



**Rīgas Tehniskā universitāte**

**VIDES MODELĒŠANAS CENTRS**

**Pārskats**  
**Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa**  
**LAMO pilnveidošanas starprezultāti**

*Līgumi Nr. L8209(2015/63) un Nr. 2014/15*  
*starp Valsts SIA LVGMC un RTU*

**Rīga - Novembris, 2015**

## **Pārskats „Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa LAMO pilnveidošanas starprezultāti”**

Pārskatā apkopoti materiāli par pilnveidoto Latvijas hidroģeoloģisko modeli (LAMO4 versija), kuru Rīgas Tehniskā universitāte (RTU) nodod aprobēšanai Latvijas Vides, Ģeoloģijas un Meteoroloģijas Centram (LVĢMC) atbilstoši RTU-LVĢMC sadarbības līgumam Nr2014/15 un līgumam Nr.2015/63 ( L8209 RTU Nr.).

LAMO pilnveidošanu RTU īsteno Valsts Pētījumu Programmas (VPP EVIDEnT) projektā Y8087 „Pilnveidot laba ūdens stāvokļa un tā ilgtspējīgai izmantošanai Latvijas hidroģeoloģisko modeli ar datiem un funkcijām, kas apraksta pazemes ūdeņu mijiedarbību ar hidroģeoloģisko tīklu (upes, ezeri)”.

Pārskatā ietverti 2015. gada galvenie pētījumu rezultāti.

Pārskatu veido 30 lpp. teksta, kas ietver 9 tabulas un 15 attēlus, un 8 pielikumi, kuri sastāv no 13 tabulām un 47 attēliem (tai skaitā 13 ūdens līmeņu sadalījuma un 14 infiltrācijas plūsmu kartes).

**Zinātniskais. vadītājs Dr.sc.ing. A. Spalviņš**

VPP projekta īstenošanā piedalījās RTU darbinieki J. Šlangens, O. Aleksāns, K. Krauklis, I. Lāce, V. Škibelis, A. Mačāns, I. Tabaka, I. Eglīte

*Adrese:*

Rīgas Tehniskā universitāte, Vides modelēšanas centrs  
Daugavgrīvas 2, Rīga, LV-1007, Latvija  
Tāl.: +371 708511, +371 67089518; Fax: +371 67089531  
E-mail: [emc@cs.rtu.lv](mailto:emc@cs.rtu.lv)  
URL: <http://www.emc.rtu.lv>

RTU, VMC direktors  
A.Spalviņš

## SATURS

1. Priekšvārds .....	6
2. LAMO pilnveidošanas gaita un mērķi .....	7
3. Matemātiskais formulējums .....	12
4. Pāreja no LAMO3 uz LAMO4 .....	15
5. Filtrācijas karšu pilnveidošana LAMO4 ūdens horizontiem .....	17
5.1. Datu pārbaude un atlase .....	18
5.2. Datu korekcija k-kartēm .....	19
6. LAMO4 kā instruments dabas procesu pētīšanai .....	21
7. Piezīmes par E. pielikumu (filtrācijas koeficientu karšu iegūšanas piemērs D3pl horizontam) .....	27
8. Piezīmes par G. un H. pielikumiem (upju un ezeru saraksti).....	27
9. LAMO4 pilnveidošana un izmantošana .....	27
10. Secinājumi .....	28
11. Izmantotā literatūra .....	28

### Pielikumi

#### A. pielikums

##### Upju pazemes pieteces plūsmu novērtējums

1. Vispārīgās hidroloģiskās likumsakarības
2. Upju pazemes pieteces novērtējums primārajiem upju sateces apgabaliem
  - 1a. att. Primārie upju sateces apgabali
  - 2a. att. Monitorētie sateces apgabali
  - 3a. att. Latvijas upju sateces apakšapgabali
  - 4a. att. Latvijas upju lielbaseini
  - 5a. att. Upju drenāžas moduļu kartes projekcija uz primāro sateces apgabalu karti
- 1a. tabula. Upju pazemes pieteces novērtējumi primārajiem apgabaliem
- 2a. tabula. Upju apakšapgabalu pazemes pieteces plūsmu novērtējums
- 3a. tabula. Pazemes pieteces novērtējums Gaujas, Daugavas, Lielupes un Ventas upēm

#### B. pielikums

##### Pazemes ūdens plūsmu bilances tabulas

- 1b. tabula. LAMO4 pazemes ūdens plūsmu [tūkst.m<sup>3</sup>/dienn] bilance lielbaseiniem, kvartāra un pamatiežu sistēmai
- 2b. tabula. LAMO4 pazemes ūdens relatīvās lokālās plūsmas B [%] un to aktivitāte N [reizes] lielbaseiniem, kvartāra un pamatiežu sistēmai
- 3b. tabula. LAMO2 pazemes ūdens relatīvās lokālās plūsmas B [%] un to aktivitāte N [reizes] lielbaseiniem, kvartāra un pamatiežu sistēmai
- 4b. tabula. LAMO4 lokālās pieteces plūsmas  $q_{\text{toprezl}}$  [tūkst.m<sup>3</sup>/dienn] aprēķins
- 5b. tabula. LAMO4 lokālās pieteces plūsmas  $q_{\text{toprezl}}$  un to veidojošo plūsmu relatīvās vērtības B [%] un to aktivitāte N [reizes]
- 6b. tabula. LAMO4 pazemes ūdens plūsmu [tūkst.m<sup>3</sup>/dienn] lokālā bilance Latvijas ūdens horizontiem
- 7b. tabula. LAMO4 pazemes ūdens plūsmu [tūkst.m<sup>3</sup>/dienn] lokālā bilance Gaujas upju lielbaseina ūdens horizontiem

- 8b. tabula. LAMO4 pazemes ūdens plūsmu [tūkst.m<sup>3</sup>/dienn] lokālā bilance Daugavas upju lielbaseina ūdens horizontiem
- 9b. tabula. LAMO4 pazemes ūdens plūsmu [tūkst.m<sup>3</sup>/dienn] lokālā bilance Lielupes upju lielbaseina ūdens horizontiem
- 10b. tabula. LAMO4 pazemes ūdens plūsmu [tūkst.m<sup>3</sup>/dienn] lokālā bilance Ventas upju lielbaseina ūdens horizontiem

## C. pielikums

### Ūdens līmeņu sadalījumi

- 1c. att. Digitālais reljefs relh [m vjl]
- 2c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā Q2 [m vjl]
- 3c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā preQ [m vjl]
- 4c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D3ktl# [m vjl]
- 5c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D3zg# [m vjl]
- 6c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D3krs# [m vjl]
- 7c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D3dg# [m vjl]
- 8c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D3pl [m vjl]
- 9c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D3am [m vjl]
- 10c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D3gj2 [m vjl]
- 11c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D3gj1 [m vjl]
- 12c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D2brt [m vjl]
- 13c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D2ar [m vjl]
- 14c. att. Ūdens līmeņu sadalījums horizontā D2prn [m vjl]

## D. pielikums

### Infiltrācijas plūsmu sadalījumi

- 1d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā Q2 [mm/gadā]
- 2d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā preQ [mm/gadā]
- 3d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D3ktl [mm/gadā]
- 4d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D3zg# [mm/gadā]
- 5d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D3krs# [mm/gadā]
- 6d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D3dg# [mm/gadā]
- 7d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D3pl [mm/gadā]
- 8d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D3am [mm/gadā]
- 9d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D3gj2 [mm/gadā]
- 10d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D3gj1 [mm/gadā]
- 11d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D2brt [mm/gadā]
- 12d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D2ar [mm/gadā]
- 13d. att. Infiltrācijas plūsmu sadalījums horizontā D2prn [mm/gadā]

## E. pielikums

### Filtrācijas koeficientu karšu iegūšanas piemērs D3pl horizontam

- 1e. att. Limitēto urbumu, kuros uzdots īpatnējais debīts, izvietojums D3pl horizontā (1295 urb.)
- 2e. att. Urbumu, kuros uzdots īpatnējais debīts, izvietojums D3pl horizontā pēc atlasē (374 urb.)
- 3e. att. Īpatnējā debīta sadalījums D3pl horizontā (veikta interpolācija un filtrēšana)
- 4e. att. Īpatnējā debīta sadalījums D3pl horizontā pēc korekcijas
- 5e. att. Korekcijas vērtību sadalījums D3pl horizontam (zilajā laukumā korekcija nenotiek)
- 6e. att. Filtrācijas koeficientu sadalījums D3pl horizonta  $m > 0$  daļai
- 7e. att.  $T$  sadalījums D3pl horizontā

**Iecavas upes (traseru) daļiņu apstrādes rezultāti**

- 1f. att. Traseru līniju (2027) projekcijas uz xy un xz plaknēm (GV grafika)
- 2f. att. Traseru līnijas (259) 1. grupai (0 līdz 25 gadi)
- 3f. att. Traseru līnijas (295) 2. grupai (0 > 25→100 gadi)
- 4f. att. Traseru līnijas (198) 3. grupai (0 > 100→400 gadi)
- 5f. att. Traseru līnijas (68) 4. grupai (0 > 400→1600 gadi)
- 6f. att. Traseru līnijas (84) 5. grupai (0 > 1600→6400 gadi)
- 7f. att. Traseru līnijas (86) 6. grupai (0 > 6400→12800 gadi)
- 8f. att. Traseru līnijas (37) 7. grupai (0 > 12800 →35530 gadi)

**LAMO4 upju saraksts**

**LAMO4 ezeru saraksts**

## 1. Priekšvārds

Pārskatā apkopoti materiāli par pilnveidoto Latvijas hidroģeoloģisko modeli (LAMO4 versija), kuru Rīgas Tehniskā universitāte (RTU) nodod aprobēšanai Latvijas Vides, Ģeoloģijas un Meteoroloģijas Centram (LVĢMC) atbilstoši RTU-LVĢMC sadarbības līgumam Nr.2014/15 un līgumam 2015/63 (L8209).

LAMO pilnveidošanu RTU īsteno Valsts Pētījumu Programmas EVIDEnT projektā Y8087 „Pilnveidot laba ūdens stāvokļa un tā ilgtspējīgai izmantošanai Latvijas hidroģeoloģisko modeli ar datiem un funkcijām, kas apraksta pazemes ūdeņu mijiedarbību ar hidroģeoloģisko tīklu (upes, ezeri)”.

Pārskatā izmantota nosacīta četru LAMO versiju klasifikācija (skat. 1. tabulu), kuru nosaka modeļa versijas rašanās laiks un īstenotie modernizācijas pasākumi.

1. tabula

Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa versijas

Versija	Gads	Aproksimācijas režģis			Modeļa upes			Ezeri
		Plaknes solis [metrs]	Režģa plakņu skaits	Režģa šūnu skaits	Skaits	Ieleju iegrauzumi	Izmantoti caurteces dati	Skaits
LAMO1	2012	500	25	$14.25 \times 10^6$	199	nav	nē	67
LAMO2	2013	500	27	$15.43 \times 10^6$	199	ir	nē	67
LAMO3	2014	500	27	$15.43 \times 10^6$	469	ir	nē	127
LAMO4	2015	250	27	$61.56 \times 10^6$	469	ir	jā	127

Versija LAMO1 izveidota 2010.-2012. gados un ir modeļa bāze. Jau 2013. gada sākumā LAMO1 rezultāti izmantoti pārskata [1] sagatavošanai Gaujas-Koivas upju baseina apgabaliem. Versija LAMO2 radīta 2012.-2013. gados un tās rezultāti veido pārskatus par Latvijas upju baseinu ūdensobjektu kartēšanu [2, 3, 4, 5]. LAMO2 apvienotais D2ar# slānis tika sadalīts divos slāņos D2brt un D2ar; tika realizēti upju ieleju iegrauzumi pamatiežos. Laikā no 2013.-2014. gadam izveidota LAMO3 versija [6]. Palielināts hidrogrāfiskā tīkla blīvums un pilnveidotas pamatiežu ūdens horizontu filtrācijas koeficientu kartes.

RTU Vides modelēšanas centra (VMC) speciālisti 2015. gadā īstenoja divus būtiskus LAMO3 uzlabojumus, kuri pārveidoja LAMO3 versijā LAMO4:

- četrkāršots LAMO plaknes režģa blīvums, kas panākts, samazinot šī režģa plaknes aproksimācijas soli no 500 metriem uz 250 metriem;
- upju pazemes pieteces plūsmas modelī īstenotas ņemot vērā upju caurplūdes mērījumus.

Tika turpināti pētījumi modeļa pamatiežu ūdens horizontu filtrācijas digitālo karšu pilnveidošanai. Īstenots skaitlisks eksperiments, kurā LAMO4 izmantots kā instruments dabas procesu pētīšanai.

Pārskatā ietverti dati par galvenajiem LAMO4 rezultātiem kā arī apskatīts pasākumu kopums, kas bija nepieciešams LAMO4 radīšanai.

Pārskata faktoloģiskais materiāls ietverts astoņos pielikumos.

## 2. LAMO pilnveidošanas gaita un mērķi

Eiropas Savienības (ES) valstīs tiek veidoti hidroģeoloģiskie modeļi (HM), kuru rezultāti tiek lietoti ūdens resursu izmantošanas plānošanai, īstenojot ES Ūdens Struktūrdirektīvas 2000 [7] mērķus. Latvijā šādu plānošanu veic LVĢMC. Pazemes ūdensobjektiem plānošanai nepieciešamo informāciju var nodrošināt, izmantojot ar HM iegūtos datus par šiem objektiem un to mijiedarbību ar virszemes ūdens objektiem (upes, ezeri, atmosfēras nokrišņi).

