

ESF projekts

“Starpnozaru zinātnieku grupas un modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem”

Baltijas artēziskā baseina hidroģeoloģiskā modeļa versija V1: attīstība otrajā projekta gadā

Juris Seņņikovs

Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorija
Latvijas Universitāte





Prezentācijas saturs

1. Modeļu sistēmas koncepcija
2. Ģeometriskais modelis
3. Modelēšanas uzdevuma nostādne
4. Modeļa kalibrācija
5. Rezultātu piemēri
6. Nākotnes perspektīva

Ievads - pazemes ūdeņu modelēšana

Modelis – "Objekts, ko veido, lai aizstātu pētījamo, izzināmo objektu, un kam ar pētījamo, izzināmo objektu ir noteikta līdzība."

Modelēšana – "Pētīšanas, izziņas metode, kas balstās uz modeļu izmantošanu."

[Latviešu literārās valodas vārdnīca. 1.–8. Rīga, Zinātne, 1972.–1996.]

Matemātiskais modelis – "Procesu, sistēmu vai to darbības attēlošana ar matemātisku izteiksmju palīdzību." [LZA TK Informācijas tehnoloģijas, telekomunikācijas un elektronikas terminoloģijas apakškomisijas apstiprinātie termini]

Viens no projekta mērķiem ir izveidot Baltijas artēziskā baseina matemātisko modeli.

Modelim ir jāatbilst:

- 1.BAB pazemes uzbūve
- 2.BAB pazemes ūdens plūsmas
- 3.BAB pazemes ūdenī esošo vielu plūsmas un to transformāciju

Modelis tiek veidots kā datormodelis. Paralēli modeļa izveidei, tiek veidota programmatūra modeļa ieejas datu apstrādei un aprēķina datu vizualizācijai (HiFiGeo).

Visu modeļa funkcionēšanai nepieciešamo objektu (dati, programmas, vienādojumi,...) kopu saucim par **modeļu sistēmu**.

Modeļsistēmas sastāvdaļas

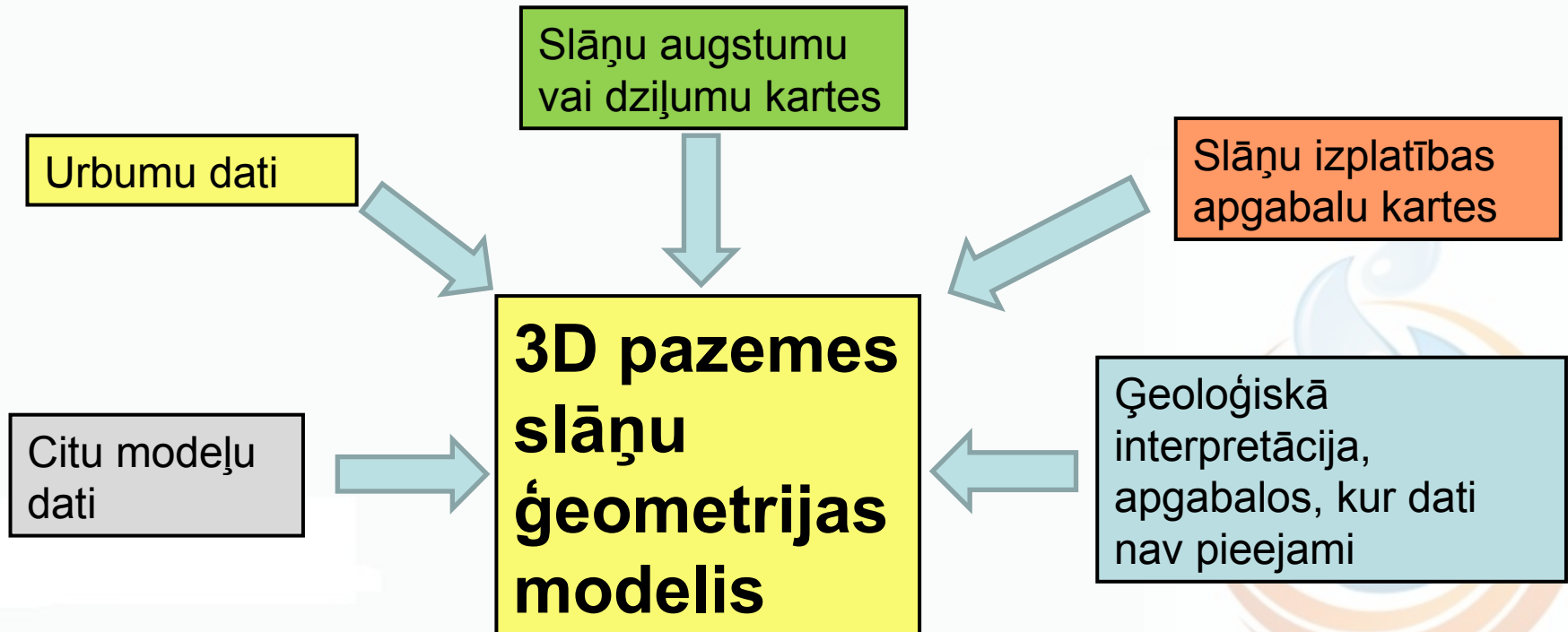
- **Ģeometriskais** modelis
- Pazemes ūdens **filtrācijas** modelis
- Vielu pārneses un transformāciju (“**ķīmijas**”) modelis
- **Hidroloģiskais** modelis
- **Dati** un to organizācija
- **Programmatūra** – datu apstrāde, preprocesors, rezultātu vizualizācija
- Modeļu **kalibrācijas** metodes
- Aprēķinu **varianti**

Ģeoloģiskās struktūras ģeometriskā 3D modeļa izveide

Ģeometriskais modelis izveidots, sadalot pazemi **slāņos**. Ģeoloģiskais slānis ir “nogulumiežu masa ar samērā vienmērīgu biezumu, parasti horizontālu novietojumu zemes garozā un plašu horizontālu izplatību”.

Slāņu [augšējās un apakšējās] robežas sauc par virsmām.

Katra slāņa ģeometrijas izveidei tiek pielietoti vairāki datu avoti, atkarībā no datu esamības, pieejamības projekta ietvaros, izmantošanas lietderības utml.



Ieejas dati ģeometrijas modelēšanai - V1 versija

V0

- Latvijas urbumu datubāze
- Ģeoloģisko slāņu virsmu izolīniju kartes Latvijā un Lietuvā
- Lūzumu dati par Latvijas teritoriju
- Ģeoloģisko slāņu izplatības robežas Latvijā un Lietuvā
- Igaunijas hidroģeoloģiskais modelis
- Ģeoloģisko griezumu informācija, ārpus Baltijas valstīm
- Virsmas topogrāfijas un jūras dziļumu dati

V1, papildus

- Igaunijas ģeoloģijas dienesta urbumu datubāze
- Latvijas kvartāra urbumu dati.
- Aprakto ieleju dati Igaunijā un Latvijā – precīzākai zemkvartāra virsmas izveidei.
- Lūzumu dati par Igaunijas un Lietuvas teritoriju

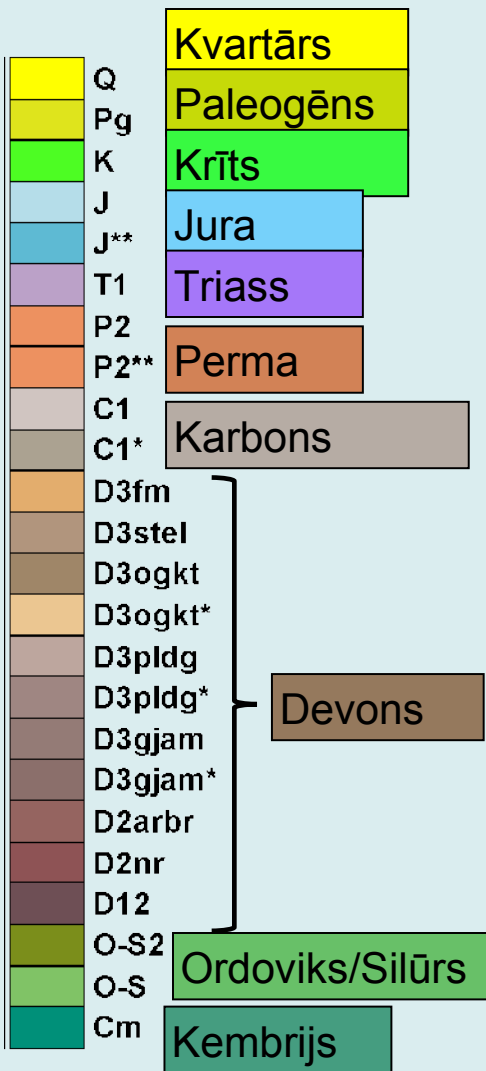
Ģeometriskās struktūra – V1 versija

- Struktūra veidota ņemot vērā ģeoloģiskās attīstības likumsakarības, slāņus ģenerējot noteiktā ģeoloģiskā secībā pēc slāņu biezuma datiem no urbumu informācijas, pārmantojot pagulošās virsmas reljefu un iegūstot ģeoloģiski korektu slāņu biezumu sadalījumu.
- Par atskaites virsmām tiek izmantotas publicētās struktūrkartes kristāliskajam pamatklintājam, ordovika virsmai, devona Pērnavas un Amatas virsmām, pārņemot visā modeļa griezumā pārvietojuma amplitūdas no šajās virsmās izsekojamajiem lūzumiem.
- Modeļa struktūrā iekļautas četras rekonstruētas reģionālās erozijas virsmas (Augšējā ordovika, devona, perma un kvartāra), kas ierobežo pagulošo slāņu izplatību.
- Urbumu atlase – izmanto tikai tos urbumus, kuru griezumā definēts pilns slāņa biezums, un neapvienoti stratigrāfiskie indeksi.
- No visiem urbumiem Latvijas un Igaunijas teritorijā identificēti 126 urbumi ar nepareizu novietojumu, 217 urbumi ar kļūdainu ģeoloģiskā griezuma informāciju, kas izņemti no slāņu ģenerācijai izmantotās datu kopas.
- Tāpat tika identificēti 2208 urbumi apraktajās ielejās, kas netiek ņemti vērā kvartāra erozijas virsmas ģenerācijā un to slāņu ģenerācijā, kuri urbumu vertikālajā griezumā seko uzreiz zem kvartāra slāņa, veidojot nepamatotas slāņu virsmas atzīmju variācijas.

