

# Modelling of Contaminant Mass Transport in Groundwater Flow Polluted by Sulphuric Goudron Pools of Incukalns

## Inčukalna sērskābā gudrona dīķu piesārņotā pazemes ūdens kustības datormodelēšana

Aivars Spalviņš<sup>1</sup>, Inta Lāce<sup>2</sup>, Kaspars Krauklis<sup>3</sup>, Tatjana Sorokina<sup>4</sup>, Henning Wallner<sup>5</sup>  
<sup>1-3</sup>Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija, <sup>4,5</sup>SIA Intergeo Baltic

**Kopsavilkums** – Inčukalna novadā Rīgas smērvielu rūpnīca divus grants karjerus no 1955. līdz 1970. gadam izmantoja kā izgāztuves šķidra gudrona (sērskābes un naftas produktu maisījums) glabāšanai. Šis izgāztuves nosauktas par Ziemeļu un Dienvidu dīķiem. Ziemeļu dīķis ir aizbērts ar smiltīm, bet Dienvidu dīķī šobrīd atrodas šķidr, pastveida un sacietējis gudrons. Jau 60 gadus abi dīķi piesārņoja pazemes ūdeņus, kuri virzās uz Gaujas upi. Ir uzsākta Dienvidu dīķa satura ekskavācija. Paredzēts aizvērt ar gudronu piesārņotās Ziemeļu dīķa smiltis. Lai optimizētu jau uzsāktos vides atveseļošanas darbus, Rīgas Tehniskās universitātes speciālisti firmas INTERGEO uzdevumā veica piesārņojuma, īpaši virsmas aktīvo vielu (VAV), masas transporta datormodelēšanu. Aprēķināts, ka Ziemeļu un Dienvidu dīķu VAV sasniegs Gaujas upi pēc aptuveni 25 un 80 gadiem (skaitot no 2015. gada). Upē iekļūdušo VAV masa praktiski neietekmēs upes ūdens kvalitāti, jo, upes ūdenim sajaucoties ar VAV, daudzkārt samazinās VAV koncentrācija upē. Novērtēta sanācības pasākumu, kuri jāveic pēc dīķu satura ekskavācijas, efektivitāte.

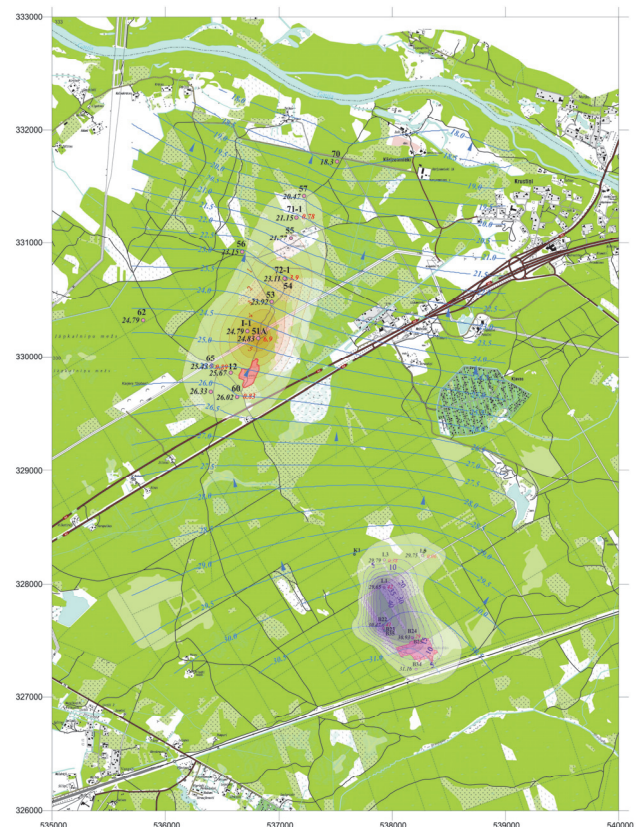
**Atslēgas vārdi** – Hidroģeoloģiskais modelis, masas transporta modelēšana, virsmas aktīvās vielas (VAV).

### I. IEVADS

Inčukalna pagastā eksistē vēsturisks pazemes ūdens piesārņojums, kura avots ir toksisko atkritumu izgāztuves divos grants karjeros. Tos laikā no 1955. līdz 1970. gadam papildēja ar rūpniecības atkritumiem – sērskābo gudronu. Šī viela ir naftas produktu un sērskābes maisījums. Tā izveidojās Ziemeļu (1955. g.) un Dienvidu (1965. g.) dīķu izgāztuvēs, kuras piesārņo pazemes ūdeni arī mūsdienās. Piesārņotais ūdens lielā dziļumā (~50 metri no zemes virsmas) smilšakmens slānī pārvietojas uz Gaujas upi. Piesārņojuma areāli skatāmi 1. attēlā.

Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Vides modelēšanas centra (VMC) speciālisti ar datormodelēšanas līdzekļiem ir ieguvuši prognozi par piesārņojuma kustību no abiem dīķiem [1]. Prognoze ir skatāma 2. attēlā, kur parādīti galvenie dīķu radītā piesārņojuma ceļi laikā no abu dīķu eksistences sākuma. No 2. attēla var secināt, ka Ziemeļu un Dienvidu dīķu radītais piesārņojums sasniegs Gaujas upi attiecīgi 2035. un 2095. gadā. Ja par laika atskaites sākumu mūsdienās izvēlas 2015. gadu, tad tas notiks attiecīgi pēc 20 un 80 gadiem.

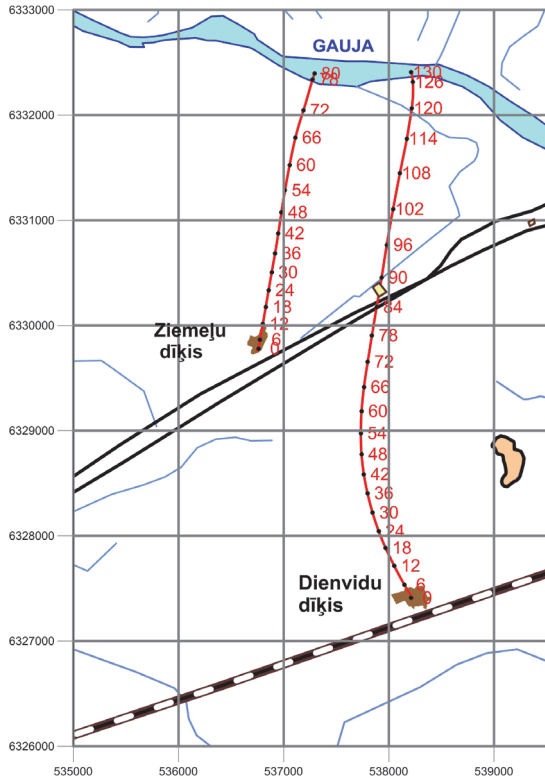
Šobrīd tiek īstenota abu gudrona dīķu sanācija. Tā šiem dīķiem ir atšķirīga, jo Ziemeļu dīķī gudrons ir sajaukts ar smiltīm, bet Dienvidu dīķī veido šķidr, pastveida un sacietējis gudrons, kas piepilda smilšu karjeru. Tāpēc Dienvidu dīķim ir iespējama gudrona ekskavācija, bet Ziemeļu dīķī var aizvērt tikai daļu no smilšu un gudrona maisījuma. Arī hidroģeoloģiskie apstākļi, kuri izsauc pazemes ūdens piesārņojumu, ir abiem dīķiem atšķirīgi.



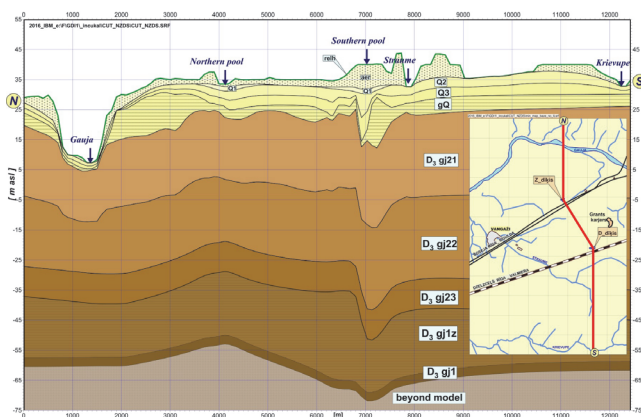
1. att. Ziemeļu un Dienvidu dīķa piesārņojuma areāli.