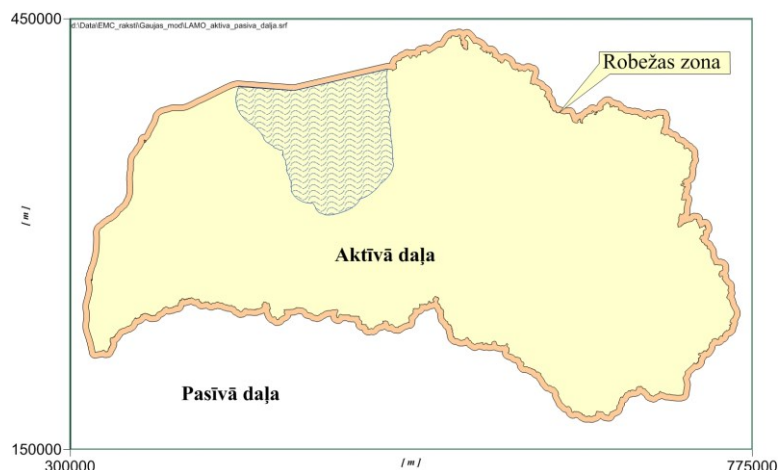
LAMO1 izveidošanas mērķis ES līdzfinansētā ERAF projektā (2010.-2012 gadam) bija radīt HM, kura rezultātus varētu izmantot LVĢMC, lai Latvijā īstenotu Struktūrdirektīvu [7] (ūdens resursu uzskaitē, aizsardzība, to stāvokļa uzlabošana utt.). LAMO1 izveidošanas koncepcija ir izklāstīta rakstā [8]:

- modelis apraksta vidējos ilggadīgos Latvijas hidroģeoloģiskos apstākļus;
- modelis aptver Latvijas sauszemes teritoriju un Rīgas jūras līci (skat 1. att.); LAMO sastāv no aktīvās un pasīvās daļas (2. att.); aktīvo daļu apjož 4 km plata robežjosla, kuru izmanto robežnoteikumu realizācijai; ja nepieciešams, var aktivizēt modeļi robežteritorijās ar kaimiņu valstīm starpvalstu projektu īstenošanai;
- modelis apraksta Latvijas aktīvo pazemes ūdeņu zonu līdz D2prn horizontam (skat. 3. att.);
- modeļi veido izmantojot LVĢMC apkopotos datus;
- modeļi ir jāiekļauj Latvijas hidrogrāfiskais tīkls (upes, ezeri, jūra) un jārealizē tā saites ar pazemes ūdensobjektiem;
- modeļa plaknes aproksimācijas solis ir 500 metri;
- modelis darbojas licenzētas programmas Groundwater Vistas (GV) [9] vidē, kurā ietvertas pasaulē plaši lietotas programmas MODFLOW [10], MODPATH [11], MT3D [12], kuras tiek regulāri modernizētas.

LAMO izmantoti Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūras dati par sauszemes reljefu, upēm un ezeriem. Minētā informācija ir integrēta LAMO digitālā reljefa kartē, kura ir ne tikai HM ģeometrijas augšējā virsma, bet arī kalpo kā robežnoteikums [13].



1. att. Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa (LAMO) novietojums



2. att. LAMO aktīvā un pasīvā daļa

Modeļa ģeometrijas veidošanai [14] tika izmantotas programmas EXCEL [15], SURFER [16], ArcWiew [17] un oriģinālā RTU izstrādātā programma GDI [18].

Oriģinālo metožu kopums, kuras VMC speciālisti izmantoja LAMO1 un LAMO2 izveidošanai, aplūkots darbā [13].

Kā ilustrācija 3. att. HM shematizācijai kalpo 4. att. un 5. att., kuros dots ģeoloģiskais griezumums RNMZ un pamatiežu ģeoloģisko robežu izvietojums. No šiem attēliem var secināt, ka ģeoloģiskie slāņi Latvijas aktīvajā pazemes ūdeņu zonā nav nepārtraukti. Šis apstāklis būtiski sarežģīja LAMO izveidošanu un pilnveidošanu.

Pēc LAMO1 pirmo rezultātu [1] kritiskas analīzes, 2013. gadā tika veikti uzlabojumi, kuri radīja LAMO2 versiju:

- lai uzlabotu HM precizitāti Latvijas ziemeļu daļā, apvienotais horizonts D2ar# tika aizvietots ar horizontiem D2brt, D2ar un sprosslāni D2arz; tāpēc HM plakņu skaits pieauga no 25 līdz 27;
- realizēti upju iegrauzumi pamatiežos (skat. 6. att);
- ezeri izdalīti kā virszemes ūdensobjekti, kuru piesaisti modelim var regulēt, lai panāktu to režīmu atbilstību dabā novērotajam vidējam stāvoklim.



LAMO2 netika izmainīta upju pazemes pietece 5680 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn, kura ir tuva grāmatās [20, 21] rekomendētajai 6000 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn. LAMO2 rezultāti izmantoti pārskatu [2, 3, 4, 5,] sagatavošanai.

2014. gadā izveidota LAMO3 versija [6, 22], kurā veikti šādi uzlabojumi:

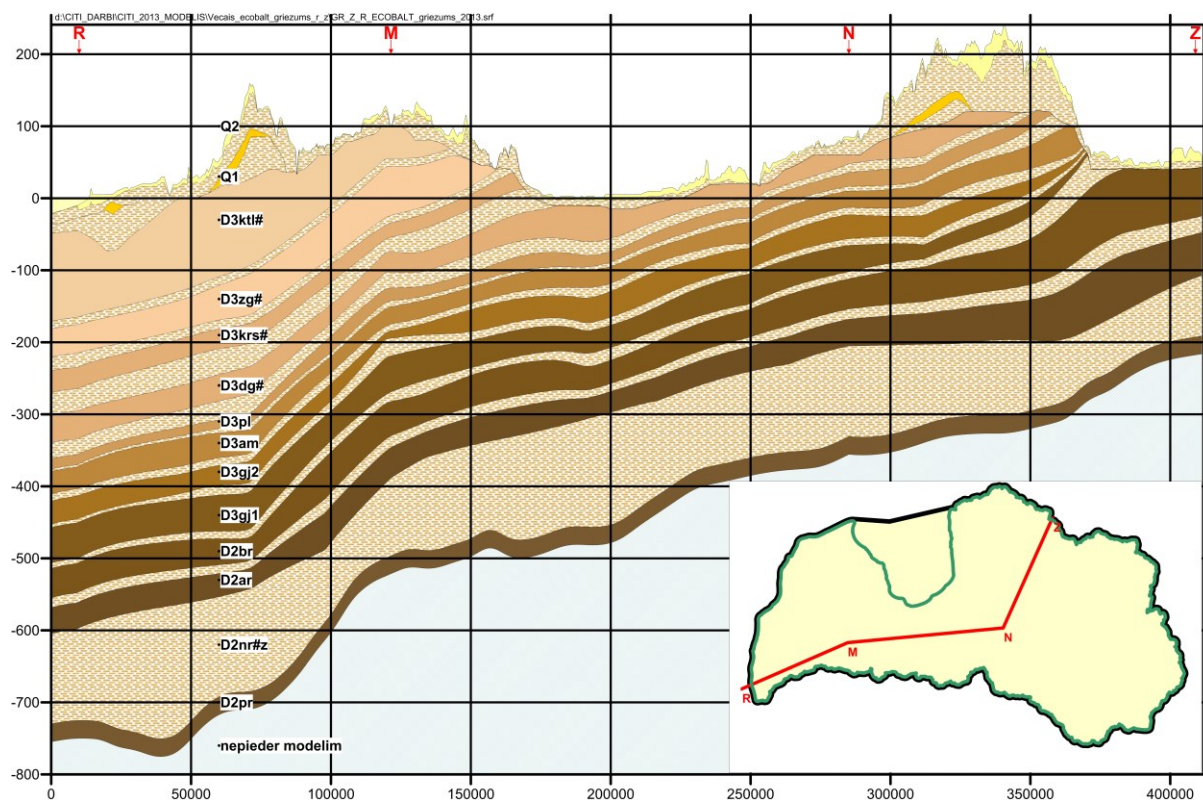
- palielināts HM hidrogrāfiskā tīkla blīvums (skat. 1. tabulu un 7. att.);
- precizētas filtrācijas koeficientu kartes pamatiežu ūdens horizontiem; LAMO1 un LAMO2 šiem horizontiem izmantotas vidējās vērtības visos slāņu mezglos; LAMO3 filtrācijas koeficientu vērtības iegūtas no urbumu atsūknēšanas datiem [23] un tās mainās HM režģa plaknēs;
- ezeru saites ar modeli tika samazinātas 500 reizes, jo LAMO2 šīs saites atbilda fiksētu ūdens līmeņu režīmam kā  $\psi$  - tipa robežnoteikums (skat. 3. iedaļu);
- lai samazinātu pazemes ūdens atslodzi caur aer zonu (2. slānis), divdesmit reizes samazināta saite starp relh (1. slānis) un hidrogrāfisko tīklu;
- lai samazinātu sprosslāņu  $m = 0$  zonu ( $m$  – slāņa biezums) nevēlamo ietekmi, filtrācijas koeficients šajās zonās ir palielināts 10 reizes;



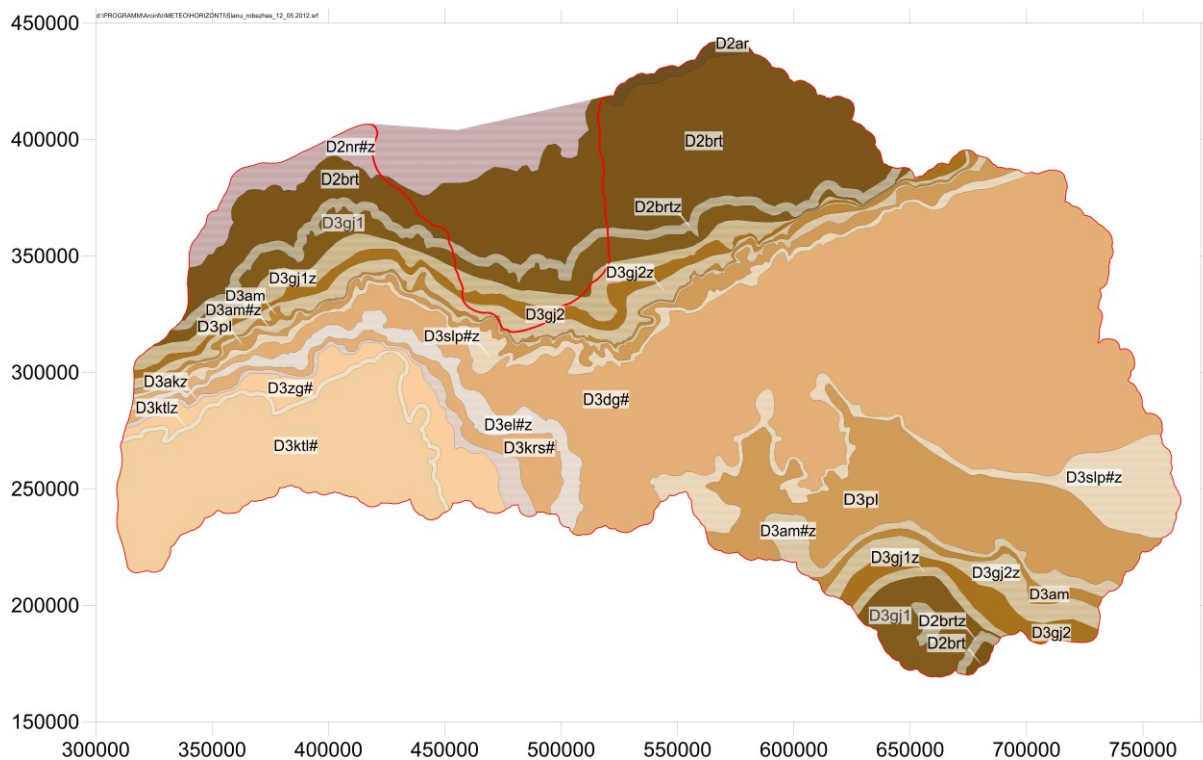
HM plaknes Nr.	Slāņa nosaukums	Ģeoloģiskais kods	Modeļa kods	HM plaknes nosaukums	Komentāri
1.	Reljefs	relh	relh	Reljefs	robežnosacījums
2.	Aerācijas zona	aer	aer	Aerācijas zona	Formāls sprostsblānis
3.	Bezspiediena. Q	Q4-3	Q2	Kvartārs Q2	
4.	Augš. morēna	gQ3	gQ2z	Augšējā. morēna	
5.	Spiediena kvartārs vai Jura	Q1-3 J	Q1#	Kvartārs Q1	Ietver J
6.	Apakšējā morēna vai Triass	gQ1-3 T	gQ1#z	Apakšējā morēna	Ietver T
7.	Perma Karbons Šķerveles Ketleru	P2 C1 D3šķ D3ktl	D3ktl#	Ketleru	D3fm#
8.	Ketleru	D3ktl	D3ktlz	Ketleru z	D3fm#z
9.	Žagares Svētes Tērvetes Mūru	D3žg D3sv D3tr D3mr	D3zg#	Žagares	D3fm#
10.	Akmenes	D3ak	D3akz	Akmenes	D3fm#z
11.	Akmenes Kursas Jonišķu	D3ak D3krs D3jn	D3krs#	Kursas	D3fm#
12.	Elejas Amulas	D3el D3aml	D3el#z	Elejas	D3fm#z
13.	Stipinu Katlešu Ogres Daugavas	D3stp D3ktl D3og D3dg	D3dg#	Daugavas	D3pl-aml
14.	Daugavas Salaspils	D3dg D3slp	D3slp#z	Salaspils	D3pl-aml
15.	Pļaviņu	D3pl	D3pl	Pļaviņu	D3pl-aml
16.	Pļaviņu Amatas	D3pl D3am	D3am#z	Amatas z	D3pl-aml
17.	Amatas	D3am	D3am	Amatas	D2-3ar_am
18.	Augšējā Gauja	D3gj2	D3gj2z	Augšējā Gauja z	D2-3ar_am
19.	Augšējā Gauja	D3gj2	D3gj2	Augšējā Gauja	D2-3ar_am
20.	Apakšējā. Gauja	D3gj1	D3gj1z	Apakšējā. Gauja z	D2-3ar_am
21.	Apakšējā. Gauja	D3gj1	D3gj1	Apakšējā. Gauja	D2-3ar_am
22.	Burtnieku	D2brt	D2brtz	Burtnieku z	D2-3ar_am
23.	Burtnieku	D2brt	D2brt	Burtnieku	D2-3ar_am
24.	Arikula	D2ar	D2arz	Arikula z	D2-3ar_am
25.	Arikula	D2ar	D2ar	Arikula	D2-3ar_am
26.	Narvas,	D2nr2, D2nr1	D2nr#z	Narvas z	D12
27.	Pērnavas	D2prn	D2prn	Pērnavas	D12 robežnosacījums.