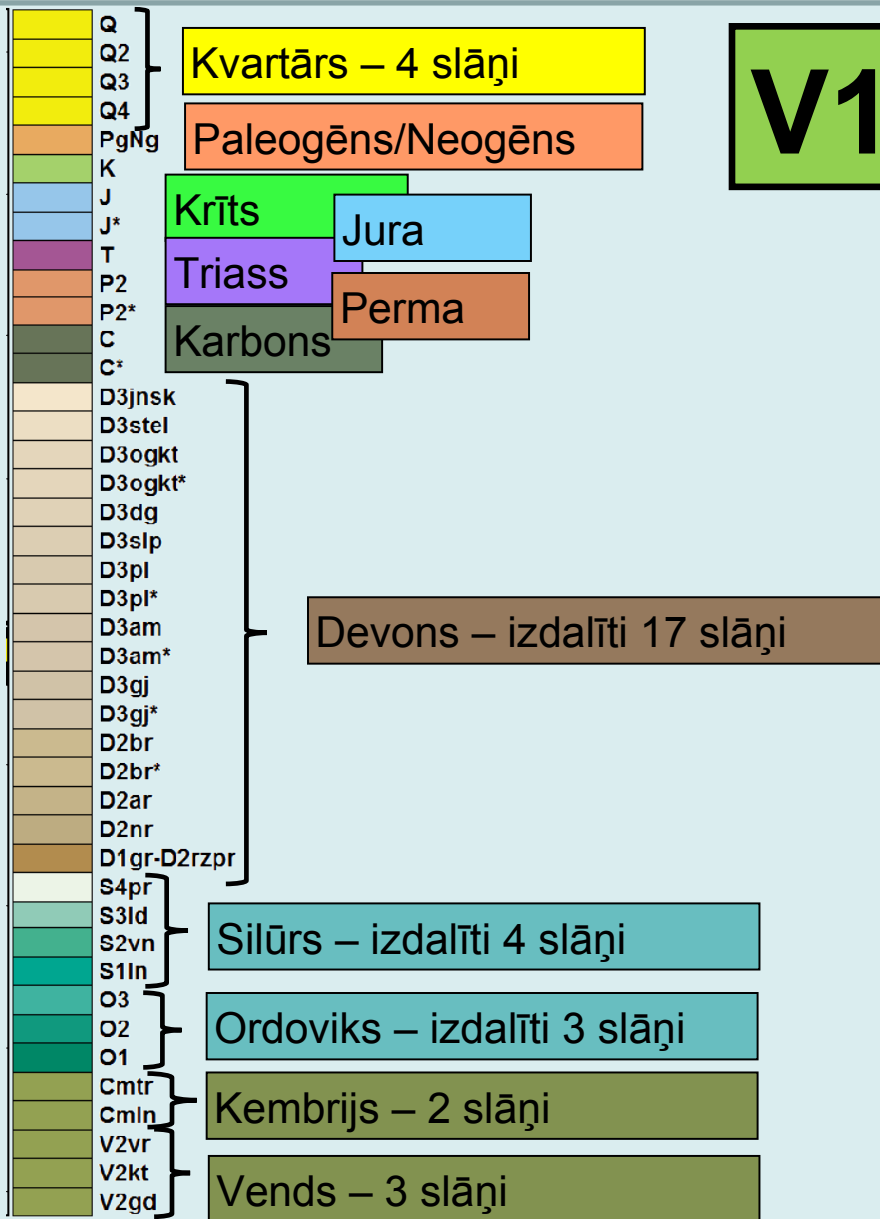
Ģeoloģisko slāņu stratifikācija – V1 versija

V0

24 slāņi

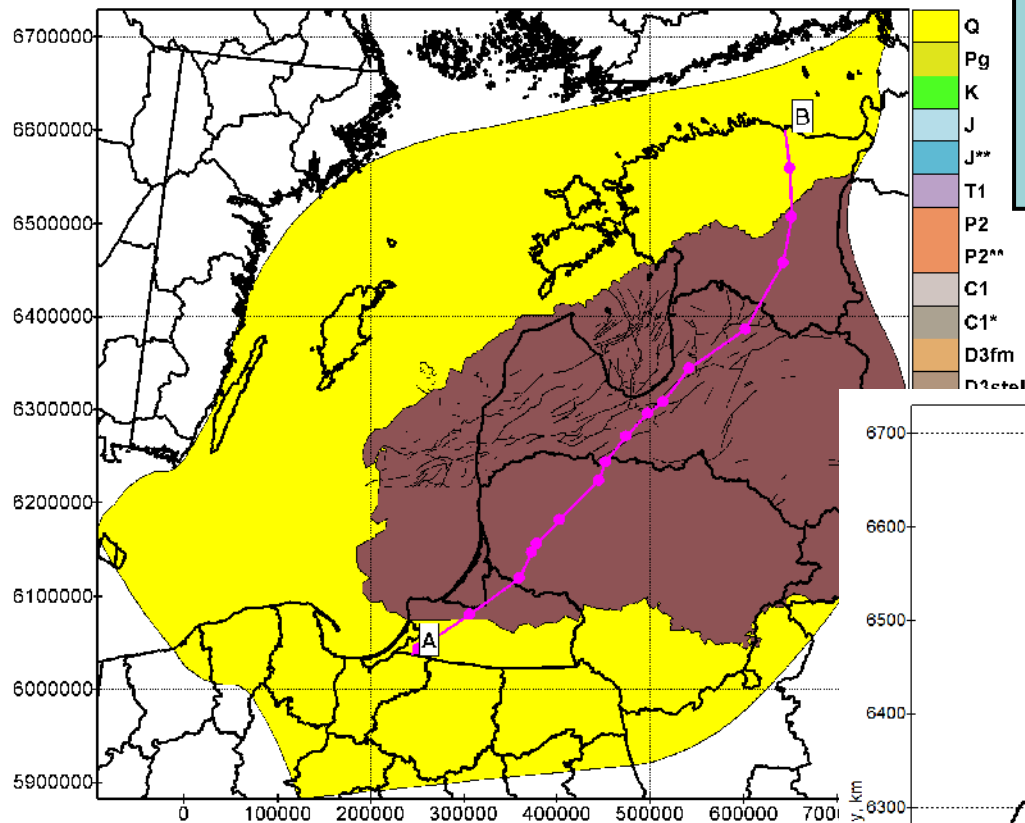


42 slāņi



V1

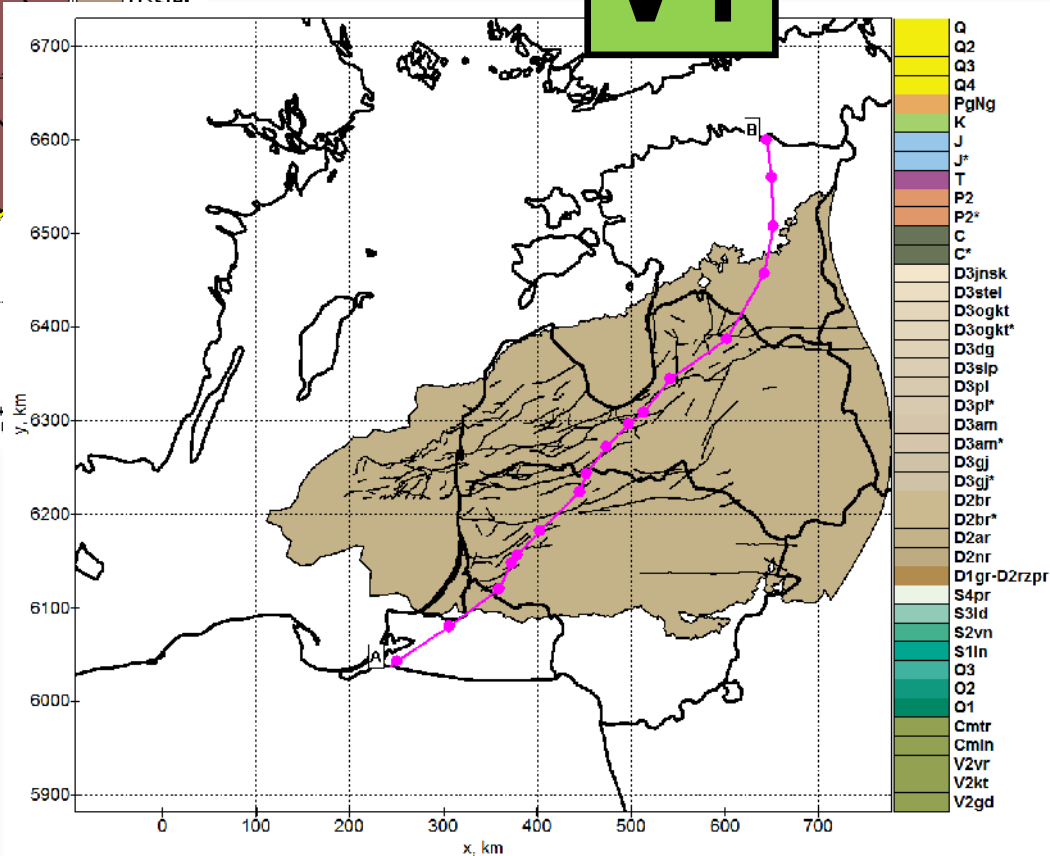
Ģeometriskā struktūra – V1 versija



V0

D2ar-br izplatības apabals (V0)
 D2ar izplatības apabals (V1)
 Griezuma A-B līnija