Kaitējumu dabai var nodarīt pazemes ūdenī izšķīdušās virsmas aktīvās vielas (VAV), kuras ir ļoti toksiskas. To pieļaujamā koncentrācija rūpnieciskajam un dzeramajam ūdenim ir 0,3 mg/l un 0,03 mg/l.

VMC speciālisti 2016. gadā, īstenojot personu apvienības *INTERGEO* pasūtījumu, veica Ziemeļu un Dienvidu dīķa hidroģeoloģisko apstākļu datormodelēšanu. Pētījumā tika precizētas prognozes par VAV masas transportu pazemes ūdeņos un novērtēta sanācības pasākumu efektivitāte, kuri īstenojami pēc gudronu dīķu satura aizvākšanas.



2. att. Ar *MODPATH* sistēmu prognozētā piesārņojuma kustība no Ziemeļu un Dienvidu dīķa uz Gaujas upi.



3. att. Vertikālais griezumš caur Ziemeļu un Dienvidu dīķi.

Rakstā izmantoti pārskata [1] materiāli. Datormodelēšanai izmantots Inčukalna teritorijas hidroģeoloģiskais modelis (HM), kura apraksts dots pielikumā. HM darbojas licenzētas programmas *Groundwater Vistas* (GV) vidē [2]. GV sastāvā tiek izmantotas programmatūras *MODFLOW* (HM realizācija) [3]; *MODPATH* [4] un *MT3D* [5] (piesārņojošo vielu kustības un masas transporta prognozēšanas modeļi).

Modelēšanas rezultātu grafisko materiālu sagatavošanai izmantota sistēma *SURFER* [6].

## II. VIRSMAS AKTĪVO VIELU MASAS NOVĒRTĒJUMS

VAV masas lielums abu gudronu dīķu areālos tika novērtēts 2005. gadā [7], lai pamatotu ES līdzekļu piešķiršanu gudronu dīķu sanācijai. Toreiz VAV masa tika aprēķināta pilnam smilšakmens slāņa D3gj2 piesārņotajam tilpumam. Šis aprēķins 2016. gadā bija būtiski jākorģē, jo tika konstatēts, ka VAV piesārņo tikai šī slāņa apakšējo daļu. Inčukalna HM vertikālā shematizācija (1p. tab. pielikumā) paredz, ka slānis D3gj2 ir sadalīts trīs apakšslāņos D3gj21, D3gj22, D3gj23 (3. att.). Slānis D3gj23 ir 10 metrus biezs, bet slāņu D3gj21 un D3gj22 biežumi ir vienādi. Reālais slāņa D3gj2 piesārņotās daļas biežums nav zināms, tomēr nosacīti pieņemts, ka VAV atrodas tikai slānī D3gj23. Korģētā prognoze VAV masai 2005. gadam skatāma I tabulā [1], kur VAV masa ir samazināta ~6 reizes, salīdzinot ar sākotnējo prognozi 2005. gadā [7], jo VAV piesārņo tikai slāņa D3gj2 apakšējo daļu.

VAV masas aprēķinā un VAV masas transporta modelēšanā ar *MODPATH* un *MT3D* sistēmām visiem HM slāņiem ir izmantota efektīvās porainības vērtība 0,27.

### I TABULA

KORĢĒTĀ PROGNOZE PAR VAV PIESĀRŅOJUMU GAUJAS HORIZONTĀ D3GJ2 ZIEMEĻU UN DIENVIDU DĪĶA AREĀLĀ 2005. GADĀ

N.p.k.	Parametrs	Ziemeļu dīķis	Dienvidu dīķis
1	Piesārņotais laukums, ha	108	91
2	Piesārņotā D3gj23 horizonta biežums, m	10	10
3	Piesārņotais horizonta tilpums, m <sup>3</sup>	10,8 × 10 <sup>6</sup>	9,1 × 10 <sup>6</sup>
4	Piesārņotā ūdens tilpums, m <sup>3</sup>	2,92 × 10 <sup>6</sup>	2,46 × 10 <sup>6</sup>
5	Virsmas aktīvo vielu masa, kg	17,5 × 10 <sup>3</sup>	20,9 × 10 <sup>3</sup>
6	Vidējā virsmas aktīvo vielu koncentrācija, mg/l	6,0	8,5
7	Piesārņojuma masas samazinājums, reizes	6,06	6,27

Prognozētā VAV piesārņojuma dati 2015. gadā skatāmi II tabulā [1], kurā ņemts vērā, kā 2015. gadā ir izmainījušās abu dīķu areālu vidējās VAV koncentrācijas: Ziemeļu dīķim (6,0 → 2,8) mg/l; Dienvidu dīķim (8,5 → 12,7) mg/l. Tāpēc notikusi VAV areālu masas izmaiņa, salīdzinot ar 2005. gadu.

### II TABULA

PROGNOZĒTĀS VAV PIESĀRŅOJUMS 2015. GADĀ GAUJAS HORIZONTĀ D3GJ2

N.p.k.	Parametrs	Ziemeļu dīķis	Dienvidu dīķis
1	VAV masa 2005. g., kg	17,5 × 10 <sup>3</sup>	20,9 × 10 <sup>3</sup>
2	Vidējā VAV koncentrācija, mg/l	2,8	12,7
3	VAV masa 2015. g., kg	8 × 10 <sup>3</sup>	30,5 × 10 <sup>3</sup>
4	Izmaiņa attiecībā pret 2005. gadu, reizes	0,46	1,49

VAV masas samazināšanos Ziemeļu dīķa piesārņotajam areālam var izsaukt dīķa pamatnes grunts poru piesārņojums ar naftas produktiem, kā arī VAV sabrukšana.

Iespējams, ka VAV noplūdes palielinājumu Dienvidu dīķim var saistīt ar gudrona ekskavācijas darbu ietekmi.

### III. AR SISTĒMU MODPATH IEGŪTĀS PROGNOZES

Sistēma *MODPATH* [4] prognozē ūdens daļiņu kustības trajektoriju telpā un laikā. Ar šīs sistēmas palīdzību iegūts 2. attēla rezultāts par VAV kustību uz Gaujas upi. Ar *MODPATH* noskaidrots, ka VAV piesārņojums caur sprostslnāni D3gjlz var sasniegt slāni D3gjl pēc ~1000 gadiem, t. i., horizonta D3gjl piesārņošanas iespēja ar VAV ir maza.

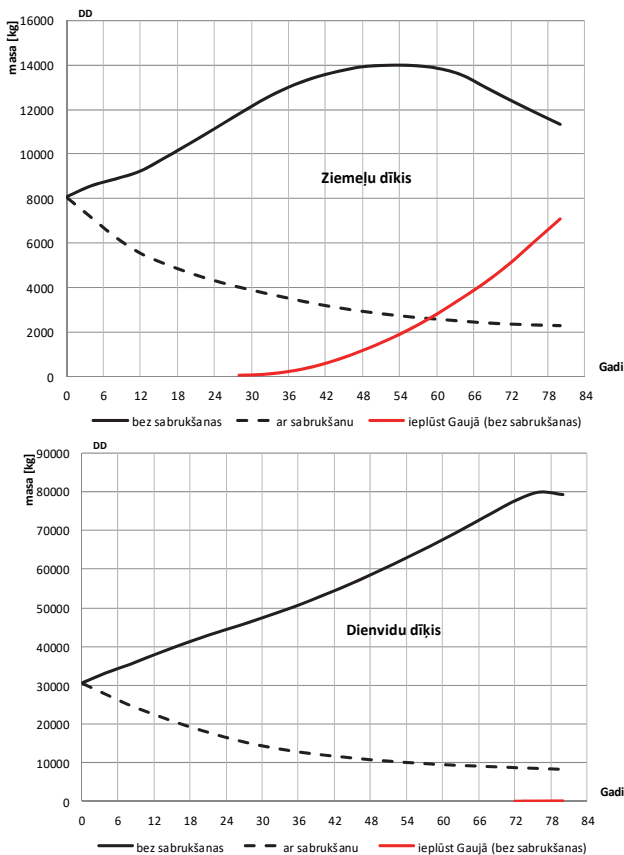
### IV. AR SISTĒMU MT3D IEGŪTĀS PROGNOZES PAR VAV MASAS IZMAIŅU LAIKĀ

Sistēma *MT3D* [5] aprēķina piesārņojošo vielu masu, tās kustību un arī piesārņojuma koncentrāciju laikā un telpā. Ziemeļu un Dienvidu dīķa piesārņotajam areālam aprēķināta VAV masa, ja nav vai ir veikta dīķa satura ekskavācija un ja notiek vai notiek VAV sabrukšana (nelabvēlīgs un optimistisks variants).