 -sprostsblānis    #-apvienotais ūdens horizonts    #z-apvienotais sprostsblānis  
 aquitard    united aquifer    united aquitard

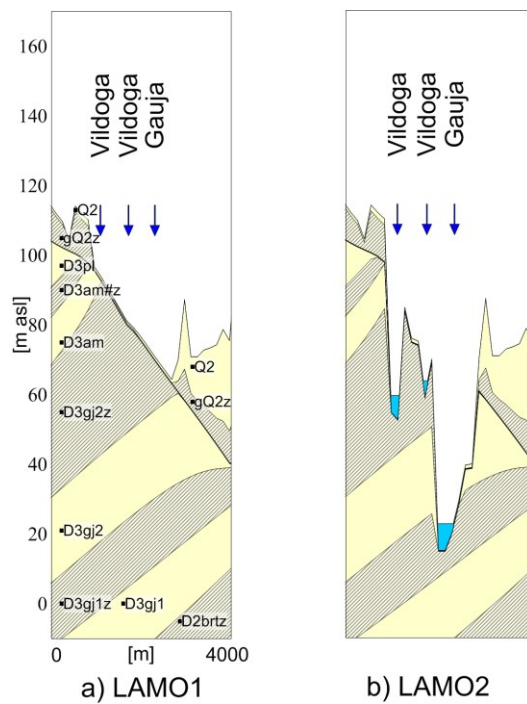
3. att. LAMO vertikālā shematizācija



4. att. LAMO ģeoloģiskais griezum RMNZ

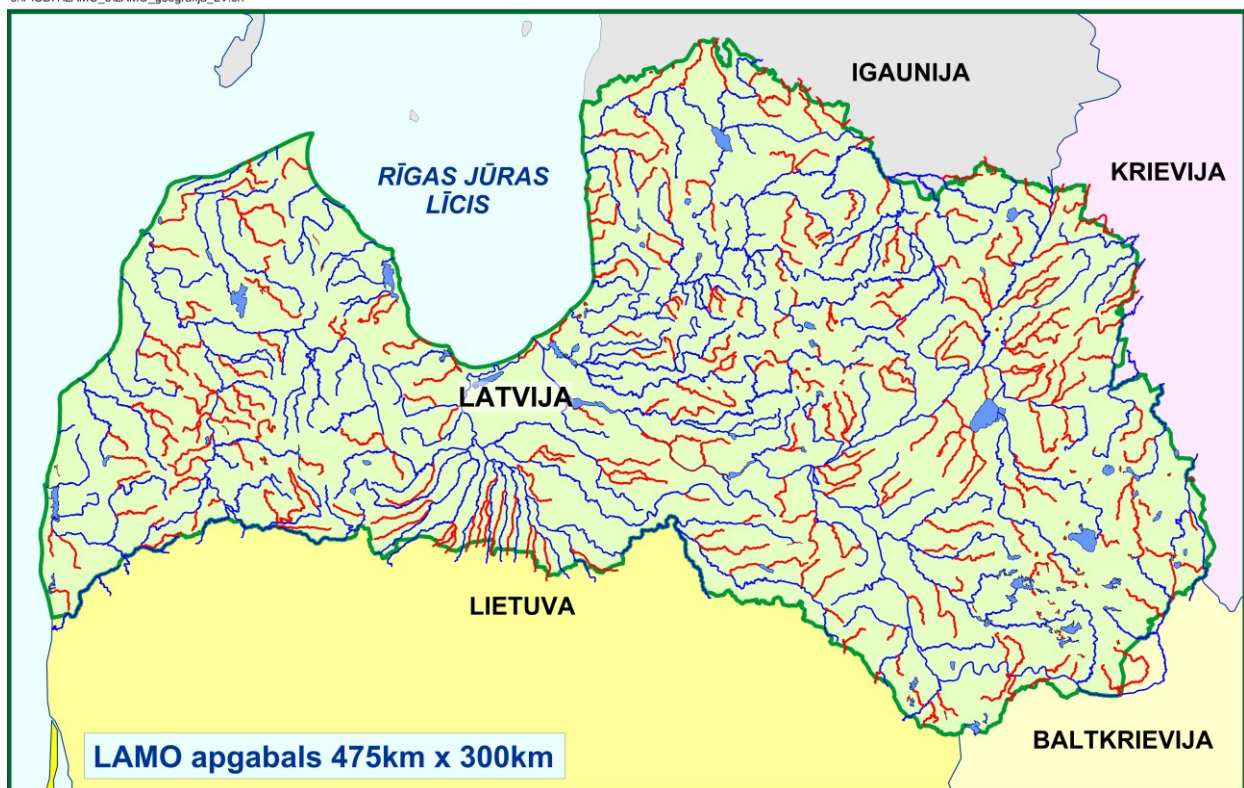


5. att. Pamatiežu ģeoloģisko robežu izvietojums



6. att. Gaujas un tās pieteces Vildogas ieleju iegrauzumi;  
 a) LAMO1 – tikai Kvartāra slānī; b) LAMO2 – arī pamatiežos

c:\FIGDI1\LAMO\_3\LAMO\_geografija\_LV.srf



7. att. LAMO2 un LAMO3 hidrogrāfiskie tīkli;  
 LAMO2 – zilā krāsā; LAMO3 jaunie elementi – sarkanā krāsā



- modeļa lāgošanai tika izveidotas un izmantotas infiltrācijas plūsmu sadalījuma kartes vertikālajiem ģeoloģiskajiem griezumumiem [24]; ar to palīdzību tika atklātas un novērstas grūti pamanāmas upju piesaistes kļūdas, galvenokārt pamatiežu horizontiem.

Salīdzinot ar LAMO2, versijā LAMO3 pieauga upju un ezeru pazemes pieteces:

- upēm no 5680 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn uz 9436 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn;
- ezeriem no 428 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn uz 599 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn.

Upju plūsmas pieaugumu izsauca upju skaita izmaiņa no 199 uz 469 (praktiski divkārtējās upju kopējais garums). Ezeru plūsma ir lielāka tāpēc, ka trīs Daugavas HES ūdenskrātuves LAMO3 tiek modelētas kā ezeri, kuri saistīti ar pamatiežiem D3dg# un D3pl (2 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn LAMO2 → 123 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn LAMO3). Ezeru skaita pieauguma (67 → 127) ietekme uz ezeru pazemes pieteci ir niecīga, jo jauno ezeru laukumi nepārsniedza vienu km<sup>2</sup>. Versijā LAMO3 samazinās plūsma caur HM robežu (936 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn → 499 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn). Šis samazinājums galvenokārt notika pamatiežos (800 → 399), jo tiem LAMO3 ir lietoti mazāki filtrācijas koeficienti, nekā LAMO2. Tie iegūti izmantojot urbumu atsūkņēšanas datus. LAMO sistēmas pilnveidošanas aspektā, versija LAMO3 ir nozīmīgs etaps ceļā uz LAMO4 versijas izveidošanu. Tomēr LAMO3 plaknes režģa blīvums (solis 500 metri) nav pietiekams, lai apmierinoši modelētu paplašinātā hidrogrāfiskā tīkla elementus, kuri to tuvā novietojuma dēļ, dažviet saskārās. Lai šo trūkumu novērstu, bija jāsamazina režģa solis līdz 250 metriem, jo tad režģa blīvums pieaug četras reizes (skat. 1. tabulu). Šīs izmaiņas rezultātā no LAMO3 radās versija LAMO4.1. Ja šai versijai upju pazemes pieteces plūsmas sadalījums tiek saskaņots ar upju caurteces mērījumiem, tad iegūst LAMO4.2=LAMO4. Pārejas LAMO3→LAMO4 abi etapi iztirzāti 4. nodaļā.

### 3. Matemātiskie formulējumi

Lai izprastu LAMO pilnveidojumus, ir jāapskata galvenie šī HM matemātiskie formulējumi. Izmantojot 3D-galīgo starpību aproksimāciju [10], tiek izveidots modeļa  $x, y, z$  – režģis. Režģi veido ( $h \times h \times m$ ) izmēru bloki ( $h$  ir nemainīgs bloka solis,  $m$  ir mainīgs ģeoloģisko slāņu biezums). LAMO4 versijai  $h=250$ ; metri, režģa bloku (šūnu) skaits ir  $61.56 \times 10^6$  (skat. 1. tabulu).

MODFLOW programmā [10], ar kuru GV sistēmā realizē HM, modeļa režģi veido taisnstūra formas  $xy$ -slāņi, kuru skaits ir  $u$ . LAMO4 versijai  $u=27$  (3. att.). Jebkurš no slāņiem formāli eksistē visos tā  $xy$ -režģa mezglos. Taču ne visi LAMO ietvertie ģeoloģiskie slāņi dabā pastāv visā Latvijas teritorijā. Kā seko no 4. att. un 5. att., gandrīz visi pamatiežu slāņi iznirst zemkvartāra virsmā un tālāk neturpinās. Pēc izniršanas to biezumi ir nulle ( $m=0$ ). Lai novērstu “dalīšanu ar nulli” GV aprēķinos un nodrošinātu formālu šādu slāņu eksistenci visos  $xy$ -režģa mezglos,  $m=0$  aizvieto ar mazu  $\varepsilon > 0$  (LAMO lieto  $\varepsilon = 0.02$  metri).

LAMO aprēķina 3D sadalījumu pazemes ūdens līmeņu vektoram  $\varphi$ , kā skaitliskam atrisinājumam robežproblēmai, kuru HM  $xyz$ -režģa mezglos aproksimē ar algebrisku vienādojumu sistēmu [19]:

$$A \varphi = \beta - G \psi, \quad A = A_{xy} + A_z. \quad (1)$$

Šeit  $A$  ir ģeoloģiskās vides ūdens vadāmības matrica, kuru veido horizontāli  $A_{xy}$  un vertikāli  $A_z$  elementi modeļa režģī;  $\psi$  un  $\beta$  ir ūdens līmeņu un plūsmu robežnoteikumu

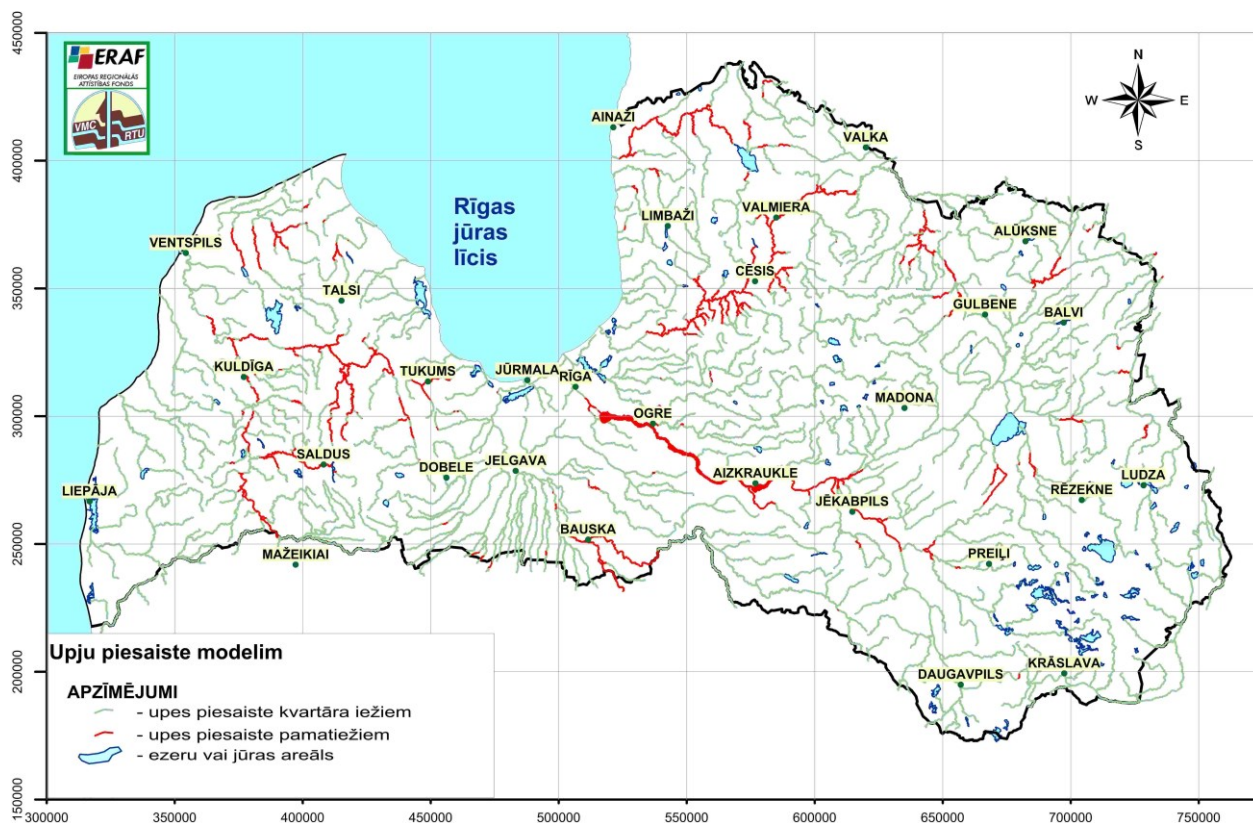
vektori;  $G$  ir matrica (daļa no  $A$ ), kurā ietilpst elementi, kuri saista mezglus, kuros  $\varphi$  ir jāatrod, ar punktiem, kuros  $\psi$  ir dots kā robežnoteikums.