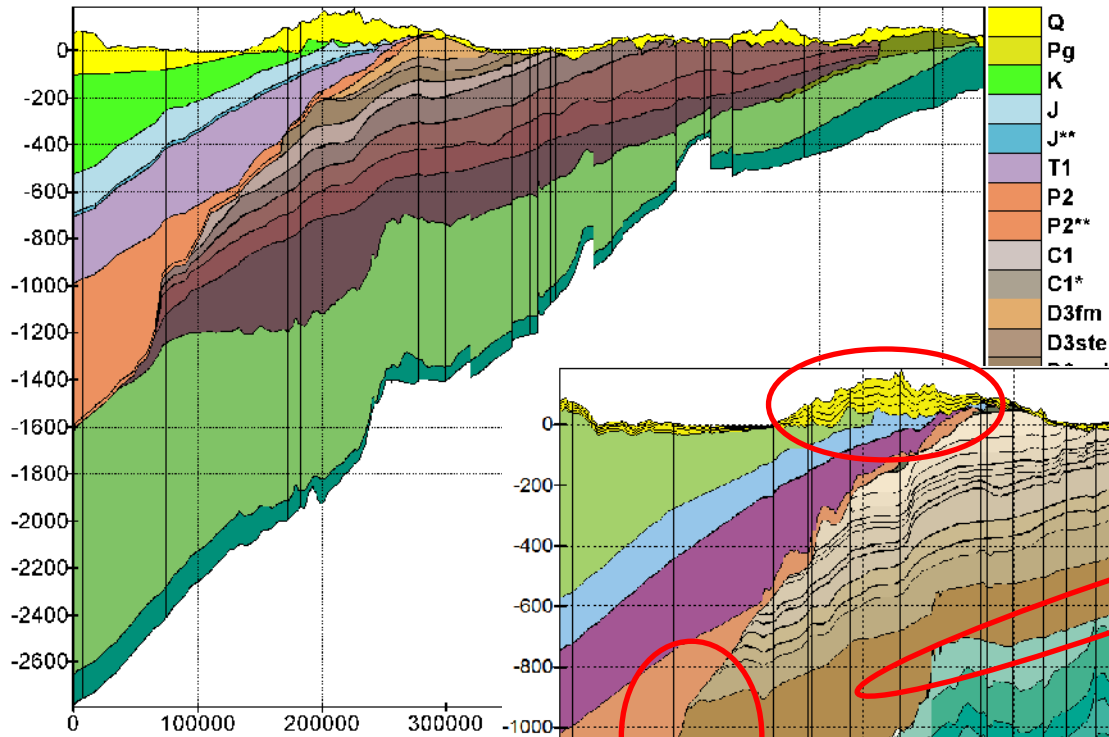
V1



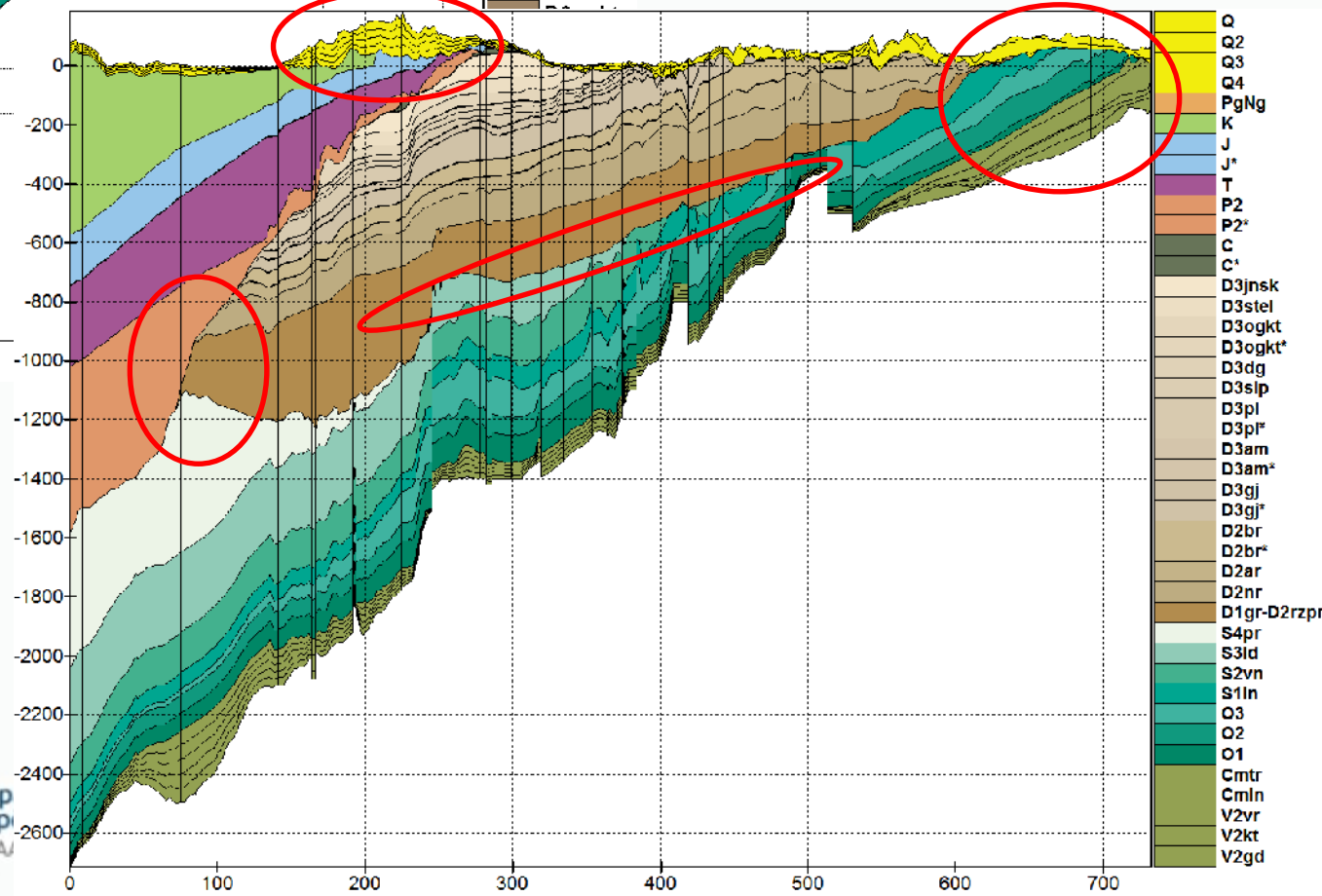
Ģeometriskā struktūra – V1 versija

Griezums pa līniju A-B

V1

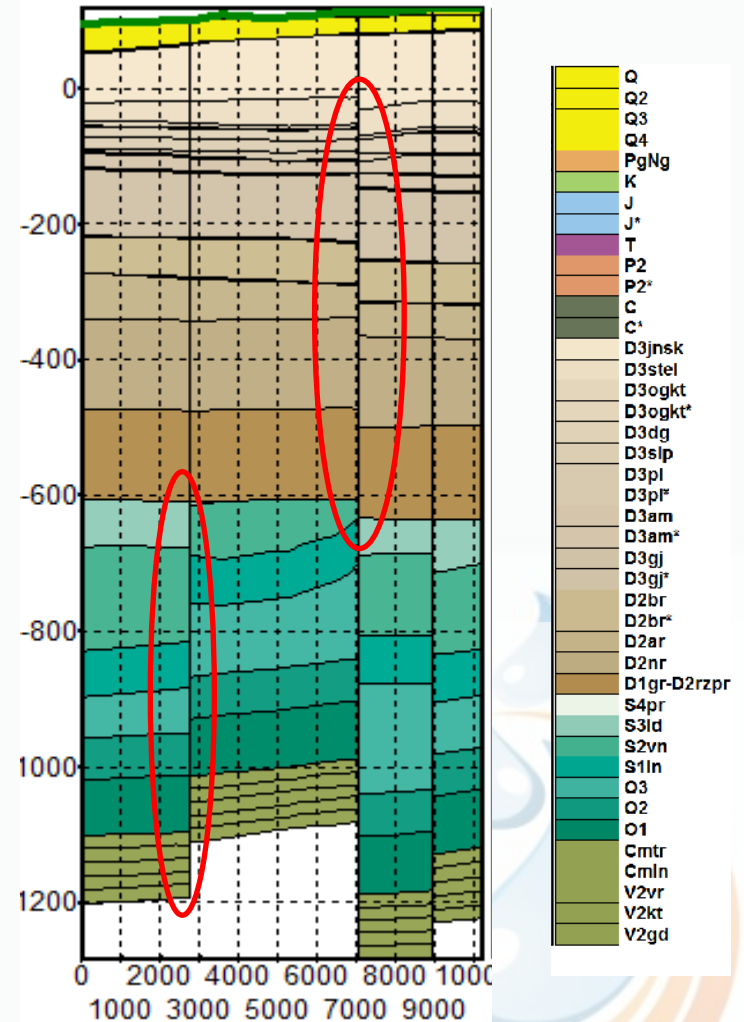


V0



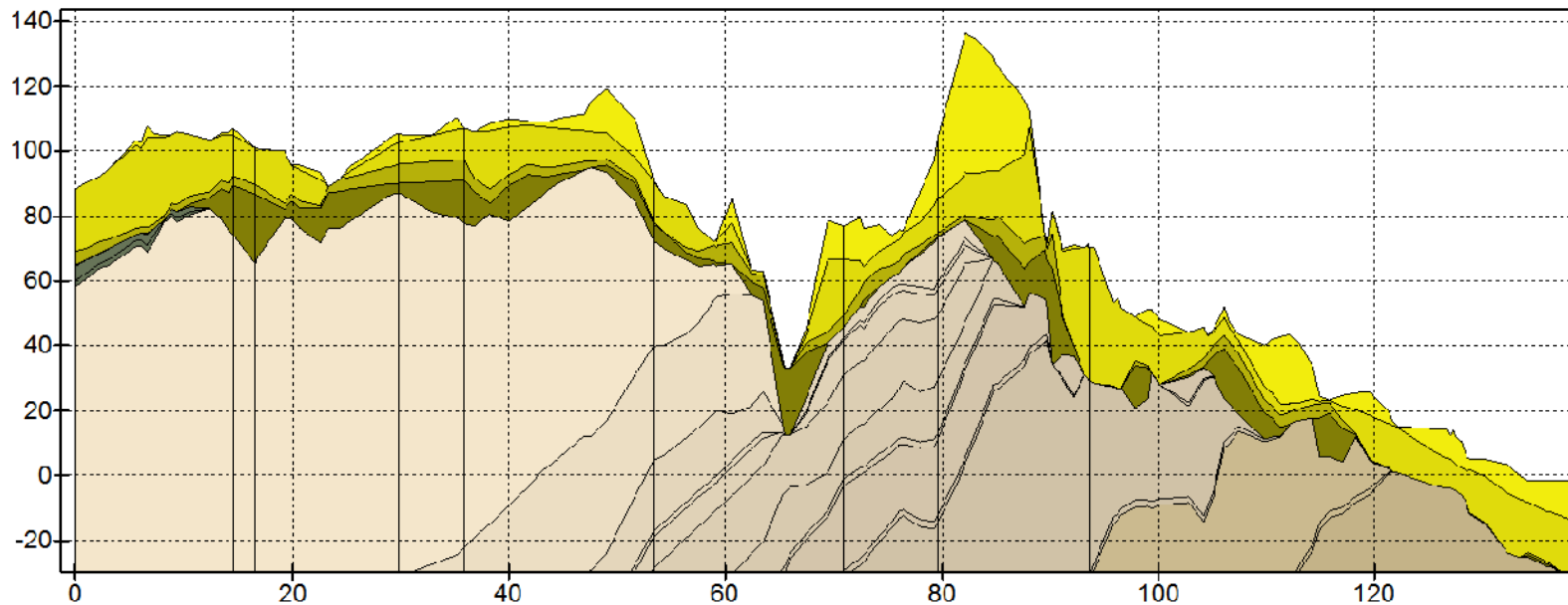
Ģeometriskās struktūra – lūzumi

- Modeļa struktūrā iekļauti lūzumi visā modeļa griezumā Latvijas, Lietuvas un daļēji Igaunijas teritorijā.
- Pārvietojuma vērtībām gar lūzumiem par pamatu ņemta informācija no publicētajām struktūrkartēm, kas ar slāņu biezumu interpolāciju pārņemtas augstāk iegulošajiem slāņiem.
- Pamatklintāja pārvietojuma vērtības slāņiem no PrAr līdz O2.
- Ordovika virsmas pārvietojuma vērtības slāņiem no O2 līdz S4pr.
- Pērnavas virsmas pārvietojuma vērtības D1gr-D2rzpr līdz D3br.
- Amatas virsmas pārvietojuma vērtības no D3gj līdz D3js-sk.



Ģeometriskās struktūra – kvartāra detalizācija

- Kvartāra slāņkopā tiek atpazītas pirmās 4 virsmas kanoniskā secībā pēc litoloģijas klasēm
 1. caurlaidīgs (smilts, grants, oļi, kūdra, augsne, utml.)
 2. necaurlaidīgs (māls, morēna)
 3. caurlaidīgs (smilts)
 4. necaurlaidīgs (māls, morēna)
- Pēdējā slāņa apakšu nosaka subkvartāra virsma.
- Ģenerācijā neiekļauj urbumus apraktajās ielejās, un ģenerāciju veic reizē Igaunijai un Latvijai



Skripta valoda

V0 - M4 (Makroprocessors)

V1 - Python

- Kods viegli lasāms
- Vienkārša testēšana (debugging)
- Daudz bibliotēku (NumPy, SciPy)
- Dokumentēšana iebūvēta kodā
- Pieejami IDE



Projekta dokumentācija

```
select lturb.ns as id, lturb.x as x, lturb.y as y, lturb.z as z
from lturb
where lturb.Fbot is not null
""" ,TXTFile="Slan6Urb.xyz")
|
LN1=Lines.C_Lines()
LN1.ImportFromXYZ(xyz="Slan6Urb.xyz")
AllLines=Lines.C_Lines("BAB.RezgisBezLuzFile")
AllLines.MergeSimple(LN1)
AllLines.MergePoints(100)
AllLines.Save("BAB.LineDBFile")
AllLines.SaveLinesID("BAB.RezgisBezLuzFile")
LN1=None;AllLines=None;

Triangulate(inLineDBFile="BAB.LineDBFile",
DefaultArea=1E10,
RefinAreas=[[20, 1E8, 1], [13, 1E7, 1]],
outEdgeDBFile="EdgDBFile", outMesh="EdgDBFile")

CutMesh(EdgeDBFileName="EdgDBFile", MeshOut="PamataRezgisFile",
MeshOut="PamataRezgisFile", GroupIDList="LuzLineIDFile")
SelectMeshRegion(MeshIn="PamataRezgisFile", EdgeIDMap="EdgDBFile",
MeshOut="BABRezgisFile", MeshOut="BABRezgisFile")

##Atdala Latvijas rezģi