Ja notiek VAV sabrukšana, tad VAV koncentrācijas  $c_t$  izmaiņu laikā  $t$  dod formula [8]:

$$c_t = c_0 / \exp(0.7 / t_{0.5}), \quad (1)$$

kur  $c_0$  ir VAV sākuma koncentrācija;  $t_{0.5}$  ir VAV s sabrukšanas konstante, kas vienāda ar laiku, kurā  $c_0$  samazinās divas reizes. Datormodelēšanai izmantots  $t_{0.5} = 15$  gadi, kura vērtība rekomendēta monogrāfijā [8].



4. att. Ar *MT3D* sistēmu prognozētā VAV masas izmaiņa Ziemeļu un Dienvidu dīķa apkārtnē piesārņotajā areālā bez un ar VAV sabrukšanas ievērošanu, ja nav veikta dīķu sanācija.

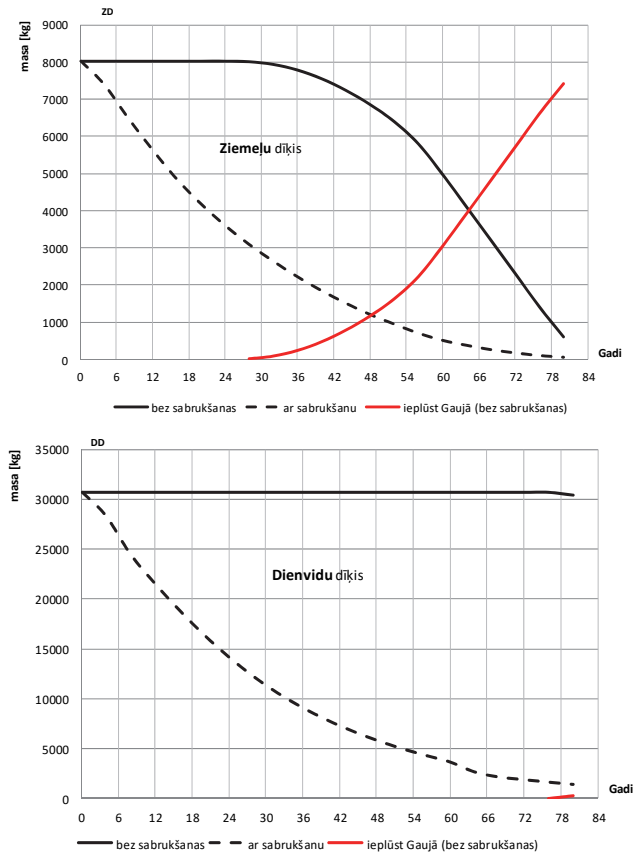
Šobrīd nav eksperimentālu datu, kuri dotu iespēju noteikt reālo  $t_{0.5}$  vērtību (iespējams, ka tā mainās laikā VAV novecošanās procesa ietekmē). Tomēr, īpaši Ziemeļu dīķa VAV areālam, arī  $t_{0.5} = 15$  gadi dod vērtīgu prognozi par VAV sabrukšanas būtisko ietekmi vismaz 80 gadu ilgā laikā.

Ar *MT3D* sistēmu aprēķinātā VAV masas izmaiņas grafiki abiem dīķiem ir skatāmi 4. attēlā (nav gudrona ekskavācijas) un 5. attēlā (ir notikusi dīķu satura ekskavācija).

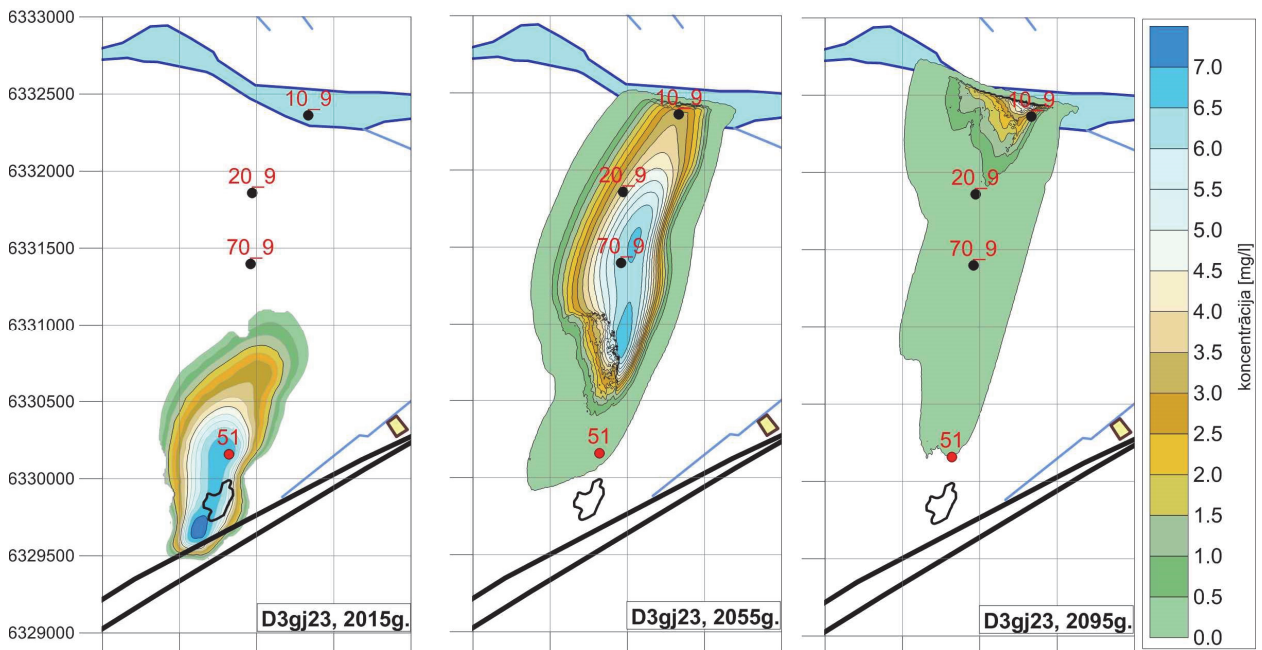
Vislielākā praktiskā nozīme ir Ziemeļu dīķa VAV areāla kustības pētīšanai, jo tas jau pēc 20–25 gadiem sasniegs Gaujas upi, bet no Dienvidu dīķa VAV sāks ieplūst upē tikai pēc 75–80 gadiem (4. att. apakšējais grafiks).

Ja notiek dīķu satura ekskavācija un nav VAV sabrukšanas, tad VAV masa Ziemeļu un Dienvidu dīķa areālam pieaug 1,75 un 2,66 reizes, salīdzinot ar 2015. gada stāvokli (4. att.).