LAMO gadījumā  $\beta$  vektors pārstāv tikai ekspluatācijas urbumu ūdens plūsmas. Lai nodrošinātu vienādojuma (1) iteratīvā atrisināšanas procesa ātru konvergenci,  $\psi$ -noteikumi ir fiksēti uz visām HM ārējām virsmām (augša, apakša, sāni) [19]. Parasti  $\psi$ -noteikumu vērtības ir relatīvi labi zināmas un par šī paņēmiena efektivitāti liecina tas apstāklis, ka iterāciju skaits sistēmas (1) atrisināšanai LAMO3 un LAMO4 versijām praktiski neatšķiras. Pat LAMO4 versijai atrisinājuma  $\varphi$  iegūšana visai Latvijai neprasa vairāk kā 5 minūtes, ja tiek izmantots mūsdienīgs un jaudīgs (16-32 GB atmiņa) personālais dators.

Plūsmas  $q_{rivers}$  un  $q_{lakes}$  upēm un ezeriem GV sistēmā tiek modelētas sekojoši:

$$q_{rivers} = G_{rivers} (\varphi - \psi_{rivers}), \quad q_{lakes} = G_{lakes} (\varphi - \psi_{lakes}). \quad (2)$$

Šeit  $G_{rivers}$  un  $G_{lakes}$  ir diagonālās matricas (daļa no  $G$ ), kuras apvieno elementus, kuri savieno robežnoteikumus  $\psi_{rivers}$  un  $\psi_{lakes}$  upēm un ezeriem ar modeļa režģa mezgliem. Lai izmainītu upju un ezeru pazemes pieteces plūsmas, atbilstoši aprēķinātajiem mērķiem, ir jākalibrē šo matricu elementi. Šis uzdevums ir īstenots LAMO4 versijai, kurai  $q_{rivers}$  saskaņoti ar caurplūdes mērījumiem upēs. Upes ir saistītas ar kvartāra un arī ar pamatiežiem (skat. 8. att.). Parasti šeit pamatiežos ir upju ieleju iegrauzumi.



8. att. Upju piesaiste modelim

Izšķiroša pozitīva loma LAMO izveidošanā ir virsmas reljefa kartes  $\psi_{relh}$  izmantošanai par robežnoteikumu HM augšējā virsmā (1. slānis 3. att). Tad infiltrācijas plūsmu  $q_{aer}$  aerācijas zonā (2. slānis) nosaka vienādojums:

$$q_{aer} = G_{aer} (\psi_{rel} - \varphi_{Q2}). \quad (3)$$

Šeit  $G_{aer}$  ir ūdens vadāmības matrica aer zonai, kura tiek izmantota kā formāls sprosts slānis;  $\varphi_{Q2}$  ir ūdens līmeņu sadalījums Q2 ūdens horizontā. Plūsmas  $q_{aer}$  intensitāti var regulēt, izmainot  $G_{aer}$  elementus. Kartes  $\psi_{rel}$  izmantošana dod būtiskas priekšrocības, salīdzinot ar klasisko pieeju, kad cenšas  $q_{aer}$  modelēt kā plūsmas noteikumu  $\beta$ :

- lielu reģionālu HM gadījumā (kā LAMO) nav iespējams definēt ticamu  $\beta$ -noteikumu visai modeļa augšējai virsmai tā ārkārtējas sarežģītības dēļ (skat. 1d. att. D. pielikumā par LAMO infiltrācijas plūsmu Q2 horizontā);
- noteikums  $\psi_{rel}$  garantē ticamus  $\varphi_{Q2}$  sadalījumus;
- tiek nodrošināta ātra sistēmas (1) iteratīvā risināšanas procesa konverģence, jo Kvartāra iežos (nr. 2, 3, 4) ir visaugstākā pazemes plūsmu intensitāte un mainība;
- $\psi_{rel}$  noteikums ir precīzi zināms, īpaši tad, ja tajā ir integrēti hidrogrāfiskā tīkla elementi (kā LAMO);
- pateicoties  $\psi_{rel}$  izmantošanai, noskaidrots, ka daļa no infiltrētās pazemes ūdens plūsmas kļūst par virszemes noteci (skat. 4. nodaļu).

Elementus  $a_{xy}$ ,  $a_z$  matricām  $A_{xy}$ ,  $A_z$  vai ( $g_{xy}$ ,  $g_z$  matricām  $G$ ) var aprēķināt izmantojot formulas:

$$a_{xy} = k_i m_i = T_i, \quad a_z = h^2 k_i / (m_i + m_{i+1} k_i / k_{i+1}), \quad (4)$$

$$m_i = z_{i-1} - z_i \geq 0 \quad i = 1, 2, p,$$

kur  $z_{i-1}$ ,  $z_i$  ir i-tā slāņa augšējās un apakšējās virsmas;  $z_0$  ir zemes virsma  $\psi_{rel}$ ;  $p$  ir virsmu skaits (LAMO gadījumā  $p = 28$ );  $k_i$ ,  $m_i$  ir i-tā slāņa filtrācijas koeficienta un biezuma digitālo  $k$  un  $m$  – karšu elementi;  $k_{i+1}$ ,  $m_{i+1}$  ir nākošā zemāk guļošā slāņa elementi;  $z$  -karšu kopa nosaka HM režģa ģeometriju (stratifikāciju).

Formulā (4) elementi  $a_{xy} = T$  atbilst ģeoloģisko slāņu ūdens vadāmībai (horizontālā virzienā). LAMO3 un LAMO4 versijām pamatiežu ūdens horizontiem tika pilnveidotas  $k$ -kartes, izmantojot no atsūkņēšanas urbumu datiem iegūtos  $T$  sadalījumus:

$$k = T / m. \quad (5)$$

Formulas (5) izmantošana izraisīja problēmas ūdens horizontu  $m = 0$  un  $m \rightarrow 0$  zonās. LAMO4 versijai šīs problēmas ir sekmīgi atrisinātas (skat. 5. nodaļu).

Modeļa šūnu ( $h \times h \times m$ ) centri i-tajam slānim atrodas uz virsmas  $z_{i-0.5}$ :

$$z_{i-0.5} = 0.5(z_{i-1} + z_i), \quad i=1, 2, p. \quad (6)$$

Apakšvektors  $\varphi_i$  un vertikālā plūsma  $q_{i,i+1}$  ir telpiski saistīta ar virsmu  $z_{i-0.5}$ . Šī īpatnība ir būtiska ūdens līmeņu un infiltrācijas sadalījumu vizualizācijai vertikālajos ģeoloģiskajos griezumos [24].

#### 4. Pāreja no LAMO3 uz LAMO4

Pāreja LAMO3 → LAMO4 veikta divos etapos:

- HM režģa blīvuma palielināšana ( $h=500$  metri →  $h=250$  metri) īstenoja pāreju LAMO3 → LAMO4.1;
- modeļa upju pazemes pieteces plūsmu regulēšana nolūkā panākt to atbilstību dabā veiktajiem upju caurteces mērījumiem (LAMO4.1 → LAMO4.2=LAMO4).

Versijai LAMO4.1  $k$  un  $m$  – kartes iegūtas ar lineāru interpolāciju no LAMO3 kartēm. Arī  $\psi$  – robežnoteikumi iegūti interpolācijas ceļā. Nolūkā iegūt LAMO4.1 kā LAMO3 kopiju, apzināti netika veikti nekādi HM kalibrēšanas pasākumi. LAMO4.1 vienīgās izmaiņas ir blīvāks HM režģis un precīzāka  $\psi_{rel}$  karte. Dati par LAMO versiju pazemes ūdens plūsmu bilancēm apkopoti 2. tabulā.

2. tabula

LAMO versiju lokālās pazemes plūsmu bilances [tūkst.m<sup>3</sup>/dienn]

Versijas nosaukums	$q_{inflow}$	$q_{rivers}$	$q_{lakes}$	$q_{boundary}$	$q_{wells}$
LAMO2	7199	-5680	-428	-936	-155
LAMO3	10763	-9436	-599	-499	-155
LAMO4.1	10349	-9104	-541	-549	-155
LAMO4.2	14221	-12386	-825	-855	-155

LAMO4.1 ir LAMO3 kopija

LAMO4.2 ir kalibrēta  $q_{rivers}$

No 2. tabulas var secināt, ka versijai LAMO4.1 nedaudz samazinājušās visas plūsmas (izņemot  $q_{boundary}$  un  $q_{wells}$ ). Šo izmaiņu iemeslu noskaidrošanai salīdzināsim 3. tabulas datus LAMO3 un tās kopijai LAMO4.1.

3. tabula

Upju un ezeru plūsmas LAMO3 un LAMO4.1

Versijas nosaukums	Pazemes plūsma [tūkst.m <sup>3</sup> /dienn]		Mezglu skaits, kuri savienoti ar upēm un ezeriem		Laukums, kas savienots ar upēm un ezeriem [km <sup>2</sup> ]	
	$q_{rivers}$	$q_{lakes}$	$N_{rivers}$	$N_{lakes}$	$L_{rivers}$	$L_{lakes}$
LAMO3	9436	599	42137	6093	10534	1523
LAMO4.1	9104	541	89683	19321	5605	1207

Dati par laukumiem, kuri saistīti ar upēm un ezeriem abās LAMO versijās, doti 3. tabulā. Laukumi  $L_{rivers}$  un  $L_{lakes}$  ar kuriem versijā LAMO4 ir saistītas upes un ezeri ir mazāki nekā LAMO3 versijai. Šos laukumus aprēķina sekojoši:

$$L_{rivers} = N_{rivers} h^2, \quad L_{lakes} = N_{lakes} h^2, \quad (7)$$

kur  $N_{rivers}$  un  $N_{lakes}$  ir ar upēm un ezeriem saistīto režģu mezglu skaits; LAMO3 –  $h=0.5$  km; LAMO4.1 –  $h=0.25$  km. Skaitlis  $N_{rivers}$  LAMO4.1. versijai ir gandrīz divreiz lielāks nekā LAMO3 ( $89683 > 42137$ ); ar upēm saistītais laukums  $L_{rivers}$  ir gandrīz divreiz mazāks

(5605<10534). Kopīgā matricas  $G_{river}$  elementu vērtību summa ir aptuveni vienāda abām LAMO versijām. Laukuma  $L_{rivers}$  samazinājums LAMO4.1 versijā ir vēlama parādība, jo LAMO3 ar upēm bija saistīti aptuveni 16% no visas Latvijas sauszemes, kas tā nav dabā.. Upju piesaistes laukuma samazinājums izsauca plūsmas  $q_{rivers}$  samazinājumu.

Arī ezeriem versijā LAMO4.1  $L_{lakes}$  ir mazāks nekā LAMO3 (1207<1523). Šo samazinājumu izsaul precīzāka ezeru kontūru aproksimācija LAMO4.1 režģī (īpaši mazajiem ezeriem). Šī iemesla dēļ ezeru plūsma LAMO4.1 versijai samazinājās (541<599). Arī plūsmas  $q_{inflow}$  samazināšanos (10349<10763) izsauca upju un ezeru plūsmu samazinājumi.

Otrajā LAMO4 versijas veidošanas etapā (LAMO4.1→LAMO4.2) tika veikta upju pazemes pieteces plūsmu regulēšana 69 sateces primārajos apgabalos nolūkā panākt upju plūsmu atbilstību izmērītajām upju caurtecēm. No 2. tabulas var konstatēt, ka kopīgā upju pazemes pietece LAMO4.2 versijai ir palielinājusies (12386>9104), salīdzinot ar LAMO4.1. Lai panāktu tik būtisku upju plūsmas pieaugumu, matricas  $A$  elementu vērtības tika palielinātas 1.4 reizes. Šis pasākums nemainīja  $\varphi$  sadalījumu, jo LAMO gadījumā ir spēkā automodelēšanas princips: ja nemaina  $\psi$  – robežnoteikumus, tad visu elementu sinhrona izmaiņa matricai  $A$  neizsaul atrisinājuma vektora  $\varphi$  maiņu.