SelectMeshRegion(MeshIn="PamataRezgisFile", EdgeIDMap="EdgDBFile",
MeshOut="BABLA.meb", MeshOut="BABLA.meb", S
BFileName="EdgDBFile", BABRezgisBezLuzFile",
st="LVLuzLineIDFile")

rezģi
MeshIn="BAB.meb", Edg
lineID="111", MeshOut="
```

MOSYS v0 documentation » Definēto funkciju un palīgprogrammu moduļi » previous | next | modules | index

Palīgprogrammu modulis

UtilitesRun.py

Modulis, kurā modoli voidojošās palīgprogrammas tiek piolāgotas python videi.

UtilitesRun.AlphaShape(MeshIn='TestMesh.meb', MeshOut='TestMeshOut.meb', Radius='50000') [source]

Aizvāc trijstūrus ar pārāk garām malām.

Ieejas parametri:

- MeshIn="TestMesh.meb" .meb datne.
- Radius="50000" Attālumš [m], par kuru nedrīkst būt garāka kāda no trijstūra malām.

Atgriež:

- MeshOut="TestMeshOut.meb" .meb datne.

UtilitesRun.Calculate(MeshIn='Backup3\BAR22.str', HeadIn='test.p', HeadOut='test.p', TopHead='Backup3\tophead.z', Infiltration='Backup3\infiltr.ez', Extraction='Backup3\udensieguve.txt') [source]

Veic aprēķinus, izmantojot struktūras datni.

Ieejas parametri:

- MeshIn="Backup3\BAR22.str"

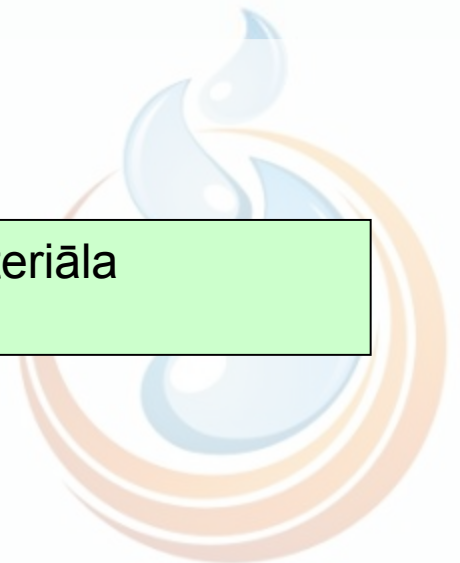
Ūdens plūsmu vienādojumi

$$\frac{\partial (n_w \rho_w)}{\partial t} = - \left(\frac{\partial (\rho_w q_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_w q_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho_w q_z)}{\partial z} \right) = - \nabla \cdot (\rho_w \vec{q})$$

$$\vec{q} = -K \nabla h$$

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h)$$

q ir filtrācijas ātrums, raksturo ūdens tilpumu, kas iziet caur materiāla šķersgriezuma laukuma vienību laika vienībā



Filtrācijas aprēķina uzdevuma nostādne

V1 versijā tiek rēķinātas stacionārās *[t.i. nostabilizējušās un ilgākā laikā nemainīgas]* filtrācijas plūsmas

Robežnosacījumi:

1. Tā kā modeļapgabals ir visa BAB teritorija, tad uz tā sānu robežām uzdodam necaurlaidības nosacījumus
2. Uz augšējās virsmas uzdodam infiltrāciju *(no reģionālo klimata modeļu datiem)*
3. Uzdodam ūdensguves urbumu vidējos debitus *(kur par tiem ir pieejami dati)*

Materiālu īpašības:

1. Kalibrācijas procesā nosakāmas, pa ģeoloģiskajiem slāņiem konstanti horizontālās un vertikālās filtrācijas koeficienti.

Aprēķinu rezultāts ir *[pjezometriskais]* ūdens līmeņa telpiskais sadalījums un *[no tā atvasināts]* filtrācijas ātruma lauks.

