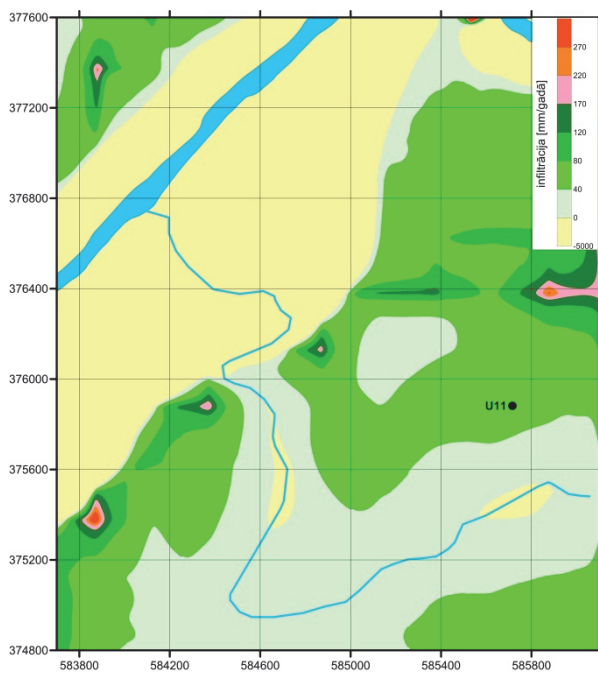
3a. att. Pazemes ūdens līmeņu sadalījums [m vjl]; izpētes apgabalā_urbumā U11 ir piesārņojuma maksimums.