Upju pazemes pieteces plūsmu novērtēšanas metodika un sasniegtie HM kalibrēšanas rezultāti apskatīti A. pielikumā.

Dažādas LAMO4 pazemes plūsmu bilances tabulas ir apkopotas B. pielikumā.

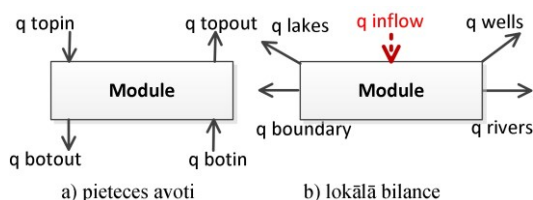
Pazemes plūsmu bilances iegūtas ar GV plūsmu aprēķina rīku (mass balance). Ūdens horizontam GV aprēķina plūsmas  $q_{topin}$ ,  $q_{topout}$ ,  $q_{botin}$ ,  $q_{botout}$  (skat. 9a. att). Šo plūsmu summa dod lokālo pieteces plūsmu  $q_{inflow}$  :

$$q_{inflow} = q_{topin} + q_{topout} + q_{botin} + q_{botout} . \quad (8)$$

Plūsma  $q_{inflow}$  eksistē tikai horizontu  $m > 0$  zonā. GV sistēma arī aprēķina plūsmas upēm  $q_{river}$ , ezeriem  $q_{lakes}$ , caur horizontu robežu  $q_{border}$  un urbumiem  $q_{wells}$  (9b. att.). Šīs plūsmas kopā ar  $q_{inflow}$  veido lokālo bilanci:

$$q_{inflow} + q_{river} + q_{lakes} + q_{border} + q_{wells} = 0. \quad (9)$$

Izteiksmes (8) un (9) grafiski ilustrē 9a) un 9b) attēli. Šeit “Module” pārstāv jebkuru ģeoloģiskās telpas daļu (horizonts , modelis, kvartāra un pamatiežu sistēmas).



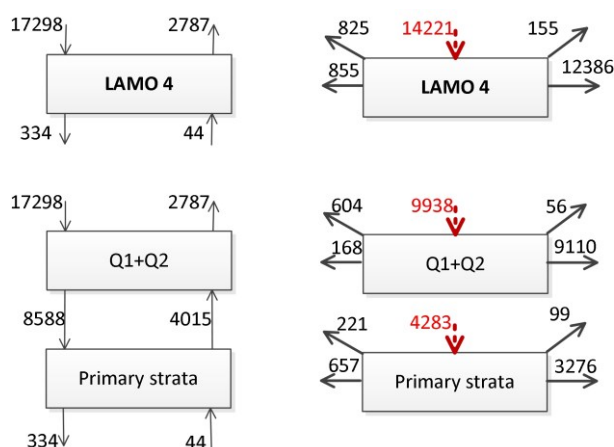
9. att. Lokālās plūsmu bilances shēma

B. pielikumā 1b. tabula ir kopsavilkums par LAMO4 pazemes plūsmu lokālajām bilancēm lielbaseiniem un to Kvartāra un pamatiežu sistēmām (skat. 10. att.); 2b. tabula izvērš 1b. tabulas saturu relatīvo lokālo plūsmu  $B$  [%] un aktivitāšu  $N$  [reizes] formā. Šāda tabulas forma dod lielas iespējas pazemes plūsmu salīdzinošai analīzei. 3b. tabulā doti relatīvie dati par LAMO2.



LAMO4 lokālās pietece plūsmas  $q_{inflow}$  vispārīgākam skaidrojumam ir veltīta 4b. tabula ar pievienotu shēmu, kura palīdz izprast šīs plūsmas lomu. Ja analizē 9. att. četras plūsmas modeļa augšējai un apakšējai virsmai, tad var izšķirt trīs infiltrācijas plūsmu veidus:

- $q_{topin}$  ir plūsma, kura nonāk pazemes ūdeņos (17298 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn Latvijai);
- $q_{toprez} = q_{topin} + q_{topout}$  ir rezultējošā infiltrācijas plūsma (14511 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn Latvijai), ja ņem vērā plūsmu  $q_{topout}$ , kura atgriežas zemes virsū un faktiski kļūst par virszemes noteci (-2787 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn Latvijai);
- $q_{toprezl} = q_{inflow} -$  lokālā pietece (14221 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn Latvijai), kura ņem vērā plūsmu  $q_{botrez}$  (-290 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn Latvijai), kura izplūst caur modeļa apakšas virsmu (uz D2pr horizontu); plūsmu  $q_{inflow}$  izmanto lokālo bilanču veidošanai un tās aprēķina formula (8) nav sarežģīta.



10. att. Lokālā bilance [tūkst.m<sup>3</sup>/dienn] Latvijas Kvartāra un pamatiežu sistēmām (1b. tabula)

Plūsma  $q_{toprez}$  raksturo faktisko infiltrāciju, bet plūsma  $q_{inflow}$  ir pietece lokālās bilances aprēķinos. No 4b. tabulas var secināt, ka minētās infiltrācijas plūsmas maz atšķiras un tāpēc arī  $q_{inflow}$  var izmantot infiltrācijas tuvinātai novērtēšanai. 5b. tabula izvērš 4b. tabulas saturu relatīvo plūsmu  $B$  [%] un aktivitāšu  $N$  [reizes] formā. No 5b. tabulas var secināt, ka relatīvi visvairāk pazemes ūdens kļūst par virszemes noteci Lielupes un Ventas lielbaseinos ( $N=1.222$  un  $1.219$ ).

6b. tabulā dota pazemes ūdens plūsmu lokālā bilance Latvijas ūdens horizontiem; 7b., 8b., 9b., 10b. tabulas ir lokālās pazemes plūsmu bilances Gaujas, Daugavas, Lielupes, Ventas lielbaseinu ūdens horizontiem.

C. un D. pielikumos doti ar LAMO4 iegūtie pazemes ūdens līmeņu un infiltrācijas plūsmu sadalījumi ūdens horizontiem.

## 5. Filtrācijas karšu pilnveidošana LAMO4 ūdens horizontiem

LAMO3 versijai veikta  $k$  – karšu pilnveidošana, izmantojot urbumu atsūknēšanas datus [22, 23]. Šo karšu veidošanai tika lietota formula (5)  $k=T/m$ , kurā ūdens vadāmības vērtības  $T$  iegūtas no urbumu atsūknēšanas datiem, bet slāņu biezuma  $m$  – kartes ir dalītājs. Šī iemesla dēļ slāņu  $m=0$  un  $m \rightarrow 0$  zonās radās ekstremālas  $k$  vērtības. Upju ieleju iegrauzumu vietās notika lēcienveida  $k$  izmaiņas. Ekstrēmās  $k$  vērtības tika aizvietotas ar maksimumu, kuru varēja atrast  $m > 0$  laukumā. Nenotika atsūknēšanas urbumu datu novērtēšana un atlase. Minētie trūkumi ir novērsti LAMO4 versijai.

## 5.1. Datu pārbaude un atlase

Urbumu atsūkņēšanas datus sagatavoja LVĢMC. Šo datu ticamība nav nekad pārbaudīta. LAMO3 versijai tika veikta redzami nepareizu datu izslēgšana un datu limitēšana intervālam  $5 > \gamma > 0.3$  ( $\gamma$  – urbuma īpatnējais debīts [litrs/(sec metrs)]). Versijai LAMO4  $\gamma$  – datu atlase tika īstenota četros secīgos etapos, kuru rezultāti ir apkopoti 4. tabulā.

4. tabula

Urbumu datu apstrādes rezultāti

Slāņa kods	Urbumu skaits				$\gamma_{vid}$		
	glabāti	izvēlēti	limitēti	atlasīti	izvēlēti	limitēti	atlasīti
D3ktl#	288	156	114	46	0.72	0.79	0.88
D3zg#	872	681	533	143	0.80	0.87	1.08
D3krs#	712	524	426	118	0.84	0.86	1.11
D3dg#	2284	959	819	256	1.17	1.15	1.74
D3pl	2874	1295	1073	374	1.08	1.05	1.46
D3am	778	526	420	190	0.64	0.71	0.80
D3gj2	5241	1229	1096	324	0.77	0.84	1.05
D3gj1	5346	1579	1378	425	0.82	0.88	1.18
D2brt	1867	1332	1020	367	0.71	0.80	0.99
D2ar	1740	1188	974	314	0.64	0.71	0.88

4. tabulā ir dots urbumu skaits  $N$  katrā etapā un vidējā īpatnējā debīta  $\gamma_{vid}$  vērtība, kuru dod formula:

$$\gamma_{vid} = (\sum_{i=1}^N \gamma_i) / N, \quad (10)$$

kur  $\gamma_i$  ir  $i$ -tā urbuma īpatnējais debīts;  $N$  ir to urbumu skaits, kuri piedalās etapā.

Urbumu datu apstrādes etapos tiek veiktas šādas darbības;

1. etapā (glabāti) izslēdz tikai redzami kļūdainus datus un urbumu skaits šajā etapā ir tuvs pieejamo sākuma datu skaitam;
2. etapā (izvēlētie) tiek atmesti dati, kurus dod urbumi, kuru filtrs pilnībā neatrodas ūdens horizontā; ja filtrs atrodas divos vai vairākos ūdens horizontos, tad šādu urbumu datus nevar lietot  $T$  noteikšanai; No 4. tabulas redzams, ka otrajā etapā tiek izslēgts relatīvi liels urbumu skaits, īpaši D3gj2 un D3gj1 horizontos;
3. etapā (limitēšana) tiek izvēlēti urbumi, kuru dati atbilst intervālam  $4 > \gamma > 0.2$ ;
4. etapā (atlasīšana) tiek izpildīti divi soļi:
  - aplī ar rādiusu  $R_1$  tiek saglabāts viens urbums ar lielāko vērtību  $\gamma$ ;
  - aplī ar rādiusu  $R_2$  tiek saglabāti urbumi, kuri atbilst noteikumam  $(1 + \Delta) > \gamma_{vid} > (1 - \Delta)$ ;  $\gamma_{vid}$  tiek aprēķināts aplī un  $\Delta$  ir novirze no vidējās vērtības  $\gamma_{vid}$ .

LAMO4 versijai tika izmantoti parametri:  $R_1=2000$  metri,  $R_2=4000$  metri,  $\Delta=0.3$ .

Izpildot 1. soli, tiek saglabāti urbumi ar lielāko  $\gamma$ . Otrajā solī aplī ar rādiusu  $R_2$  var saglabāties vairāki urbumi. Kā seko no 4. tabulas, ceturtajā etapā notiek būtisks atlasīto

urbumu skaita samazinājums. Par to vizuāli var pārliecināties, ja salīdzina 1e. att. un 2e. att. E. pielikumā, kurā dots  $k$  – kartes iegūšanas piemērs D3pl horizontam.

No 4. tabulas var secināt, ka katrā etapā notiek īpatnējā debīta  $\gamma_{vid}$  vērtības palielināšanās, kuru īpaši veicina 4. etapa atase.

## 5.2. Datu korekcija $k$ -kartēm

Visiem LAMO pamatiežu slāņiem ir  $m=0$  zonas (skat 4. att. un 5. att.). Dažiem no tiem eksistē upju ieleju iegrauzumi (skat. 8.att.). Vispārīgi dati par pamatiežu ģeometriskajām īpašībām apkopoti 5. tabulā

5. tabula

Kopsavilkums par LAMO pamatiežu horizontu ģeometriskajām īpašībām

Horizonta kods	Laukums [tūkst.km <sup>2</sup> ]	$m_{vid}$ [metri]	$m_{max}$ [metri]	$m_{max} / m_{vid}$	$*(l/m)_{vid}$
D3ktl#	5.44	66.2	105	1.58	0.15
D3zg#	7.53	43.5	87.0	2.00	0.24
D3krs#	9.34	22.5	49.0	2.18	0.36
D3dg#	32.84	30.7	88.7	2.89	0.34
D3pl	44.10	22.7	56.0	2.47	0.55
D3am	46.52	22.1	45.3	2.05	0.53
D3gi2	51.17	26.5	58.4	2.20	0.49
D3gi1	56.66	31.8	85.8	2.70	0.51
D2brt	68.96	44.8	110.0	2.46	0.40
D2ar	68.96	30.9	98.1	3.17	0.50

$*(l/m)_{vid}$  urbuma filtra garuma un slāņa biezuma attiecības vidējā vērtība

Lai novērstu upju ieleju iegrauzumu ietekmi uz  $k$ - kartēm, tika lietotas  $m_0$  – kartes, kurās nav upju ieleju iegrauzumu pamatiežos. Šādas kartes tika izmantotas LAMO1 versijā. Arī šobrīd  $m_0$  – kartes kalpo kā starta stāvoklis jebkuru ģeometrisku izmaiņu īstenošanai HM (z - karšu modificēšana).

Lai novērstu ekstrēmu  $k$  vērtību rašanos pārejas zonā  $m \rightarrow 0$  horizonta iekšpusē, tika izmantota korekcijas matrica  $C$ , kurā arī tiek lietota  $m_0$  – karte:

$$I > C = m_0 / (0.75 m_{vid}) > 0. \quad (11)$$

Šeit skaitlis 0.75 atrasts empīriski nolūkā novērst ekstremālo  $k$  vērtību rašanos visu LAMO horizontu  $m \rightarrow 0$  zonās. Par  $C$  matricas grafisko izskatu var spriest no 5e. att. E. pielikumā. Koriģētos lielumus  $\gamma_{kor}$ ,  $k_{kor}$ , un  $T$  dod formulas:

$$\gamma_{kor} = C \gamma, \quad k_{kor} = 137 \gamma_{kor} / m_0, \quad T = k_{kor} m, \quad (12)$$

kur  $T$  aprēķinam izmanto reālo  $m$  – karti ar upju ieleju iegrauzumiem.