Filtrācijas modeļa robežnosacījumi - infiltrācija

Pazemes ūdens plūsmas lielos noslēgtos apgabalos kā Baltijas artēziskais baseins nosaka galvenokārt infiltrācija no virsmas.

Infiltrācijas uzdošanai tiek izmantoti reģionālo klimata modeļu (RKM) dati no ENSEMBLES projekta par laika periodu 1961-2010.

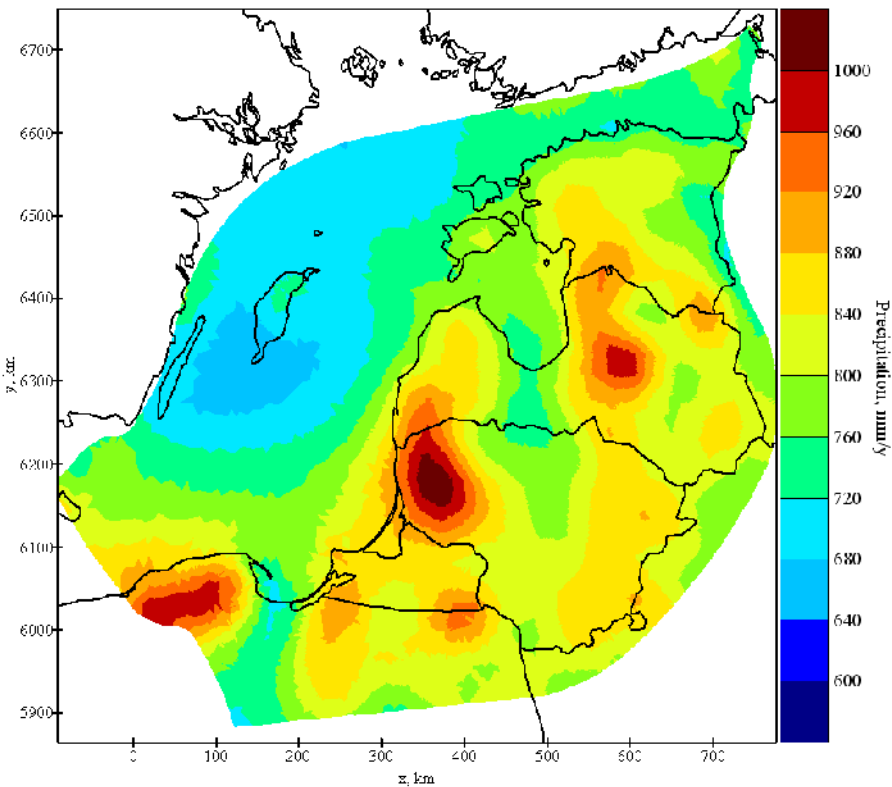
RKM datu klāstā ir pieejami ikdienas modeļaprēķini par nokrišņiem, iztvaikošanu un noteci uz režģa ar telpas soli 25 km.

Modelī tā tiek uzdots telpā mainīgs, laikā vidējots infiltrācijas sadalījums, kas ir proporcionāls modeļa notecei ar empīrisku (kalibrējamu) koeficientu.

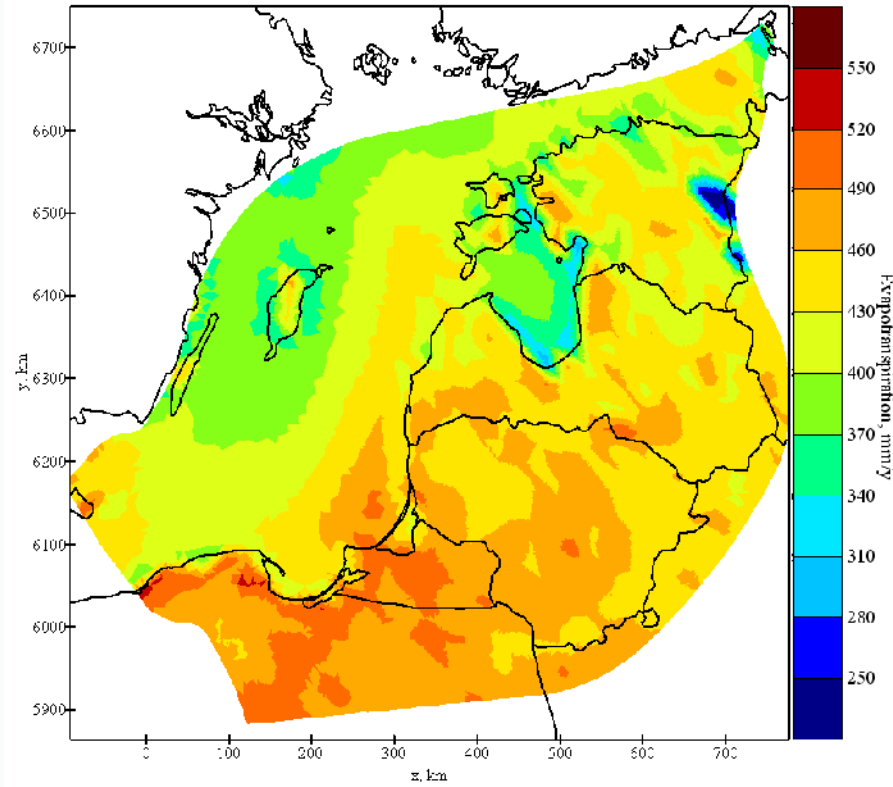
*“Infiltrācija” = “Infiltrācijas koeficients” * “RKM vidējā notece”*

“RKM vidējā notece” = “RKM vidējie nokrišņi” – “RKM vidējā iztvaikošana”

Filtrācijas modeļa robežnosacījumi - infiltrācija

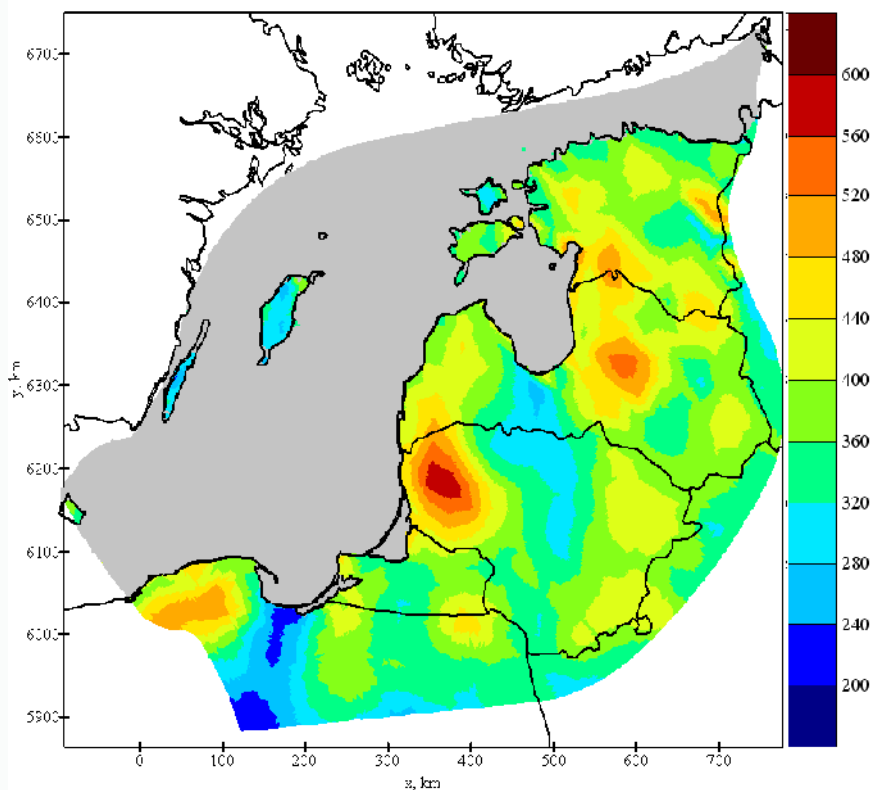


Nokrišņi, mm/gadā



Iztvaikošana, mm/gadā

Filtrācijas modeļa robežnosacījumi - infiltrācija



Noteces modulis, mm/gadā



Filtrācijas modeļa robežnosacījumi - ūdensguve

Apkopoti dati par [laikā mainīgu] ūdensieguves jaudu ($\text{m}^3/\text{diennaktī}$)

Ūdens ieguves dati:

Latvijā – LVĢMC dati

Lietuvā – Lietuvas ĢD dati

Igaunijā – Igaunijas ĢD dati

Analizējot ūdensguves grafikus laikā, tika definēti ūdensguves atšķirīgu situāciju periodi, stacionāro modeļu pozīcijas laikā