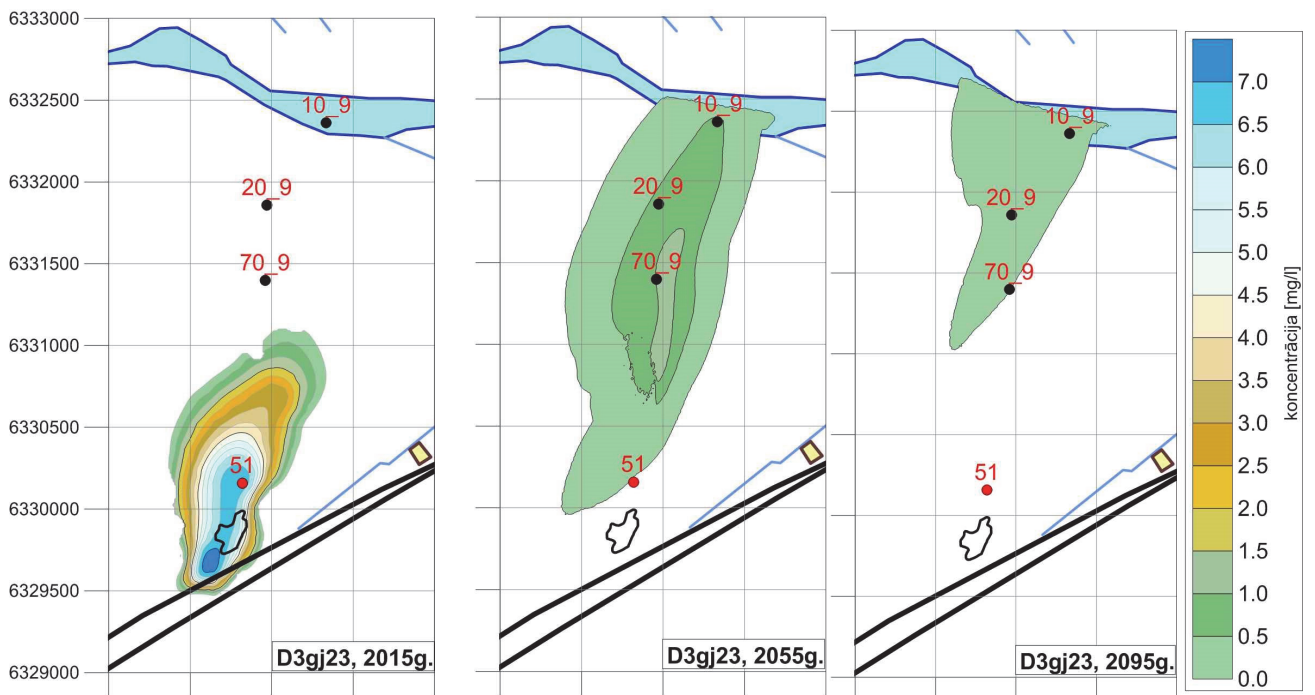
Ja dīķu saturs ir aizvākts (5. att.), VAV masa sāk samazināties ar to brīdi, kad VAV areāls sasniedz upi. Ja notiek VAV sabrukšana, tad variantā ar eskavētiem dīķiem pēc 80 gadiem ģeoloģiskā vidē praktiski nav VAV piesārņojuma. Ja dīķi nav eskavēti, tad pēc 80 gadiem pazemes ūdenī saglabājas VAV (attiecīgi ~2000 kg un ~10 000 kg Ziemeļu un Dienvidu dīķa areālam). Tāpēc dīķu satura ekskavācija ne tikai aptur to teritorijas piesārņošanu, bet arī sekmē pašattīrīšanās procesu dabā.



5. att. Ar *MT3D* sistēmu prognozētā VAV masas izmaiņa Ziemeļu un Dienvidu dīķa apkārtnē piesārņotajā areālā bez un ar VAV sabrukšanas ievērošanu (ja veikta pilnīga abu dīķu sanācija).



6. att. Ar *MT3D* sistēmu iegūtais VAV areāla koncentrāciju sadalījums D3gj2 horizontā Ziemeļu dīķim, neievērojot VAV sabrukšanu, ja veikta pilnīga dīķa sanācija.



7. att. Ar *MT3D* sistēmu iegūtais VAV areāla koncentrāciju sadalījums D3gj2 horizontā Ziemeļu dīķim, ievērojot VAV sabrukšanu, ja veikta pilnīga dīķa sanācija.

Gaujā iepļūdušās VAV masas grafiks 5. attēlā Ziemeļu dīķim liecina par to, ka laika gaitā palielinās VAV masas ieplūdes ātrums. Ja laiku no 24. gada līdz 84. gadam sadala trīs 20 gadu garos posmos, tad to laikā Gaujas upē ieplūst attiecīgi 660 kg, 2800 kg un 4000 kg VAV masas, ja nav VAV sabrukšanas. Šeit nosacīti pieņemts, ka pēc 24 gadiem (attiecībā pret 2015. gadu) Ziemeļu dīķa areāla fronte sasniedz upi.

VAV ietekes nevienmērību izsauc Ziemeļu dīķa VAV areāla raksturs, jo tā perifērijā, arī frontes daļā, VAV koncentrācija ir daudz mazāka nekā areāla kodolā. Šī apstākļa ietekme uz areāla kustību ir aplūkota nākamajā iedaļā.

#### V. AR SISTĒMU MT3D IEGŪTĀS PROGNOZES PAR ZIEMEĻU DĪĶA VAV AREĀLA KUSTĪBU

Rakstā analizēti tikai Ziemeļu dīķa VAV areāla kustības modelēšanas rezultāti, jo šis areāls Gauju sasniegs jau tuvā nākotnē. Modelēšanas dati par Dienvidu dīķa VAV areālu atrodami pārskatā [1].

Ar sistēmu *MT3D* aprēķinātie VAV areāla stāvokļi 2015., 2055. un 2095. gadā skatāmi 6. attēlā un 7. attēlā attiecīgi nelabvēlīgam un optimistiskam VAV uzvedības rakstura gadījumam (nav vai ir VAV sabrukšana). Šie attēli dod papildu skaidrojumu upē ieplūdušās VAV masas izmaiņai:

- laika gaitā VAV dispersijas ietekmē pieaug areāla laukums un VAV koncentrācija areāla perifērijā ir mazāka nekā areāla kodolā (salīdzinot 2015. un 2055. gada areālu 6. att.);
- ja notiek VAV sabrukšana, tad samazinās VAV koncentrācija tā areālā (salīdzinot 2055. gada areālu 6. att. un 7. att.).

Dispersijas dēļ areāla frontes daļā ir relatīvi neliela VAV koncentrācija un 2055. gadā VAV kodols nebūs sasniedzis Gauju (6. att.). Tāpēc pēc 40 gadiem tikai ~600 kg no 8000 kg VAV masas būs nokļuvuši Gaujā (5. att. līkne VAV masai upē). Optimistiskajā variantā (ir VAV sabrukšana) pēc 40 gadiem D3gj2 slānī būs palikuši ~2000 kg VAV, t. i., VAV masa sabrukšanas ietekmē samazinās vismaz divas reizes, bet Gaujā ieplūdušā VAV daudzums būs niecīgs. Pēc 80 gadiem (2095. g.) Gaujā būs nokļūvis VAV areāla kodols (6. att.), un, ja nav VAV sabrukšanas, tad D3gj2 slānī būs palikuši 540 kg VAV (5. att.). Ja notiek VAV sabrukšana, tad D3gj2 slānī praktiski nebūs VAV piesārņojuma.

Ja nenotiek VAV sabrukšana, tad pēc Ziemeļu dīķa satura ekskavācijas tā piesārņojums horizontālā D3gj2 būs izzudis pēc ~(100–120) gadiem.