Par  $k_{vid}$  izmaiņām interpolācijas posmā un  $C$ -korekcijas ietekmē var spriest no 6. tabulas datiem.

$\gamma_{vid}$  maiņa interpolācijas un korekcijas ietekmē

Slāņa kods	Pēc interpolācijas	Pēc korekcijas		Korekcijas faktors
	$\gamma_{vid}$	$\gamma_{vid}$	$\gamma_{max}$	$(c_{cor})_{vid}$
D3ktl#	0.87	0.70	2.13	0.80
D3zg#	1.09	0.99	3.24	0.89
D3krs#	1.09	1.02	2.91	0.93
D3dg#	2.09	0.71	3.99	0.83
D3pl	1.48	1.37	3.61	0.91
D3am	0.749	0.71	2.38	0.95
D3gj2	1.28	1.15	3.19	0.94
D3gj1	1.21	1.14	3.28	0.94
D2brt	1.03	1.0	3.00	0.96
D2ar	0.83	0.79	3.11	0.96

No 6. tabulas datiem var secināt, ka korekcija ar  $C$  matricu samazina  $\gamma_{vid}$ , jo tiek novērsta ekstrēmo  $\gamma$  vērtību rašanās  $m \rightarrow 0$  zonā. Jo  $(c_{cor})_{vid}$  vērtība ir tuvāka 1.0, jo mazākā laukumā tiek īstenota korekcija;  $(c_{cor})_{vid}$  ir  $C$  matricas elementu vidējā vērtība.

LAMO gadījumā  $k$  - karte tiek īstenota kā konstantes  $k_{vid}$  un normalizētās matricas  $K_{norm}$  reizinājums

$$K = K_{norm} k_{vid}; \quad k_{vid} = \left( \sum_{i=1}^N k_i \right) / N. \quad (13)$$

Šeit matricas  $K$  elementus dod formula (12) un tāpēc  $K_{norm} = K / k_{vid}$ . HM kalibrācijai parasti tiek mainīta  $k_{vid}$  vērtība.

7. tabulā dots pārskats par  $k$  - kartēm pamatiežu horizontiem LAMO versijām, kur  $k$  - kartes tiek raksturotas ar parametriem  $k_{vid}$  un  $k_{max} / k_{vid}$ . Versijai LAMO2  $k_{max} / k_{vid} = 1.0$ , jo tika izmantotas fiksētas vienādas  $k$  vērtības visā horizonta režģī. Parametrs  $k_{vid}$  gandrīz visiem horizontiem ir lielāks LAMO2 versijai. Versijām LAMO3 un LAMO4  $k_{max} / k_{vid}$  ir mainīgs visos horizontu mezglos. LAMO4 šai attiecībai ir lielāka vērtība nekā LAMO3 gadījumā. Iespējams, ka to ietekmējusi cita limitēšanas intervāla ( $4 > \gamma > 0.2$ ) izmantošana versijai LAMO4.

LAMO 4 versijai ir novērsti tie trūkumi  $k$  - kartēm, kuri piemita LAMO3 versijai. Ir iespējams  $k$  - karšu kvalitāti uzlabot, ja  $k$  aprēķinos ņem vērā parametra  $l/m$  ietekmi (skat. 5. tabulu) [23].

Pārskats par  $k$  – kartēm versijām LAMO2, LAMO3, LAMO4

Horizonta kods	LAMO2		LAMO3		LAMO4	
	$k_{vid}$ [metri/dienn]	$k_{max} / k_{vid}$	$k_{vid}$ [metri/dienn]	$k_{max} / k_{vid}$	$k_{vid}$ [metri/dienn]	$k_{max} / k_{vid}$
D3ktl#	3.0	1.0	2.12	9.0	1.77	12.10
D3zg#	3.0	1.0	3.64	5.33	3.38	15.75
D3krs#	2.0	1.0	5.95	4.35	6.33	9.89
D3dg#	10.0	1.0	5.58	14.38	9.40	16.06
D3pl	10.0	1.0	6.11	8.51	8.60	19.65
D3am	10.0	1.0	4.69	5.67	4.64	11.25
D3gj2	10.0	1.0	5.58	4.55	5.11	20.05
D3gj1	14.0	1.0	5.24	6.25	4.84	16.00
D2brt	5.0	1.0	1.91	5.83	3.19	13.75
D2ar	5.0	1.0	2.13	6.15	2.91	17.69

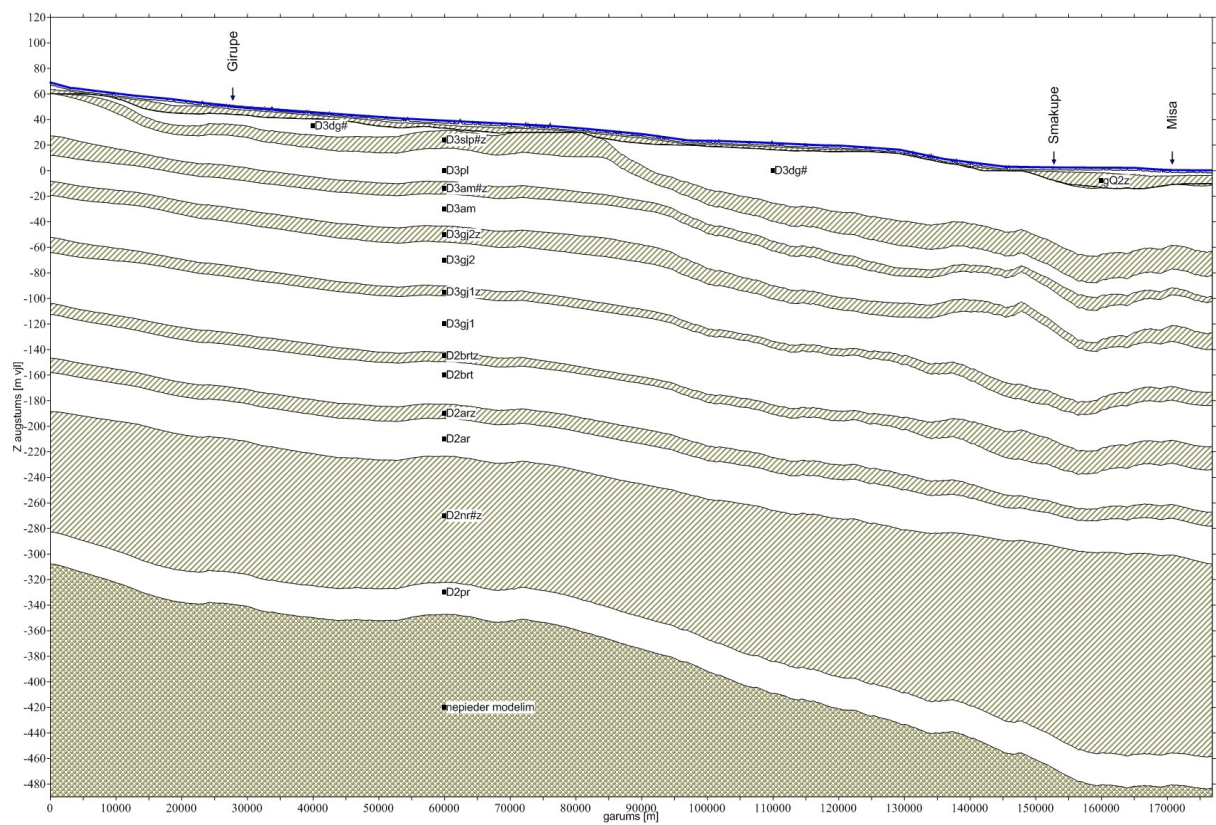
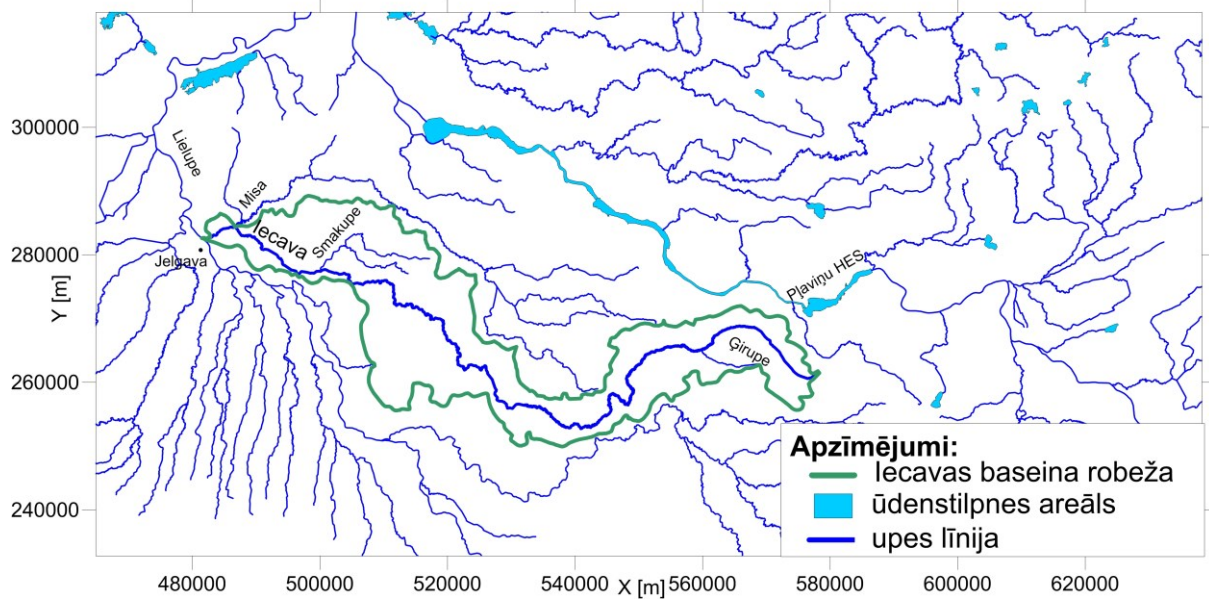
**6. LAMO4 kā instruments dabas procesu pētīšanai**

Ir īstenots skaitlisks eksperiments, kura mērķis bija noskaidrot Iecavas upes pazemes pieteces avotus (atmosfēras nokrišņi, D2prn horizonts?). Iecavas upes novietojums un vertikālais griezumam gar upi doti 11. att. Iecavas upe atrodas Zemgales līdzenumā. Upes garums ir 177 km, tās ūdens līmeņi iztekā un ietekā ir 68.5 m vjl un 0.2 m vjl. Upei ir mazs kritums 0.38 [m/km]=68.3/177. Upes sateces apgabala laukums ir 1174.2 km<sup>2</sup>. Apgabalā atrodas divas mazas pietekas Smakupe un Ģirupe. Lielākā pieteka Misas upe nav iekļauta eksperimentā. No vertikālā griezumam 11. att. redzams, ka šeit neeksistē 5.-12. ģeoloģiskie slāņi (3. att.) Iecavas upe tek Q2 horizontā., zem kura atrodas pamatiežu horizonts D3dg#.

Iecavas upes pazemes ūdens plūsmu bilances dati ir apkopoti 8. tabulā. Tabulas pirmā rinda atbilst sateces apgabala lokālajai bilancei. Otrā rinda dod lokālo bilanci Q2 horizontam.

## Pazemes plūsmu bilance Iecavas upes sateces apgabalam

Objekta nosaukums	$q_{topin}$	$q_{topout}$	$q_{botin}$	$q_{botout}$	$q_{inflow}$	$q_{river}$	$q_{lake}$	$q_{boundary}$	$q_{well}$
Apgabals	172	-31			141	-147	0	9	-3
Q2	167	-31	93	-93	136	-135	0	-1	0
Pamatieži	5				5	-12	0	10	-3



11. att. Iecavas upes novietojums un vertikālais griezum gar upi

Tikai šajā rindā ir dati par plūsmām  $q_{topin}$ ,  $q_{topout}$ ,  $q_{botin}$ ,  $q_{botout}$ . Bilanci pamatiežiem dod 8. tabulas trešā rinda, kura iegūta kā pirmās un otrās rindas starpība. 8. tabulas satura analīze dod šādus secinājumus:

- daļa no infiltrācijas plūsmas  $q_{topin} = 172$  tūkst.m<sup>3</sup>/dienn pārvēršas virszemes noteces plūsmā  $q_{topout} = -31$  tūkst.m<sup>3</sup>/dienn;
- caur sateces apgabala robežu ieplūst  $q_{boundary} = 9$  tūkst.m<sup>3</sup>/dienn, galvenokārt pamatiežos (10 tūkst.m<sup>3</sup>/dienn);
- Iecavas upei ir saite ar Kwartāra horizontu Q2 un pamatiežiem  $q_{river} = -147 = -135 + 12$ ;
- plūsmas  $q_{botin}$  un  $q_{botout}$  Q2 horizontam ir vienādas ( $\pm 93$  tūkst.m<sup>3</sup>/dienn), t.i., caur horizonta pamatni notiek ļoti intensīva augšupejošo un lejupejošo pazemes plūsmu kustība.

Iecavas upes sateces apgabala pazemes plūsmu lokālā bilance daļēji izskaidro, kāpēc skaitliskais eksperiments deva tik negaidītus rezultātus, kurus analizēsim.