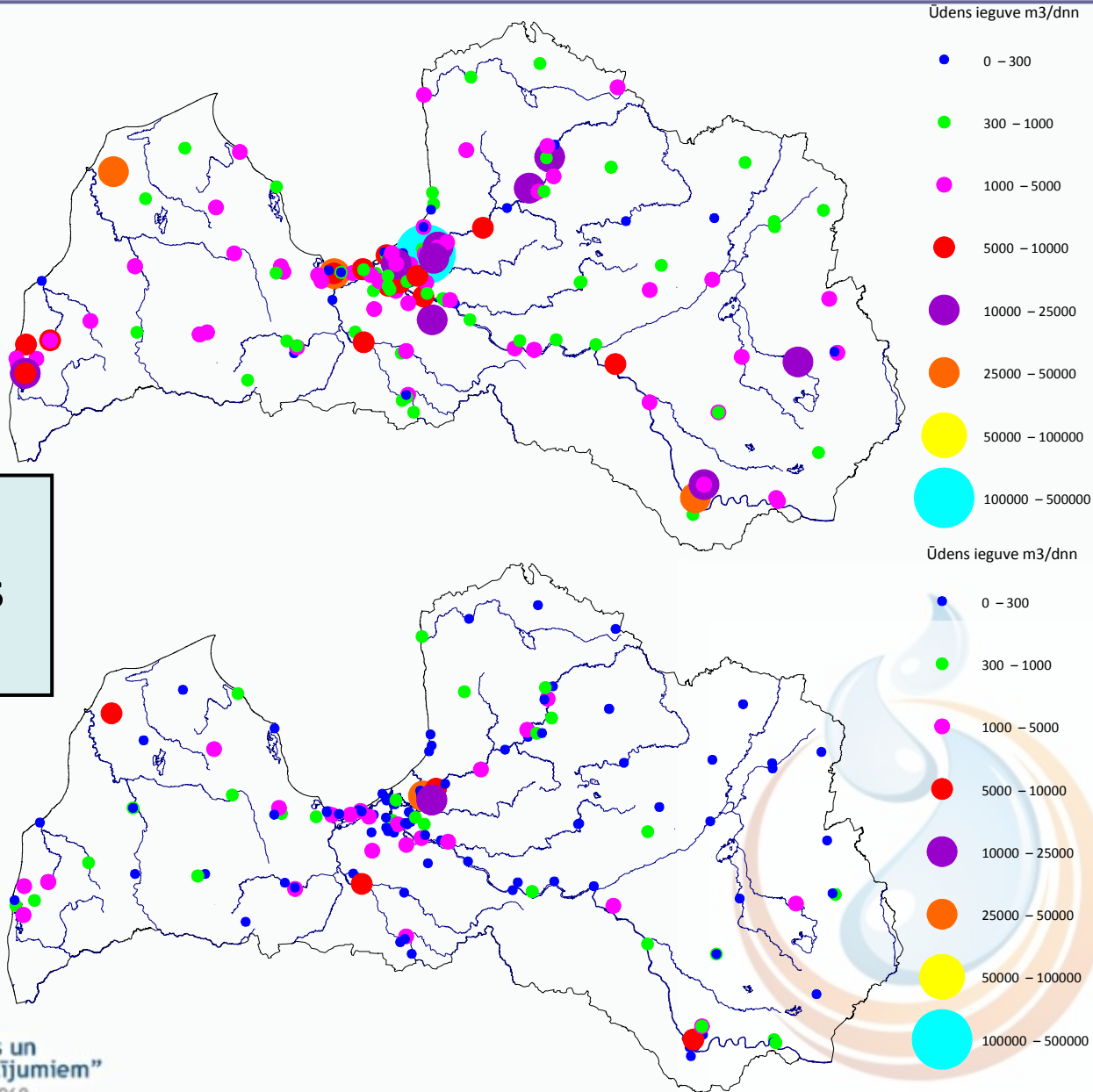
Situācijas – “ekstensīvā pirmspadomju”, “intensīvā padomju” un “racionālā mūsdienu”, nosacītie situāciju gadi, attiecīgi, 1950, 1980, 2000.

Filtrācijas modeļa robežnosacījumi - ūdensguve

1980

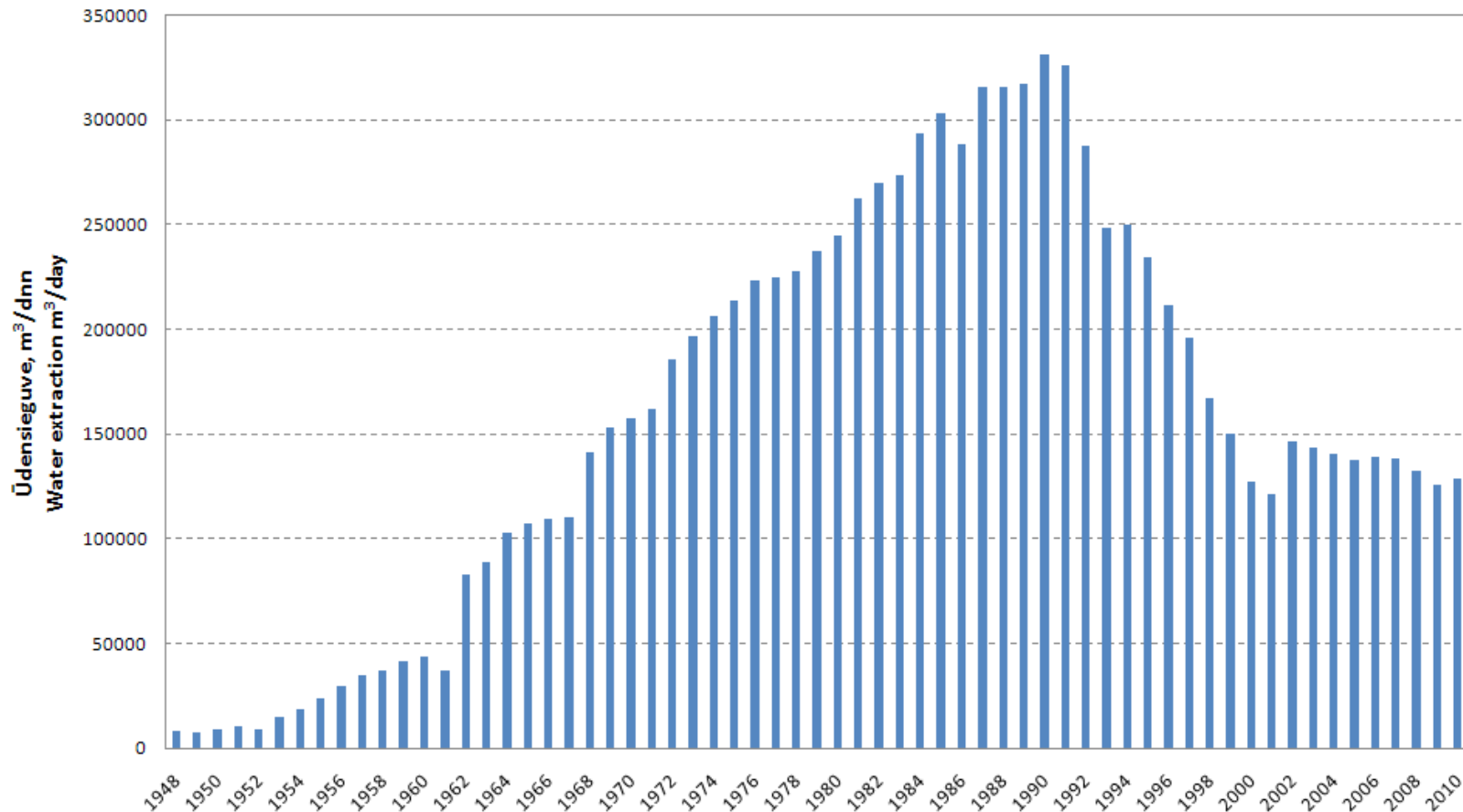
Ūdens ieguves
telpiskais sadalījums
Latvijā