#### VI. VAV KONCENTRĀCIJU HIDROGRĀFI VIRTUĀLAJOS MONITORINGA URBUMOS

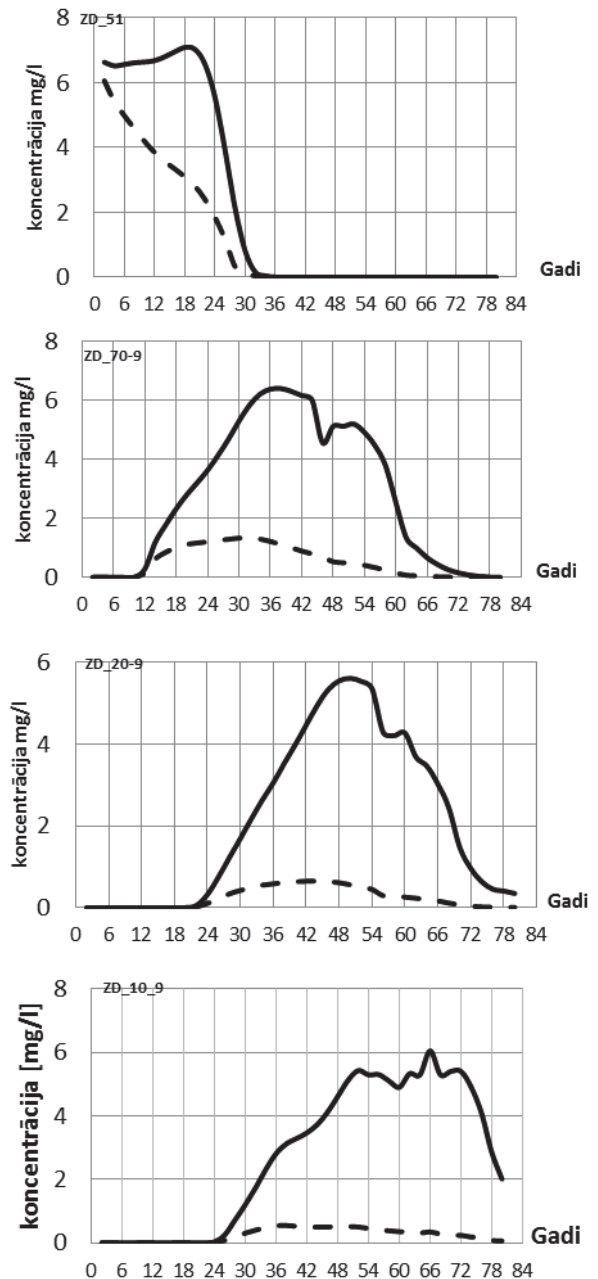
Sistēmā *MT3D* var izveidot virtuālus monitoringa urbumus VAV koncentrāciju izmaiņu novērošanai laikā un telpā. Ziemeļu dīķim tika izmantoti četri monitoringa urbumi D3gj23 apakšhorizontā (HM slānis Nr. 9). Šo urbumu novietojums skatāms 6. attēlā:

- urbums Nr. 51 ir reāli eksistējošs urbums D3gj23 slānī, un tas atradās VAV areālā 2015. gadā;
- urbums Nr. 70-9 atradīsies VAV areāla kodola rajonā pēc ~40 gadiem, taču to ātri sasniegs areāla frontes daļa;
- urbumu Nr. 20-9 pēc ~50 gadiem šķērsos areāla kodols;

- urbums Nr. 20-10 atrodas Gaujas krastā, un tajā tiks reģistrēta VAV koncentrācija upē ieplūstošajā pazemes ūdenī.

Urbumu novietojums izvēlēts tā, lai tie reģistrētu VAV koncentrāciju maksimumu VAV areāla kodolā.

VAV koncentrāciju hidrogrāfi virtuālajiem monitoringa urbumiem ir skatāmi 8. attēlā. Šeit doti hidrogrāfi abiem VAV uzvedības variantiem (nav vai ir VAV sabrukšana). Ja notiek VAV sabrukšana, tad notiek ne tikai VAV koncentrācijas samazināšanās, bet arī ātrāk parādās šīs koncentrācijas maksimums (raustītā līnija 8. att.).



8. att. VAV koncentrāciju hidrogrāfi monitoringa urbumos Nr. 51, Nr. 70-9, Nr. 20-9, Nr. 10-9 Ziemeļu dīķim, ievērojot vai neievērojot sabrukšanu, ja veikta pilnīga dīķa satura ekskavācija.

## VII. VAV KONCENTRĀCIJA GAUJĀ

Ziemeļu dīķa piesārņotais pazemes ūdens nokļūst Gaujā. VAV vidējo koncentrāciju  $c_{vav}$  upē laika posmam  $t$  var novērtēt ar attiecību:

$$c_{vav} = m_{vav} / V_{Gaujā}, \quad (2)$$

kur  $m_{vav}$  – upē iekļūdušā VAV masa laikā  $t$ , kg;  $V_{Gaujā}$  – Gaujas upes ūdens tilpums,  $m^3$ , kurš aiztecējis gar Inčukalnu laikā  $t$ . Masu  $m_{vav}$  dod 5. attēla grafiks upē iekļūdušajam VAV. Nosacīti par laika atskaites sākumu pieņemsim 24. gadu (skaitīt no 2015. gada). Ūdens tilpumu  $V_{Gaujā}$  laikā  $t$  dod izteiksme:

$$V_{Gaujā} = 365tV_{Gaujā}, \quad (3)$$

kur  $t$  ir laika posma garums gados;  $v_{Gaujā}$  ir upes caurtece,  $m^3/dnn$ . Novērtēsim  $c_{vav}$  trīs 20 gadu laika periodiem:  $t_1$  – no 24. līdz 44. gadam;  $t_2$  – no 44. līdz 64. gadam,  $t_3$  – no 64. līdz 84. gadam. Ja  $t = 20$  gadi,  $v_{Gaujā} = 8500\ 000\ m^3/dnn$  [9], [14], tad  $V_{Gaujā} = 62,1 \times 10^9\ m^3$ . Ja nav VAV sabrukšanas,  $c_{vav}$  aprēķina rezultāts ir skatāms III tabulā.

III TABULA

VAV KONCENTRĀCIJA GAUJĀ, JA NAV VAV SABRUKŠANAS

Periods*	$m_{vav}$ , kg	$V_{Gaujā}$ , $m^3$	$c_{vav}$ , ng/l
$t_1$	660	$62,1 \times 10^9$	11,1
$t_2$	2800	$62,1 \times 10^9$	46,6
$t_3$	4000	$62,1 \times 10^9$	66,6

\*  $t_1 = t_2 = t_3 = 20$  gadi

No šīs tabulas var secināt, ka laikā  $c_{vav}$  pieaug, taču tās vērtība ir tikai nanogrami uz litru. Ja upes mazūdens periodā  $v_{Gaujā} = 1400\ 000\ m^3/dnn$  [9], tad  $c_{vav}$  pieaug sešas reizes.

VAV ieplūde Gaujā ar Ziemeļu dīķa piesārņoto pazemes ūdeni praktiski neietekmē upes ūdens kvalitāti pat tajā gadījumā, ja nenotiek VAV sabrukšana.

Šāds rezultāts ir sekas apstāklim, ka pazemes ūdens daudzums un tā ietekes ātrums upē ir daudzkārt mazāks nekā vidējā Gaujas caurtece ( $\sim 100\ m^3/s$ ).

VAV areāla saskarsmes vietā ar upi ir iespējams lokāls kaitējums dzīvībai dabai, jo VAV sajaukšanās ar upes ūdeni nenotiek uzreiz.

## VIII. SANĀCIJAS PASĀKUMI ESKAVĒTO DĪĶU TERITORIJĀM

Dīķu satura ekskavācija nevar pilnīgi likvidēt gudrona paliekas to pamatnēs, īpaši Ziemeļu dīķim, kurā ir jānorok vispiesārņotākā smilšu un gudrona maisījuma daļa. Arī Dienvidu dīķī var palikt ar gudronu piesārņotas smiltis. Šo iemeslu dēļ dīķu areālos ir jāiesteno tādi sanācijas pasākumi, kuri pēc iespējas labāk novērstu gudrona atlieku izšķīdināšanu ar pazemes ūdens plūsmām kvartāra smilšu slānī. Ir divi atšķirīgi pazemes ūdens plūsmu tipi:

- atmosfēras nokrišņu radītā vertikālā infiltrācijas plūsma aerācijas zonā;
- horizontālā plūsma smilšu slānī.

Lai samazinātu vertikālās plūsmas ietekmi, abu dīķu areāli ir jāpārklāj ar ūdensnecaurlaidīgu pretinfiltrācijas pārsegumu. Šis pārsegums praktiski novērš gudrona atlieku izšķīdināšanu

Dienvidu dīķī, jo tas atrodas aerācijas zonā, kurā nav horizontālās pazemes plūsmas [1]. Ziemeļu dīķa gudrona atliekas šķērso horizontālā plūsma, un tāpēc pretinfiltrācijas pārklājums tikai  $\sim 3,5$  reizes samazinās gudrona izšķīdināšanas intensitāti [1]. Var vājināt horizontālās plūsmas ietekmi ar sprostsienas ierīkošanu.