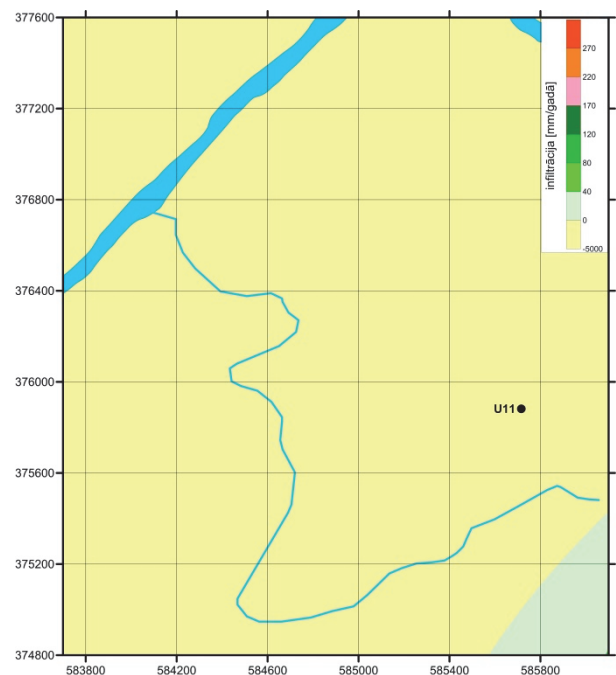
infiltrācijas plūsma Q3 slānī



infiltrācijas plūsma D2brt3 slānī

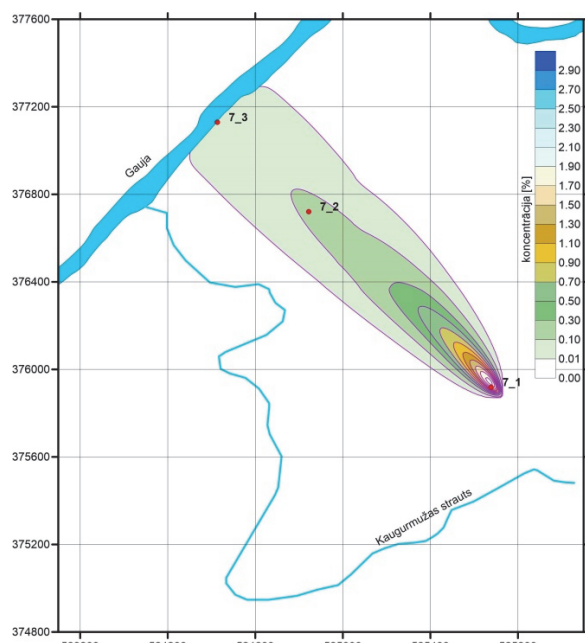
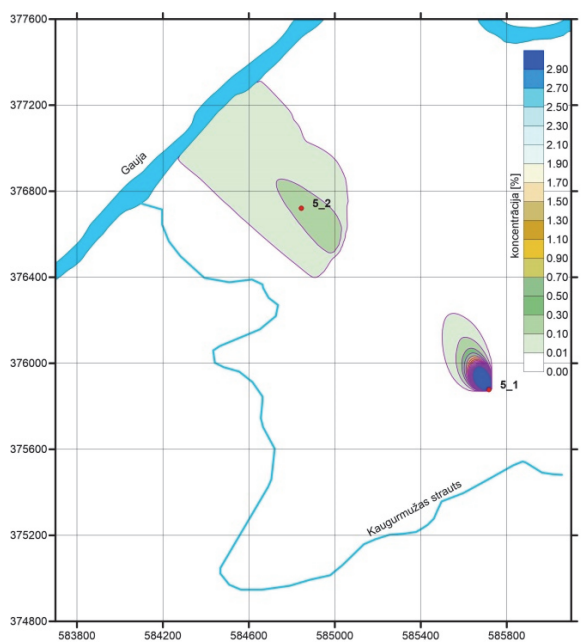
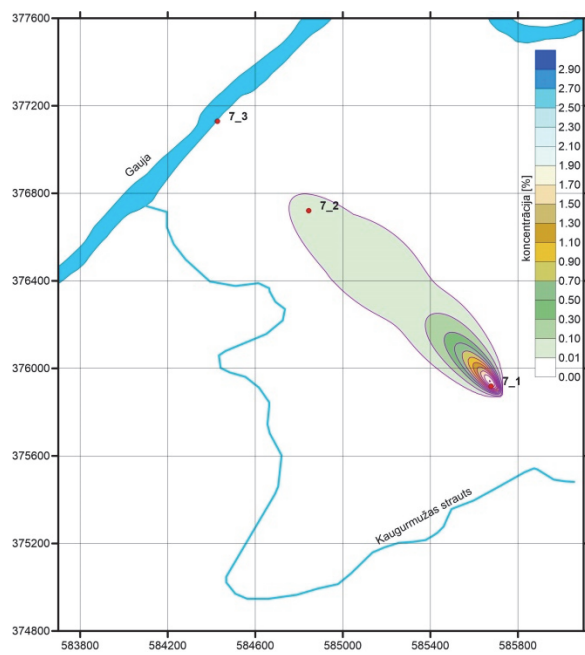
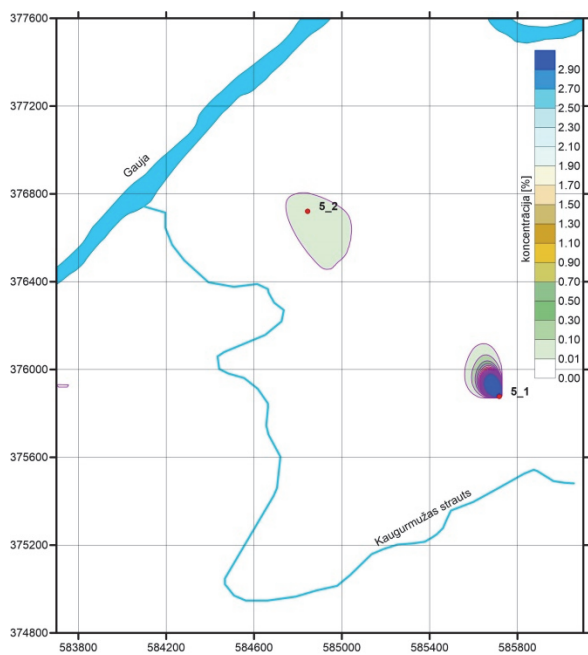