2008



Filtrācijas modeļa robežnosacījumi - ūdensguve

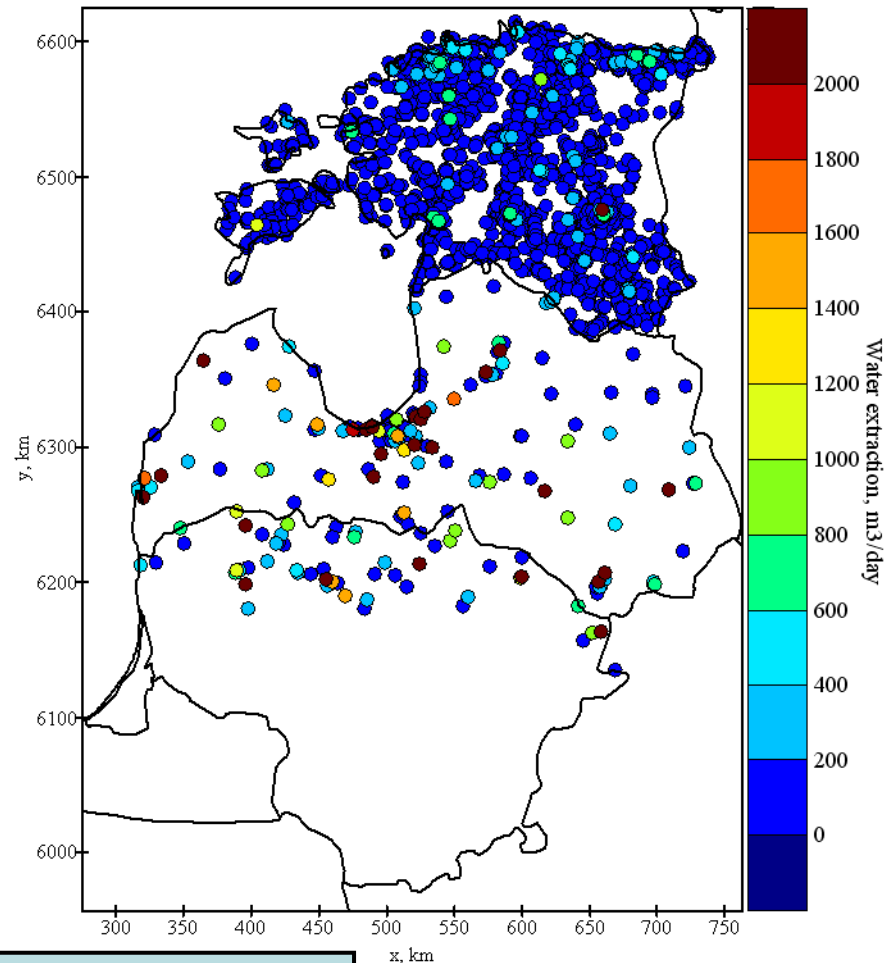
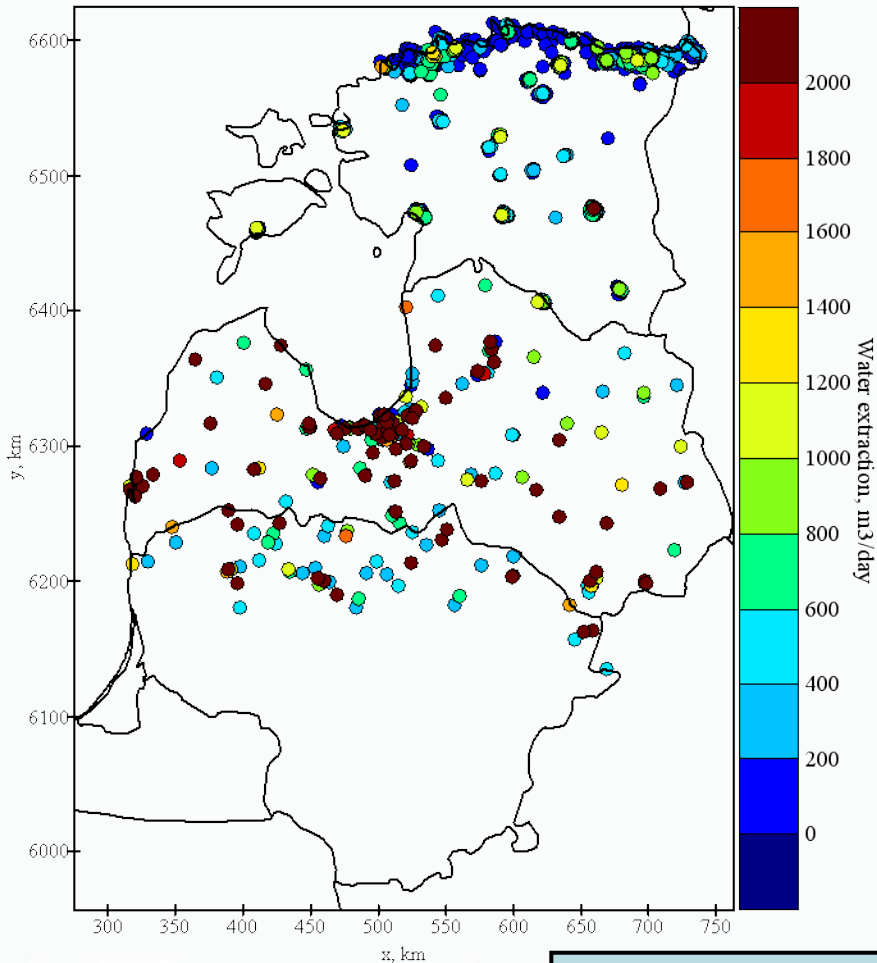
Kopējā pazemes ūdeņu ieguve Igaunijā
Total groundwater withdrawal in Estonia



La
Ti **1980**

2008

Filtrācijas modeļa robežnosacījumi - ūdensguve



1980

Modelī tiek izmantoti ūdensguves dati ar piesasti hidroģeoloģiskajam slānim

2008

Filtrācijas modeļa kalibrēšana

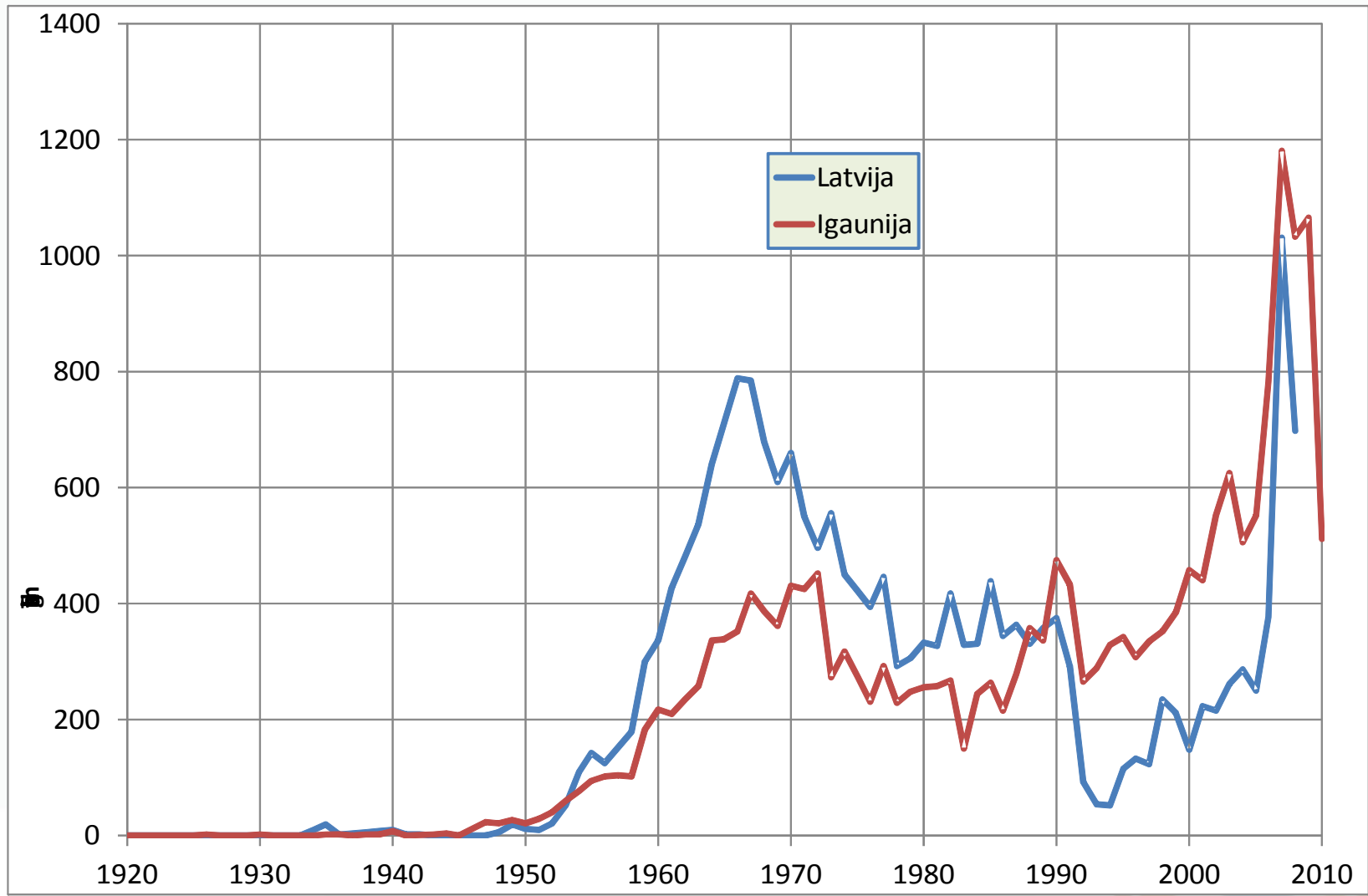
Filtrācijas modelis kalibrēts uz visiem pieejamajiem pjezometriskā ūdenslīmeņa novērojumu datiem, ieskaitot ūdenslīmeņa novērojumus urbumu ierīkošanas laikā

Pirms kalibrēšanas veikšanas izanalizētas līmeņa novērojumu datu rindas, veikta urbumu ierīkošanas laika datu analīze.

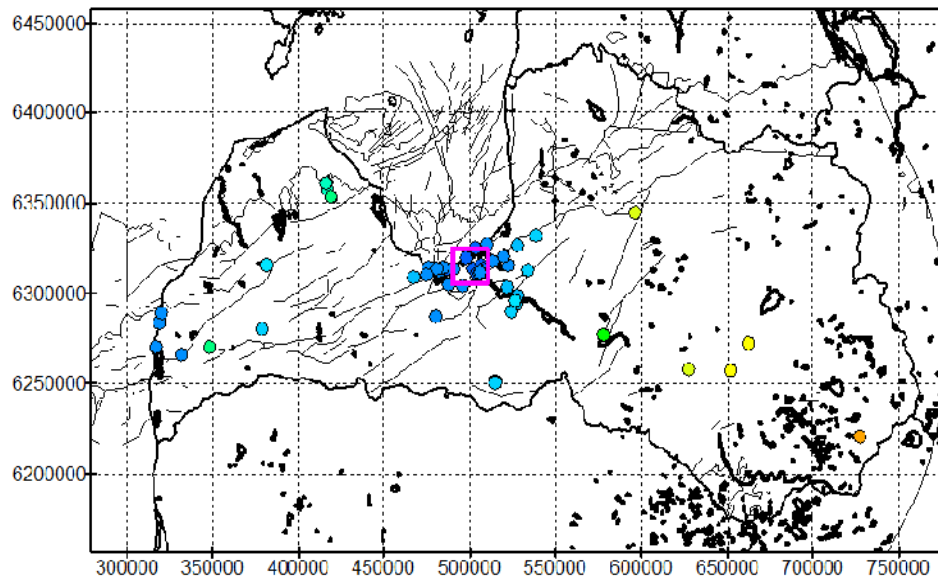
Kalibrēšanas uzdevums ir panākt iespējami labāku modeļa līmeņu sakritību ar novērojumiem. Lai izmērītu modeļa līmeņu un novērojumu datu starpību izveidota *[laikā svērta]* kalibrācijas mērķa funkcija.

Kalibrācijas mainīgie ir ģeoloģisko slāņu horizontālās un vertikālās filtrācijas koeficienti un infiltrāciju raksturojošais empīriskais koeficients.