Ziemeļu dīķim vēlams veikt pazemes ūdens attīrīšanu.

## IX. SECINĀJUMI

Inčukalna gudrona dīķu izraisītais piesārņojums pazemes ūdens plūsmā virzās uz Gauju. Šis process notiek jau 60 gadus, un abu dīķu piesārņojuma areālu kustību ar mūsdienu tehnoloģijām nevar apturēt.

Īpaši lielu kaitējumu videi rada toksiskās virsmas aktīvās vielas (VAV). Firmas *INTERGEO* uzdevumā RTU VMC speciālisti veica VAV masas transporta modelēšanu pazemes ūdens plūsmā. Iegūti rezultāti, kurus var izmantot Inčukalna piesārņotās ģeoloģiskās un hidroģeoloģiskās vides atveseļošanas darbos:

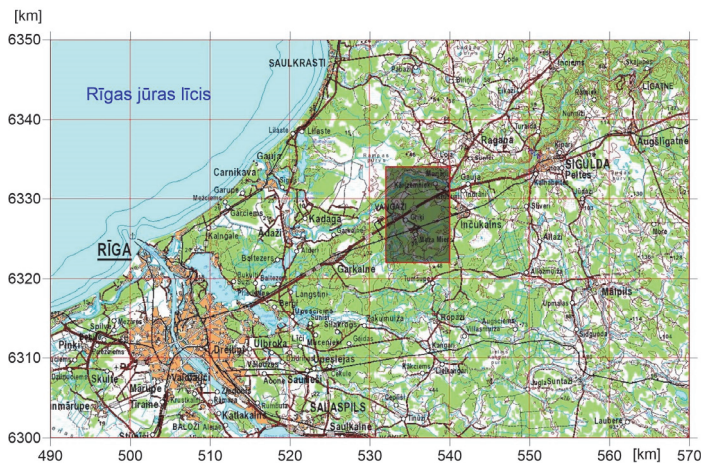
- jāpabeidz abu gudrona dīķu satura ekskavācija, jo tad tiks apturēta pazemes ūdens piesārņošana un samazināsies laiks, kurā var notikt pazemes ūdeņu un ģeoloģiskās vides pašattīrīšanās;
- vides pašattīrīšanās notiek VAV sabrukšanas dēļ un arī tāpēc, ka piesārņotais pazemes ūdens nonāks Gaujas upē;
- novērtēta VAV masa 2015. gadā abu dīķu piesārņojuma areāliem – attiecīgi 8000 kg un 30 500 kg Ziemeļu un Dienvidu dīķim.
- aprēķināts, ka VAV areāli sasniegs Gauju (skaitot no 2015. gada) pēc 20–25 un 75–80 gadiem attiecīgi Ziemeļu un Dienvidu dīķim;
- veikta abu dīķu VAV areālu kustības modelēšana nākošajiem 80 gadiem (sākot no 2015. g.); konstatēts, ka, ja nav VAV s sabrukšanas, tad Ziemeļu dīķa areāla VAV masas ieplūde Gaujā notiek šādi: 660 kg laika posmā no 2039. līdz 2059. g.; 2400 kg – no 2059. līdz 2079. g.; 4000 kg – no 2079. līdz 2099. g.; pēc 2099. gada VAV areāla masa būs 540 kg; VAV ieplūde ir nevienmērīga, tāpēc ka VAV koncentrācija areāla perifērijā (arī frontes daļā) ir mazāka par VAV koncentrāciju areāla kodolā;
- ja VAV pussabrukšanas laiks ir 15 gadi, tad pēc 80 gadiem abu dīķu VAV areāli ir pārstājuši eksistēt; t. i., ir notikusi ģeoloģiskās vides pašattīrīšanās;
- aprēķināta VAV koncentrācija Gaujā, kuru varētu izsaukt Ziemeļu dīķa areāla ieplūde (ja nav VAV sabrukšanas): 11 ng/l laika posmā no 2039. līdz 2059. g.; 47 ng/l – no 2059. līdz 2079. g.; 67 ng/l – no 2079. līdz 2099. g., t. i., Ziemeļu dīķa VAV areāla masas ieplūde upē neietekmē upes ūdens kvalitāti. Tikai VAV areāla ietekes apkārtnē iespējams kaitējums dabai, jo VAV ar upes ūdeni nesajaucas uzreiz.
- lai samazinātu gudrona atlieku radīto piesārņojumu, pēc abu dīķu satura ekskavācijas tie jāpārklāj ar pretinfiltrācijas segumu; Dienvidu dīķa gudrona atlikums atrodas aerācijas zonā, un tāpēc pārklājums praktiski aptur gudrona nonākšanu pazemes ūdenī; Ziemeļu dīķim pārklājums samazina gudrona šķīšanu  $\sim 3,5$  reizes, jo gudrona atlikumu apskalo horizontālā pazemes ūdens plūsma, kuras ietekmes samazināšanai var izmantot sprotsienu; vēlams veikt ar VAV piesārņotā pazemes ūdens attīrīšanu.

Var secināt, ka modelēšanas rezultāti bagātina zināšanas par Inčukalna gudrona dīķu problēmas optimālām risināšanas iespējām. Būtisks ir atzinums, ka aptuveni 80–100 gadu laikā var notikt pazemes ūdens un ģeoloģiskās vides pašattīršanās. Piesārņojums, kas nokļūs Gaujā nevar ietekmēt tās ūdens kvalitāti, jo upes caurteces ietekme ir daudzkārt lielāka nekā upē ielplūdušajam piesārņojumam.

Inčukalna HM Gaujas pazemes pieteces kalibrēšanai ir izmantoti Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa LAMO4 dati. LAMO4 veidots ar Latvijas valsts pētījumu programmas EVIDEnT atbalstu.

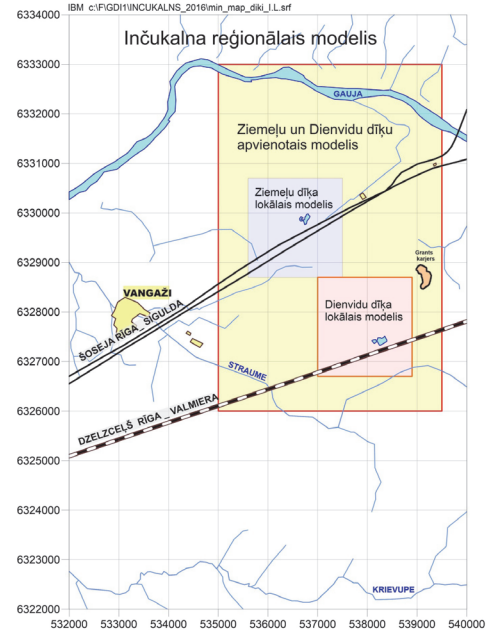
#### PIELIKUMS. INČUKALNA TERITORIJAS HIDROĢEOLOĢISKAIS MODELIS

Inčukalna HM novietojums skatāms 1p. attēlā. Modeļa pirmā versija (1998. g.) izmantoja VMC speciālistu izveidoto Latvijas reģionālā HM REMO vidi [10]. Modeļa 2. versija izveidota 2005. gadā [7]. Trešā 2016. gada HM versija kā bāzi izmantoja 2005. gada modeli. Visas trīs HM versijas imitē ilgādīgos vidējos hidroģeoloģiskos apstākļus Inčukalna apkārtnē. 2016. gada HM darbojas licenzētas programmatūras GV vidē [2].



1p. att. Inčukalna modeļa novietojums.