infiltrācijas plūsma D2brt2 slānī

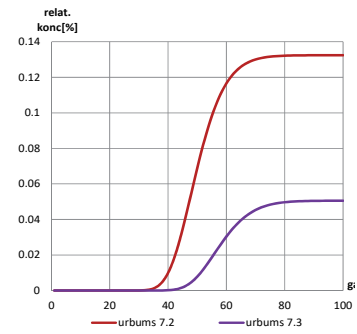
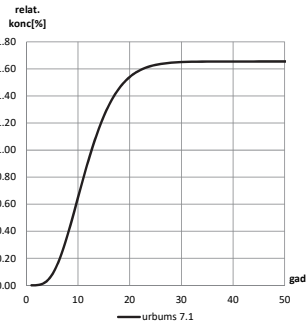
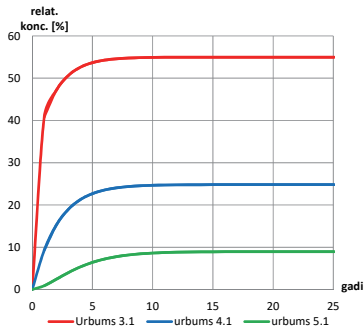


infiltrācijas plūsma D2ar slānī

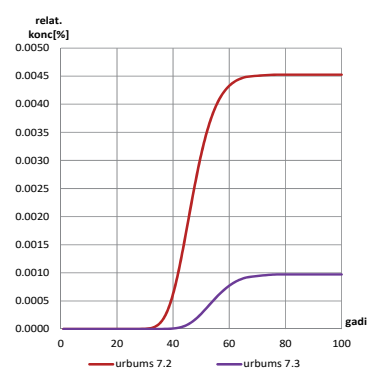
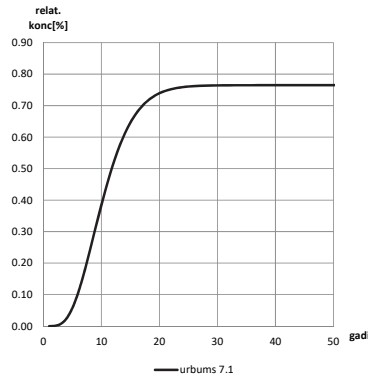
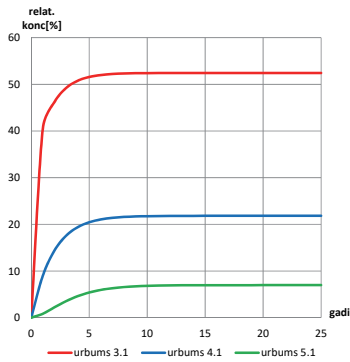
4a. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums, mm/gadā; izpētes apgabalā urbumā U11 ir piesārņojuma maksimums.



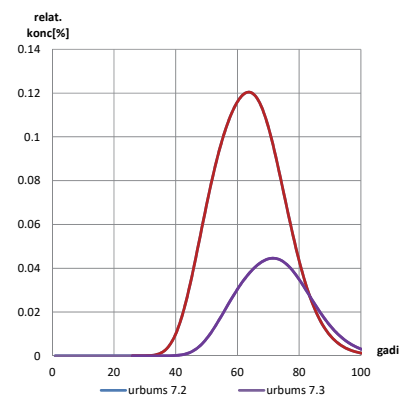
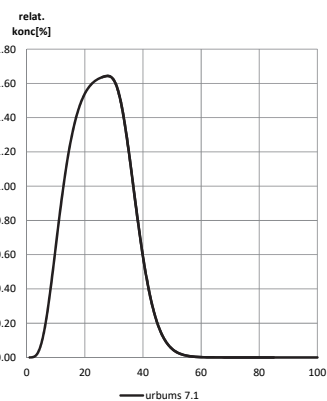
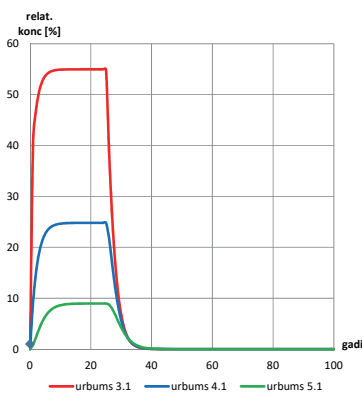
5a. att. Ar programmu MT3D aprēķinātā relatīvā koncentrācija, %, pirmajam eksperimentam.



pirmais eksperiments: $C_r = 100\%$



otrais eksperiments: $C_r = 100\%$, $t_{0,5} = 10$ gadi



trešais eksperiments: $C_r = 100\%$, pēc 25 gadiem likvidē C avotu

6a. att. Ar programmu *MT3D* aprēķinātie hidrogrāfi monitoringa urbumiem.