Lai atrastu Iecavas upes pazemes pieteces barošanās avotus, tika izmantota GV sistēmas programma MODPATH, kura ņem datus no MODFLOW, kurā realizēts LAMO. MODPATH izmanto ūdens daļiņu (particles) trasēšanas metodi [11]. Daļiņas trajektorijas (pathline) atrašanai telpā un laikā MODPATH izmanto sešas plūsmas, kuras MODFLOW ir aprēķinājusi visu HM elementāro bloku ( $h \times h \times m$ ) skaldnēm. Visiem LAMO slāņiem porainības vērtība ir 0.1.

Ūdens daļiņu sākuma stāvoklis atbilst tām režģa šūnām, kurās upe ir saistīta ar HM. Šo šūnu novietojumu nosaka saišu matrica  $G_{rivers}$  formulā (2). Iecavas upei ir 1027 saites ar HM. Lai vienkāršotu eksperimentu, Smakupei un Girupei daļiņas netika piesaistītas. Tiek noskaidrots, kur nonāks 1027 ūdens daļiņas, ja tās kustēsies virzienā, kas ir pretējs pazemes plūsmas gradientam (reversais kustības režīms). Daļiņa tiek apstādināta, ja tā sasniedz kādu no  $\psi$  tipa robežnoteikumiem. LAMO tas notiek modeļa pirmajā slānī, kurā fiksēts  $\psi_{rel}$  un 27. slānī, kur uzdots  $\psi_{D2prn}$ . Ja avots ir atmosfēras nokrišņi, tad daļiņas sasniedz pirmo slāni. Dabā ūdens daļiņas kustās plūsmas gradienta virzienā, kas jāņem vērā trasēšanas rezultātu analīzē.

Sagaidījām, ka skaitliskais eksperiments apstiprinās tradicionālo pieņēmumu, ka upes pazemes pieteces avoti atrodas upes sateces apgabalā un ka pazemes pieteci šeit rada atmosfēras nokrišņi.

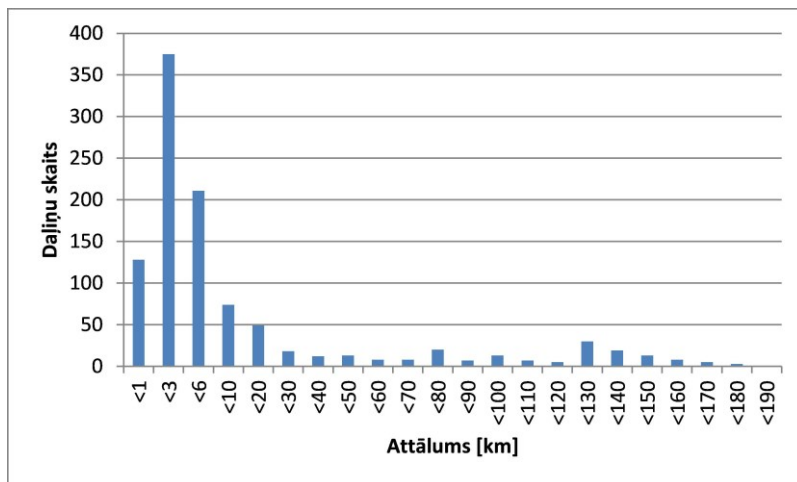
Tomēr eksperimenta rezultāti bija pilnīgi negaidīti (skat. 1f. att. F. pielikumā):

- daļa no atmosfēras nokrišņu pazemes ūdens avotiem atrodas ļoti tālu no Iecavas upes sateces apgabala
- (Vidzemē un Latgalē); nedaudz avotu ir D2prn horizontā (43 no 1027);
- ūdens daļiņas migrē arī dziļākajos D2brt un D2ar ūdens horizontos un sasniedz Iecavas upi.

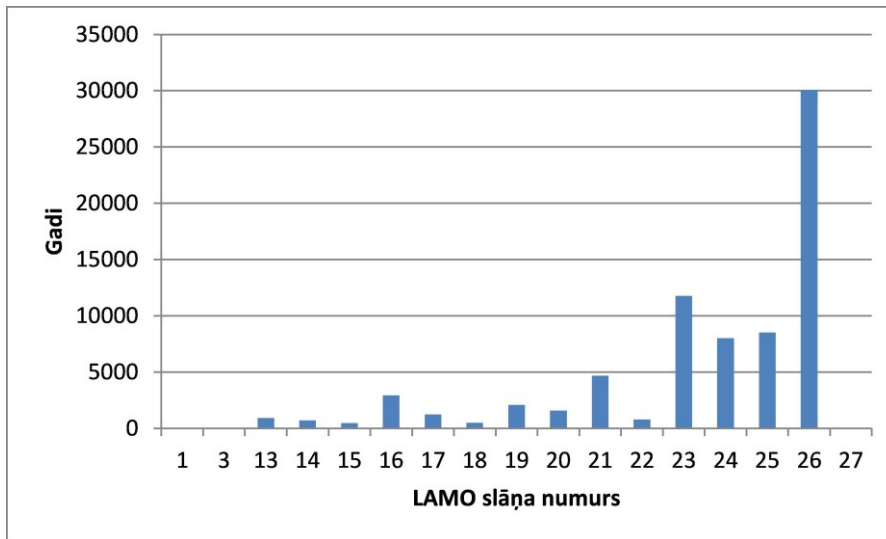
Pirmajā rezultātu analīzes etapā tika veikta daļiņu trajektoriju parametru statistiska novērtēšana;

- sakarība starp daļiņu skaitu un to veikto attālumu dota 12. att.;
- 13. att. parāda maksimālo daļiņu kustības laiku LAMO slāņos;
- ūdens daļiņu skaits, kuras atradušās LAMO ūdens horizontos, dots 14. att.

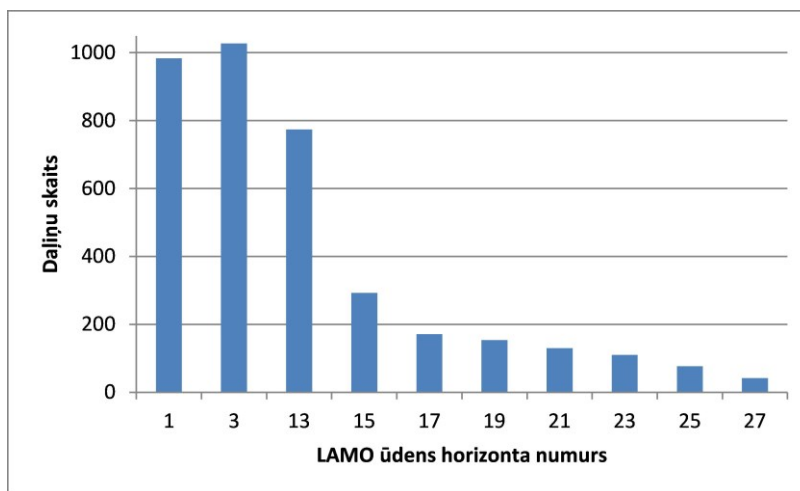




12. att. Ūdens daļiņu skaits un veiktais attālums

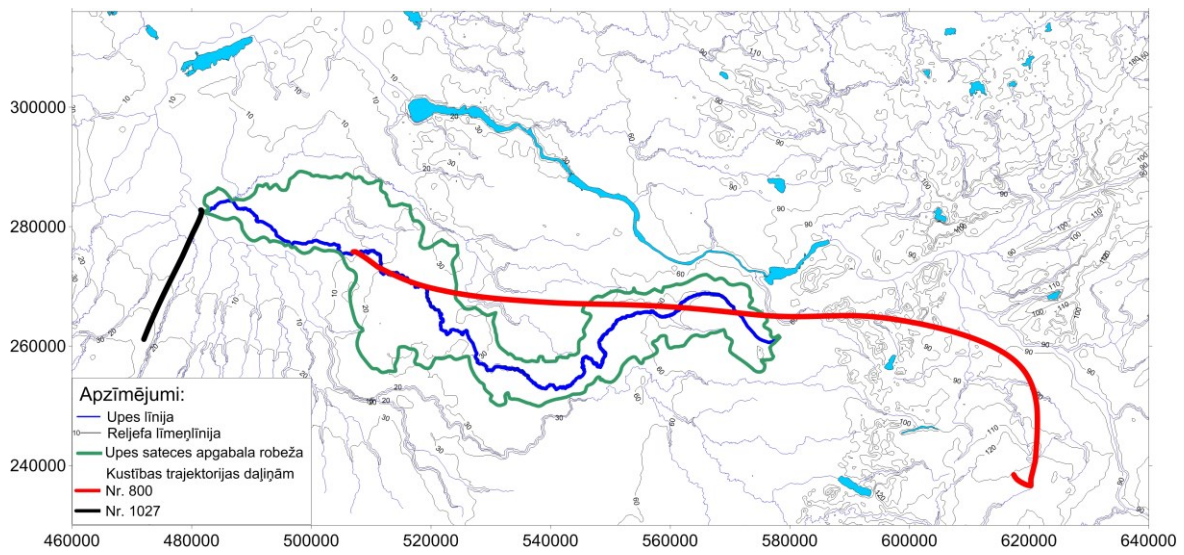


13. att. Maksimālais ūdens daļiņu kustības laiks LAMO plāknēs

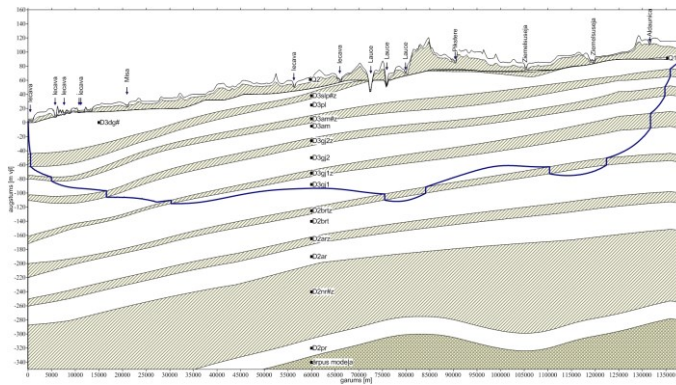


14. att. Ūdens daļiņu skaits, kuras kuras šķērsojušas LAMO ūdens horizontus

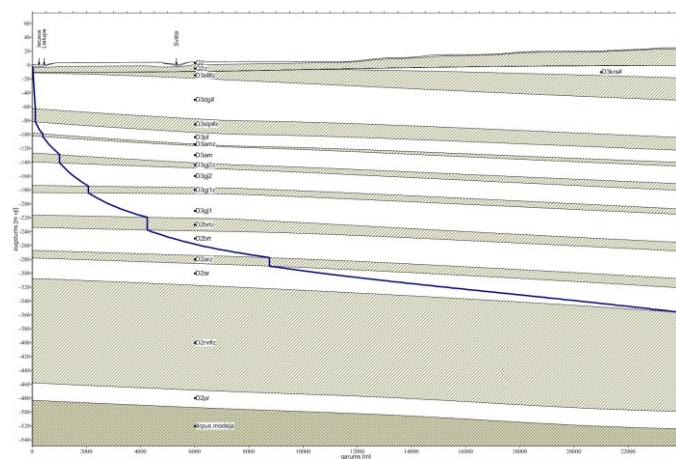




a) Daļiņu Nr. 800 un Nr.1027 kustības trajektorijas  $xy$  - projekcijā



b) Daļiņas Nr. 800 trajektorijas  $lz$  - projekcija



c) Daļiņas Nr.1027  $lz$  – projekcija

15. att. Ūdens daļiņu Nr. 800 un Nr. 1024 kustības trajektoriju  $xy$  un  $lz$  projekcijas;  $lz$  - projekcija ir ūdens daļiņas kustība gar tās trajektorijas vertikālo griezumumu.

No 12. att. var secināt, ka daļiņu ar garām trajektorijām nav daudz. Daļiņu skaita maksimums atbilst attālumam 3km.

Kā liecina 13. att., visilgāk (30000 gadus) daļiņas uzturas biežajā D2nr sprostslnā (nr. 26). Arī dziļajos slāņos D2brt un D2ar daļiņas migrē ilgi.

No 14. att. var konstatēt, ka gandrīz visas daļiņas ir bijušas Q2 horizontā (nr. 3.). Pirmā un 27. –tā slāņu daļiņu summa arī ir 1027, jo visas no daļiņām sasniedz savu mērķi (avotu). Daudzas no daļiņām ir pārvietojušās D3dg# pamatiežu horizontā (nr. 13.), jo tas novietots zem Q2 horizonta (11. att.).

Divu daļiņu Nr. 800 un Nr. 1027 trajektorijas grafiski analizētas 15. att. Daļiņa Nr. 800 atbilst lietus ūdens gadījumam un nāk no Latgales (ceļošanas laiks 8015 gadi). Daļiņa Nr. 1027 nāk no D2prn horizonta (ceļošanas laiks 15353 gadi)

Daļiņas Nr. 800 trajektorijas  $xy$ - projekcija ir izliekta līnija (15. att. a)). Sākumā daļiņa virzās uz ziemeļiem un vēlāk tās trajektorija iet zem Iecavas upes sateces apgabala. No daļiņas upes trajektorijas  $lz$  – projekcijas (15. att. b)) rakstura var secināt, ka tās sākuma posmā (kustībā uz ziemeļiem) tā relatīvi ātri sasniedz D2ar ūdens horizontu, divreiz šķērso D2brtz sprostslnāni un augšupejošas plūsmas ietekmē sasniedz Iecavas upi tās ietekas rajonā.