Inčukalna HM ietver 8000 m × 12 000 m laukumu. HM bāzes karte ar lokālajiem HM skatāma 2p. attēlā. Modeļu 1998. un 2005. gada versijām režģa plaknes solis bija 100 metri, bet Ziemeļu un Dienvidu dīķu lokālajiem HM plaknes solis bija 20 metri. 2012. gadā Ziemeļu dīķa lokālajam HM lietoja soli 10 metri [13]. VAV kustības modelēšanai 2016. gadā bija paredzēts izmantot apvienoto Ziemeļu un Dienvidu dīķu modeli, kura solis 10 metri un izmērs 4500 m × 7000 m. Šim apgabalam modelī izmantoti pārskata [11], [12] dati, kuri iegūti no pētniecības urbumiem. Tāpēc šai HM daļai ir augsta ģeoloģiskās informācijas ticamība. Darba gaitā tika konstatēts, ka datora veiktspēja nodrošina modelēšanu visā HM apgabalā ar režģa soli 10 metri. Tāpēc samazinātā izmēra apvienotais HM netika izmantots.



2p. att. Inčukalna modeļa bāzes karte un lokālie hidroģeoloģiskie modeļi.

HM vertikālā shematizācija ir vienota 2005. un 2016. gada modeļa versijām un tā skatāma 1p. tabulā.

1P.TABULA  
INČUKALNA MODEĻA VERTIKĀLĀ SHEMATIZĀCIJA

Slāņa tips	Slāņa nosaukums	Ģeoloģiskais kods modelī	Modeļa sekcijas numurs un tips
	Reljefs	<i>relh</i>	1. (robežnoteikums)
	Kvartārs	<i>aer</i>	2. (z)
		<i>Q1</i>	3. (xy)
		<i>Q2</i>	4. (xy)
		<i>Q3</i>	5. (xy)
		<i>gQ</i>	6. (z)
	Otrā Gauja	<i>D<sub>3gj21</sub></i>	7. (xy)
		<i>D<sub>3gj22</sub></i>	8. (xy)
		<i>D<sub>3gj23</sub></i>	9. (xy)
	Pirmā Gauja	<i>D<sub>3gj1z</sub></i>	10. (z)
		<i>D<sub>3gj1</sub></i>	11. (robežnoteikums)
	sprostslānis		

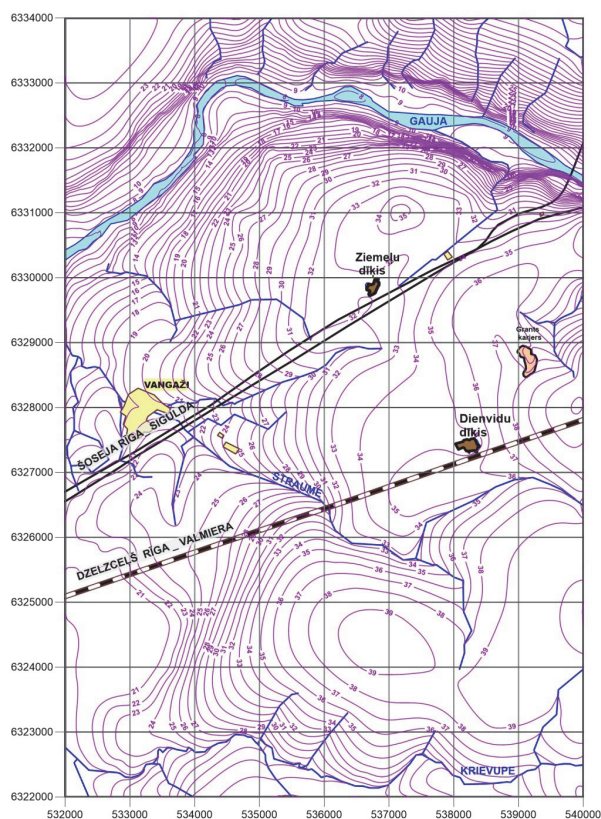
Modeļi veido 11 slāņi. Pirmais un vienpadsmitais slānis tiek lietots pirmā veida robežnoteikumu (uzdoti ūdens līmeņi) fiksēšanai. Pirmajā slānī *relh* tiek uzdots zemes reljefa karte, bet vienpadsmitajā – Gaujas horizonta *D<sub>3gj1</sub>* pjezometrisko līmeņu sadalījums. Kvartāra nogulumu slānis ir sadalīts piecos apakšslāņos: *aer*, *Q1*, *Q2*, *Q3*, *gQ*, bet Gaujas *D<sub>3gj</sub>* nogulumu tiek modelēti ar četriem slāņiem: *D<sub>3gj21</sub>*, *D<sub>3gj22</sub>*, *D<sub>3gj23</sub>*, *D<sub>3gj1z</sub>*. Slāņi *aer*, *gQ* un *D<sub>3gj1z</sub>* ir sprostslāņi. Slānis *aer* ir aerācijas zonas ekvivalents un tiek izmantots infiltrācijas plūsmas vadīšanai. Ģeoloģiskais griezumam *S–N*, kurš šķērso abus dīķus, ir skatāms 3. attēlā.

Slānis *Q1* eksistē tikai dīķu apkārtnē (biezums 1,5 m) un nodrošina precīzāku gudrona dīķu (īpaši Ziemeļu) ietekmes modelēšanu. Slāņu *Q1* un *Q2* biežumi ir vienādi.

Smilšu slāņa Q sadalījums trīs apakšslāņos nodrošina precīzāku datu iegūšanu par tiem sanācības pasākumiem, kuri būs jāveic dīķiem pēc to satura ekskavācijas.

Arī smilšakmens ūdens horizonts D3gj2 ir sadalīts trīs apakšhorizontos, lai varētu ievērot piesārņojumu kustības telpisko raksturu un to nevienmērīgo koncentrāciju sadalījumu slānī. Apakšējais slānis D3gj23 2016. gada modelī tiek izmantots VAV koncentrācijas uzdošanai, jo 2015. gadā noskaidrots, ka VAV šeit ir maksimālā koncentrācija, slāņa D3gj23 biezums ir 10 metri. Slāņiem D3gj21 un D3gj22 ir vienādi biezumi, un šajos slāņos VAV koncentrācija ir niecīga.

Par pazemes ūdens plūsmu ātrumu un virzienu ūdens horizontos var spriest pēc to pazemes ūdens līmeņu kartēm. Inčukalna gadījumā pazemes ūdens piesārņošana notiek kvartāra smilšu slānī Q un smilšakmens slānī D3gj2. Šo slāņu ūdenslīmeņu izolīniju kartes ir skatāmas 3p. attēlā un 4p. attēlā.

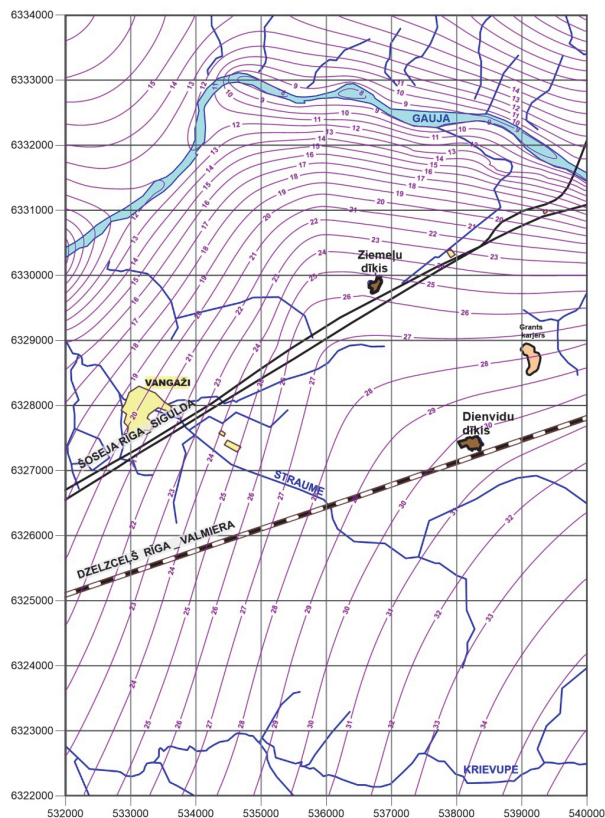


3p. Kvartāra horizonta Q ūdens līmeņu izolīniju karte, m v.j.l.

Šīs kartes parāda, ka pazemes ūdens plūsmu raksturs Q un D3gj2 slāņos ir atšķirīgs, un tāpēc piesārņojuma kustības procesi šajos slāņos ir dažādi:

- Q slānī abu dīķu apkārtnē ir niecīgs pazemes ūdens plūsmas gradients, tāpēc šeit piesārņojums pārvietojas lēni, tā kustības virziens nesakrīt ar kustības virzienu D3gj2 slānī;
- D3gj2 slānī piesārņojums no abiem dīķiem virzās uz Gauju. Piesārņojums šajā slānī nonāk no Q slāņa, kur atrodas gudrona dīķi;

- hidroģeoloģiskie apstākļi Ziemeļu un Dienvidu dīķī ir atšķirīgi: Ziemeļu dīķis atrodas Q1 slānī, tāpēc tā saturu izšķīdina horizontālā plūsmā slānī un nokrišņu (infiltrācijas) plūsmā; Dienvidu dīķis atrodas aer zonā, un te gudronu izšķīdina nokrišņu plūsmā.



4p. att. Gaujas horizonta D3gj2 ūdens līmeņu izolīniju karte, m v.j.l.

HM vidē darbojas GV modeļi MODPATH un MT3D, kuri tika izmantoti VAV kustības prognozēšanai pazemes ūdens plūsmā. MODPATH izmanto ūdens plūsmas kustības pētīšanai ar virtuālo ūdens daļiņu trasēšanas metodi (2. att.). Modelis MT3D nodrošina vielu masas pārneses modelēšanu (VAV masas un koncentrācijas izmaiņa laikā un telpā). Parasti vispirms darbinā MODPATH, lai iegūtu datus MT3D vadības parametru pareizai izvēlei.

Detalizētāku informāciju par Inčukalna HM var atrast pārskatā [1].

#### LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] A. Spalviņš, Ziemeļu un Dienvidu sērskābā gudrona dīķu pazemes ūdenus piesārņojošo vielu masas transporta matemātiskā modelēšana, Pārskats pakalpojumu līgumam ar personu apvienību "INTERGEO", Rīga, marts, 2016, 31, lpp. teksta, 79 att., 8 pielikumi. (in Latvian)
- [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," ch. 16, book 6, US Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, USGS, Reston, VA.
- [4] D. W. Pollok, "User's Guide for MODPATH/MODPATH-Plot, Version3. A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the US Geological Survey finite-difference groundwater flow model, U.S. Geological survey," September 1994.



- [5] C. Zheng, "MT3D99 A modular three dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems," USEPA report, USEPA, Washington, DC, 1999.
- [6] Golden Software, Inc., "SURFER-12 for Windows, Users manual, Guide to Using," 2015.
- [7] A. Spalviņš, Piesārņoto vietu – Inčukalna gudrona dīķi un Olaines šķidro toksisko atkritumu izgāztuve, sanācijas projekta sagatavošana, Atskaite līgumam Nr. VP461/195 starp Valsts SIA "Vides projekti" un Rīgas Tehnisko universitāti, Rīga, Aprīlis, 2005, 39 lpp. (in Latvian)
- [8] I. Semjonovs, *Piesārņošanās un pašattīrīšanās procesi pazemes ūdeņos, Latvija*, Rīga, Zinātne, 1995, 121. lpp. (in Latvian)
- [9] Hidrogeoloģija SSSR., tom HHHI, Latvijaska SSR., I čast., Moskva: Nedra, 1967, p. 200.
- [10] A. Spalviņš, Rīgas Tehniskās universitātes atskaite par līgumdarbu Nr. 116/3k izpildi. Piesārņojošo vielu bilances un transporta matemātisko modeļu izveide Inčukalna sērskābā gudrona atkritumu dīķu teritorijām., Rīga, 1998.g. (in Latvian)
- [11] Inčukalna Ziemeļu izgāztuves hidrauliskais modelis. Baltec Associates, INC. atskaite, Rīga, 1995, 52 lpp.(in Latvian)
- [12] Piemēroto vietu izvēle gudrona atkritumu iekapsulēšanai., SIA GEO CONSULTANTS atskaite par inženierģeoloģiskajiem pētījumiem Inčukalna apkaimē 1997.–1998. gados, Rīga, 1998. gada septembris, 34 lpp. ar tekstu un grafiskiem pielikumiem. (in Latvian)
- [13] A. Spalviņš, Ziemeļu sērskābā gudrona dīķa pazemes ūdeņus piesārņojošo vielu masas transporta matemātiskā modeļa izveide un priekšlikumu sagatavošana optimālas pazemes ūdeņu sanācijas sistēmas izveidei, atskaite līgumam starp SIA "Eiropprojekts" un RTU, 2012. gada, jūnijs, Rīga, 37 lpp. teksta un pielikumi. (in Latvian)
- [14] A. Spalviņš, Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa LAMO pilnveidošanas starprezultāti, Pārskats līgumam 2014/15 starp LVGMC un RTU, Rīga, 2015. g. novembris, vad. A. Spalviņš, teksts 30 lpp, pielikumi 53 lpp. (in Latvian) [Online]. Available:  
[http://www.emc.rtu.lv/VPP/ATSK\\_LVGMC\\_2015\\_teksts.pdf](http://www.emc.rtu.lv/VPP/ATSK_LVGMC_2015_teksts.pdf)  
[http://www.emc.rtu.lv/VPP/ATSK\\_LVGMC\\_2015\\_pielikumi.pdf](http://www.emc.rtu.lv/VPP/ATSK_LVGMC_2015_pielikumi.pdf)

**Aivars Spalviņš** is 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

**Inta Lāce** is a Researcher with the Environment Modelling Centre, Faculty of Computer Science and Information Technology, RTU.  
E-mail: intalace@yahoo.com

**Kaspars Krauklis** is a Researcher with the Environment Modelling Centre of Riga Technical University.  
E-mail: kasparskrauklis@gmail.com

**Tatjana Sorokina** is a Hydrogeologist of the INTERGEO BALTIC Ltd., Latvia.  
E-mail: tatiana.sorokina@intergeo.com

**Henning Wallner** is the Chairman of INTERGEO Environmental Technology, Austria.  
E-mail: henning.wallner@intergeo.com

### Modelling of Contaminant Mass Transport in Groundwater Flow Polluted by Sulphuric Goudron Pools of Incukalns

Aivars Spalviņš<sup>1</sup>, Inta Lāce<sup>2</sup>, Kaspars Krauklis<sup>3</sup>, Tatjana Sorokina<sup>4</sup>, Henning Wallner<sup>5</sup>

<sup>1-3</sup> Riga Technical University, Latvia, <sup>4,5</sup> Intergeo Baltic Ltd.

At the Incukalns district, two abandoned gravel pits from 1955 to 1970 were used as dump sites for storing liquid sulphuric goudron (mixture of sulphuric acid and oil products). The dump sites were named the Northern and Southern pools. The Northern pool was filled with sand. Presently, the Southern pool contains goudron in the state of liquid, paste and stone. During sixty years, the pools are polluting groundwater that moves towards the Gauja river. Excavation of the goudron body of the Southern pool continues. The contaminated sand of the Northern pool will be taken away. In order to optimize the ongoing process of environmental recovery of the place, the researchers of Riga Technical University carried out computer based modelling of mass transport of contaminants (especially surface active substances (SAS)) by the groundwater flow. The research was done to the request from the company INTERGEO. It was found out that the SAS plumes of the Northern and Southern pools will reach the river, after 25 and 80 years (from 2015), accordingly. The SAS mass of the plumes was evaluated, respectively, 8000kg and 30000kg, for the Northern and Southern pool in 2015. The rate of the SAS inflow from the Northern pool plume into the Gauja river was estimated for 2039-2099 if no SAS destruction takes place: 660 kg – in 2039-2054; 2800 kg – in 2059-2079; 4000 kg – in 2079-2099. After 2119, the mass of zone SAS plume will be 540 kg. The unevenness of the SAS inflow rate is due to the smaller SAS concentration for the exterior part of the plume than for its central part. This fact was also confirmed by the hydrographs for the SAS concentration of the virtual monitoring wells. It was found that the SAS inflow into the Gauja river will have no real influence (even without SAS destruction) on the quality of river water, because its flow is much more stronger than that of the contaminated groundwater flow from the Northern pool.

**Keywords** – hydrogeological model, modelling of contaminant mass transport, surface active substance.