Daļiņas Nr. 1027 trajektorijas  $xy$ - projekcija ir taisne (15. att. a)) un tās garums nav liels. Daļiņas trajektorijas  $lz$  – projekcija liecina, ka pēc D2nr sprostslnāņa šķērsošanas, daļiņa pakāpeniski tuvojas D3dg# horizontam un sasniedz Iecavas upi tās ietekas tuvumā.

Lai izprastu daļiņu trajektoriju īpatnības, nepieciešama papildus analīze, kurā tiek ņemti vērā pazemes ūdens līmeņu un infiltrāciju plūsmu sadalījumi ūdens horizontos un vertikālajos griezumos.

Lai varētu grafiski analizēt 1027 daļiņu trajektoriju kopumu, kurš attēlots 1f. att., tika veikta visu trajektoriju sadalīšana septiņās grupās ievērojot to kustības laikus (9. tabula).

9. tabula

Ūdens daļiņu trajektoriju grupas

Grupas Nr.	Laiks (gadi)	Trajektoriju skaits
1	0-25	259
2	0 >25 → 100	295
3	0 >100 → 400	198
4	0 >400 → 1600	68
5	0 >1600 → 6400	84
6	0 >6400 → 128000	86
7	0 >128000 → 35530	37
		Kopā 1027

Katras grupas trajektoriju  $xy$  un  $xz$  projekcijas ir redzamas 2f. – 8f. att. F. pielikumā. No šiem attēliem var secināt, ka 1.-4. grupās trajektoriju  $xy$  – projekcijas atrodas upes sateces apgabalā. No trajektoriju  $xz$  -projekcijām var konstatēt, ka lielākiem ceļošanas laikiem raksturīga trajektoriju dziļuma pieaugšana (daļiņas “grimst” un “uzpeld” sateces apgabala robežās). Iespējams, ka tāpēc pazemes plūsmas  $q_{botin}$  un  $q_{botout}$  Q slānī ir praktiski vienādas (8. tabula).

Grupām 5., 6., un 7. pieteces avoti atrodas tālu no upes sateces apgabala (6f., 7f., 8f. att.). Daļiņu trajektoriju  $xz$  – projekcijas liecina, ka tās lielus attālumus pārvar dziļajos ūdens

horizontos D3g1, D2brt, D2ar. Iespējams, ka tā veidojas pietece caur robežu pamatiežos (8. tabula).

Informāciju par 5., 6., 7. tipa grupu trajektoriju eksistenci var iegūt, ja MODPATH izmanto reģionāla tipa HM (kā LAMO). Apskatītie skaitliskā eksperimenta rezultāti ir iegūti, ja viena ūdens daļiņa ir ievietota bloka ( $h \times h \times m$ ) centrā. Eksperimentu rezultāts ir cits, ja daļiņas novietojums blokā izmainās (bloka apakša vai augša). Būtu jānoskaidro, kā rezultātus ietekmē daļiņu grupas izmantošana blokā. Šāda tipa eksperimentus varēs īstenot ar MODPATH versiju 6, kurai ir definēta daļiņu grupas pazīme [26].

Izmantojot MODPATH, var iegūt jaunas zināšanas par pazemes plūsmām. Piemēram, darbā [27] aprakstīti ļoti nozīmīgi rezultāti par ģeoķīmiskiem procesiem, ja dienvidaustrumu Lietuvas HM dati tika lietoti MODPATH vadībai.

### **7. Piezīmes par E. pielikumu (filtrācijas koeficientu karšu iegūšanas piemērs D3pl horizontam)**

Limitēto urbumu novietojums īpatnējam debitam  $\gamma$  dots 1e. att. Urbumu skaits 1295; atlases intervāls  $4 > \gamma > 0.2$ ; urbumi nav vienmērīgi izvietoti D3pl  $m > 0$  apgabalā. Pēc urbumu atlases etapa saglabāti 374 urbumi (2e. att.), kuru dati tika lietoti  $k$ -kartes iegūšanai.

Interpolējot 2e. att. datus, iegūst īpatnējā debita  $\gamma$  vērtības visos LAMO režģa mezglos (3e. att.).

Pēc korekcijas matricas  $C$  lietošanas, no 3e. att. iegūst 4e. att. karti  $m > 0$  apgabalam; Korekcijas matricas  $C$  izolīniju sadalījums dots 5e. att;  $(c_{cor})_{vid} = 0.91$ .

Filtrācijas koeficientu izolīniju sadalījums dots 6e. att. Šeit nav redzama Daugavas upes iegrauzuma ietekme, jo lietota  $m_0$ -karte bez iegrauzuma pamatiežos.

$T$  sadalījums D3pl horizontā dots 7e. att. Šeit parādās Daugavas iegrauzuma ietekme, jo  $T$  aprēķināts, ievērojot reālo  $m$ -karti D3pl horizontā.

### **8. Piezīmes par G. un H. pielikumiem (upju un ezeru saraksts)**

Salīdzinot ar pārskatā [6] ievietotajiem upju un ezeru sarakstiem, veikti šādi papildinājumi:

- abiem sarakstiem pievienota papildus kolona  $C$ , kura paredzēta upes vai ezera saites ar HM korekcijas reģistrācijai: ja  $C=1$  –saite nav mainīta;  $C > 1$  vai  $C < 1$  saite mainīta  $1/C$  reizes;
- upju sarakstā doti upes ietekas un iztekas augstumi;
- upes vai ezera indekss ļauj identificēt upi vai ezeru modeli.

### **9. LAMO pilnveidošana un izmantošana**

Īstenojot Valsts Pētījumu programmu EVIDEnT, no 2016.-2017. gadam turpināsies LAMO pilnveidošanas process. Paredzēti šādi galvenie pasākumi:

- izstrādāt programmatūras rīku, kurš dotu iespēju jebkurā upē noteikt ne tikai tās pazemes pietece plūsmu, bet arī tās sastāvu (no  $Q$  vai no pamatiežiem, iežu kodus utt.); šie dati jau tiek glabāti LAMO, jānodrošina to apstrāde un sagrupēšana;
- veikt ezeru pazemes pietece plūsmu regulēšanu;
- izmantojot GV rīku MT3D, ņemt vērā pazemes ūdeņu dabīgo un arī antropogēno mineralizāciju;

- lietojot MODPATH un MT3D rīkus, veikt dabas procesu pētīšanu, piemēram, kāda ir to avotu intensitāte, kuri veido upju un ezeru pazemes pieteci? Iecavas upei 2015. gadā tika atrasts šo avotu novietojums, bet ne intensitāte.

Ir nepieciešams sākt LAMO4 pielietot praktisku un pētniecisku problēmu risināšanā, jo tā tiks nodrošināta tā datu plašāka izmantošana un novērsti iespējamie LAMO4 trūkumi.

## 9. Secinājumi

Izveidota LAMO4 versija, kurai samazināts režģa plaknes solis no 500 metriem līdz 250 metriem, kā arī upju pazemes pieteces plūsmas saskaņotas ar upju caurteces mērījumiem. Uzlabota modeļa filtrācijas koeficientu digitālo karšu kvalitāte. Veikts skaitliskais eksperiments nolūkā atrast Iecavas upes pazemes pieteces avotus.

Istenojot Valsts Pētījumu programmu EVIDEnT, turpināsies LAMO pilnveidošana un adaptācija praktisku un teorētisku problēmu risināšanai Latvijas pazemes ūdens objektiem. LAMO4 nodots aprobācijai LVĢMC.

## 10. Izmantotā literatūra

1. Pazemes ūdensobjektu kartēšana Gaujas/Koivas upju baseinu apgabalā. Pārskats iepirkuma līgumam Nr.62 starp Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministriju un Rīgas Tehnisko universitāti, Rīga, Janvāris, 2013, 19 lpp., 25 kartes, <http://www.emc.rtu.lv/>
2. Pazemes ūdensobjektu kartēšana Gaujas upju baseina apgabalā, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2013, 12 lpp. 49 kartes, 6 tabulas, pieejams <http://www.emc.rtu.lv/>
3. Pazemes ūdensobjektu kartēšana Daugavas upju baseina apgabalā, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2013, 12 lpp. 52 kartes, 7 tabulas, pieejams <http://www.emc.rtu.lv/>
4. Pazemes ūdensobjektu kartēšana Lielupe upju baseina apgabalā, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2013, 12 lpp. 55 kartes, 7 tabulas, pieejams <http://www.emc.rtu.lv/>
5. Pazemes ūdensobjektu kartēšana Ventas upju baseina apgabalā, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2013, 12 lpp. 57 kartes, 7 tabulas, pieejams <http://www.emc.rtu.lv/>
6. Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa pilnveidošana, Pārskats līgumam 2014/15 starp LVĢMC un RTU, Rīga. 2014.g. novembris, 10 lpp., 14 att., 12 tab. pieejams <http://www.emc.rtu.lv/>
7. Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2000/60/EK (2000. gada 23. oktobris) ar ko izveido sistēmu Kopienas rīcībai ūdens resursu politikas jomā (Ūdens struktūrdirektīva)
8. Spalvins, A. and U. Nulle. 2011. Latvijas hidroģeoloģiskais modelis pazemes dzeramā ūdens krājumu pārvaldīšanai un atvēršanai // Scientific Journal of Riga Technical University in series "Computer Science". Boundary Field Problems and Computer Simulation , vol. 5, 49. (53) –th issue. Riga: RTU, 7-13 lpp, <http://www.emc.rtu.lv/>
9. Environmental Simulations, Inc. *Groundwater Vistas. Version 6*, Guide to using, 2011
10. W. Harbaugh, *MODFLOW-2005, U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model: the ground-water flow process*, chap 16, book 6, US Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, USGS, Reston, VA
11. Pollok D. W. 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
12. Zheng C. (1999) 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
13. Spalvins, J. Slangens, I. Lace, K. Krauklis, O. Aleksans, N. Levina, (2012), Methods and software tools used to designate geometry for regional hydrogeological model of Latvia / *Scientific Journal*

- of Riga Technical University Boundary Field Problems and Computer Simulation, 54-th issue, Riga, RTU, 2012, p. 13-19, ISSN 1407 – 7493, <http://www.emc.rtu.lv/>
14. Slangens, J. and K. Krauklis. 2011. Creating of digital relief map for regional hydrogeological model of Latvia, *Scientific Journal of Riga Technical University in series "Computer Science". Boundary Field Problems and Computer Simulation* , vol. 5, 49. (53) –th issue. Riga: RTU 21-25 lpp
  15. J. Walkenback, *Excel-7 Bible*, Wiley Publishing, Inc. Indeanopolis, Indian, 2007, p. 808
  16. Golden Software, Inc., *SURFER-13 for Windows*, Users manual, Guide to Using, 2015
  17. ESRI “ArcView overview” October, 2010 [Online] <http://www.esri.com/software/arcview/index.html>
  18. Spalviņš A., Slangens J. Improved method for controlling the geological data interpolation program. *Scientific Proc. of Riga Technical University in series "Computer Science". Boundary Field Problems and Computer Simulation*, 5. sēr., (49) sēj. Rīga: RTU, 2007
  19. A. Spalvins, J. Slangens, I. Lace, K. Krauklis, and O. Aleksans, Efficient Methods Used to Create Hydrogeological Model of Latvia. In *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S)*, Praise Worthy Prize, vol. 6, Nr. 5, Okt. 2013, 1718-1726
  20. И. Дзилна. 1970 Ресурсы, состав и динамика подземных вод средней Прибалтики, изд. Зинатне, Рига, стр. 179
  21. Гидрогеология СССР., том XXXI, Латвийская ССР., I часть. изд. Недра, Москва, 1967, стр. 200
  22. A. Spalvins, J. Slangens, I. Lace, O. Aleksans, K. Krauklis, Improvement of hydrogeological models: a case study, *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S)*, Praise Worthy Prize, Naples, Italy, Vol. 8, n. 2 April 2015, pp. 266-276, <http://www.emc.rtu.lv/>
  23. Spalviņš, A., Lāce, I., Appliance of Pumping Data of Wells for Obtaining Transmissivity Distributions of Aquifers for Hydrogeological Model of Latvia, *Scientific Journal of Riga Technical University Boundary Field Problems and Computer Simulation*. 53-th issue, Riga, RTU, 2014, pp. 42-48, ISSN 2255-9132, <http://www.emc.rtu.lv/>
  24. Spalviņš, A., Šlangens, J., Aleksāns, O., Lāce, I., Krauklis, K., Geological profiles as efficient means for expounding results provided by hydrogeological model of Latvia, 14th Geo Conference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining (SGEM), 17-26 June, 2014, Bulgaria, Conference Proceedings Vol. II, Published by STEF92 Technology Ltd., 2014, pp. 401-408, ISBN 978-619-7105-08-7, ISSN 1314-2704, DOI 10.5593/sgem2014B12
  25. De Barry, Paul A., *Watersheds: processes assessment and management*. Willey and Sons Inc. Hoboken, New Jersey, 2004, p. 700.
  26. D. W. Pollock, “*User Guide for MODPATH Version 6—A Particle-Tracking Model for MODFLOW*,” 2012 [Online]. Available: [http://pubs.usgs.gov/tm/6a41/pdf/TM\\_6A\\_41.pdf](http://pubs.usgs.gov/tm/6a41/pdf/TM_6A_41.pdf), [Accessed Nov. 17, 2015].
  27. R. Mokrik, V. Juodkazis, A. Stuopis, and J. Mazeika, Isotope geochemistry and modelling of the multi-aquifer system in the eastern part of Lithuania. In *Hydrogeology journal.*, Vol. 22, 2014, pp. 925-941