Filtrācijas modeļa kalibrēšana – līmeņa datu analīze

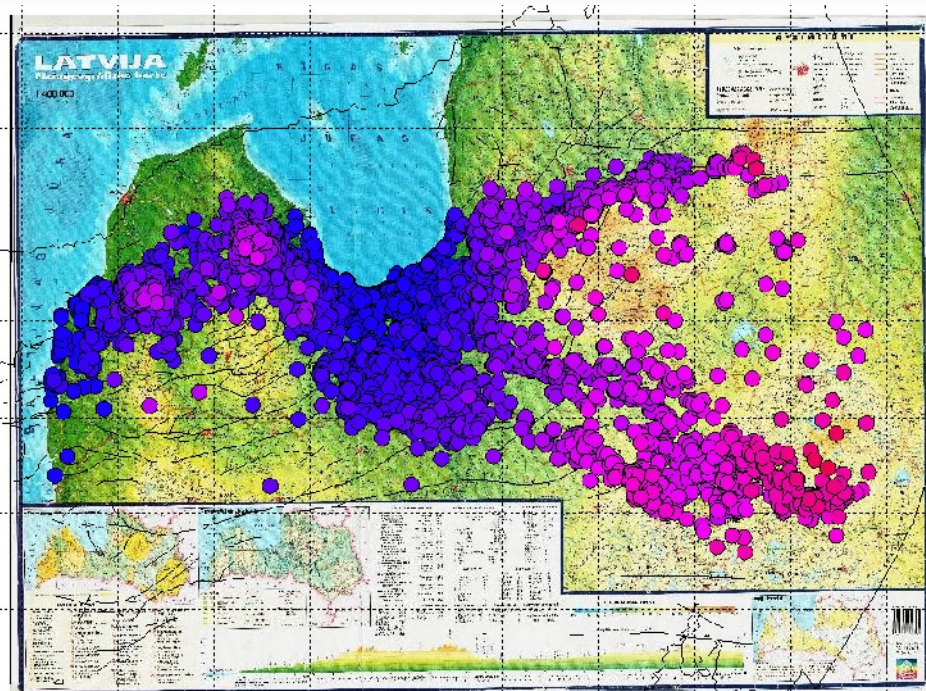


Filtrācijas modeļa kalibrēšana – līmeņa datu analīze



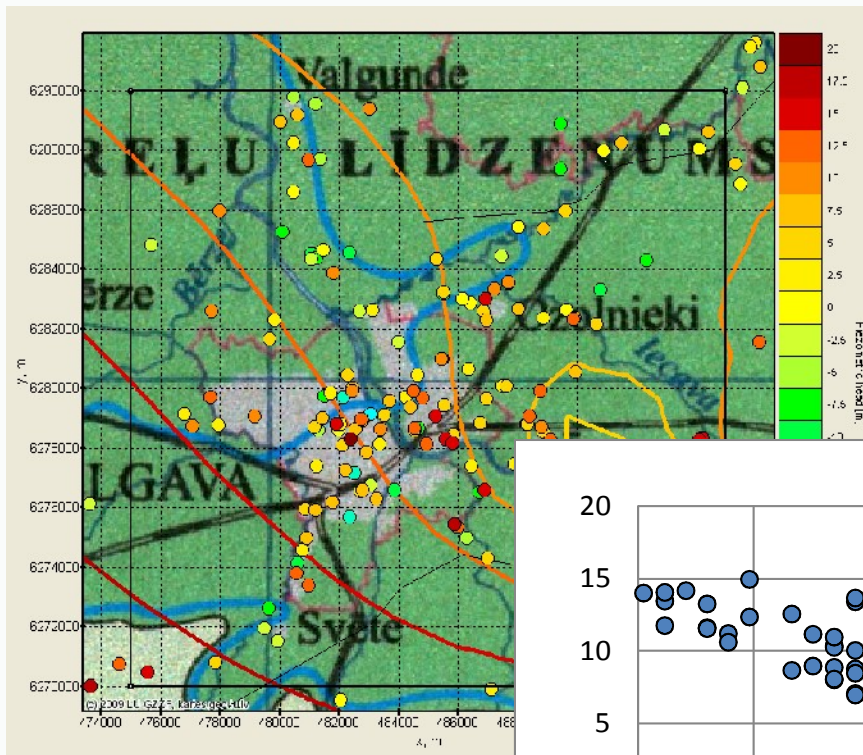
Latvijas monitoringa urbumi D3 gj-am (86 urbumi)

Urbumi D3 gj-am kopā (86 urbumi)

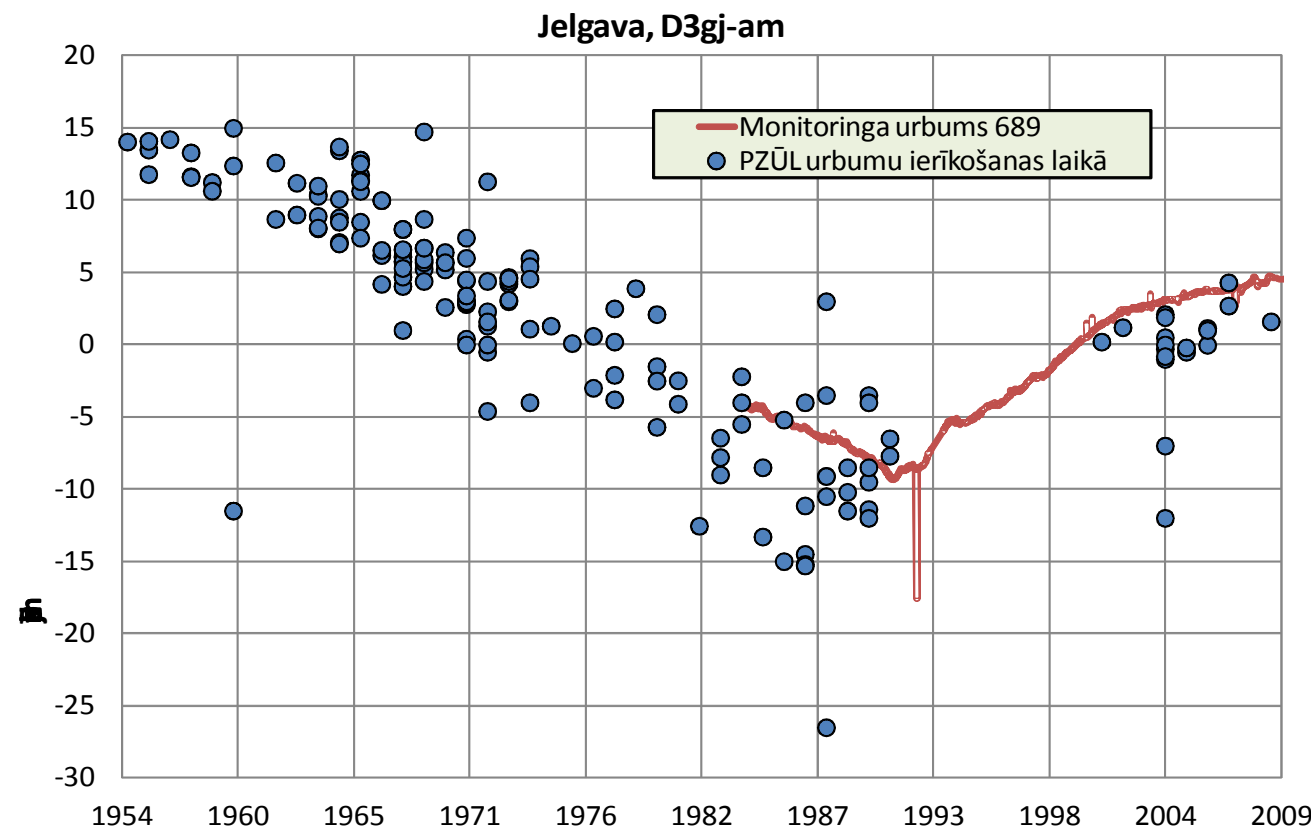


Secinājums: ierīkošanas līmeņu vairāk kā monitoringa līmeņu

Filtrācijas modeļa kalibrēšana – līmeņa datu analīze



Līmeņa datu no urbumu ierīkošanas datiem un monitoringa urbumu datu salīdzinājums



Secinājums:
ierīkošanas līmeņus
var izmantot kopā
ar monitoringa
līmeņiem

Autokalibrācija

Modeļa parametrizācija

Optimizējamie parametri: infiltrācijas un materiālu filtrācijas koeficienti

$$Parameter_i^{Opt} = Parameter_i^{V1} \cdot 10^{X_i} \quad X_i \in [-1,1] \quad i=\text{slānis}$$

Optimizācijas algoritms

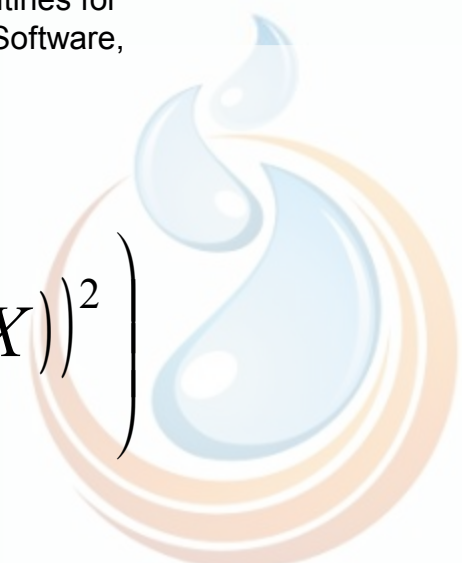
Scipy L-BFGS-B

Kvaziūtona L-BFGS minimizācija (QuasiNewton L-BFGS Minimisation with Limited Storage)

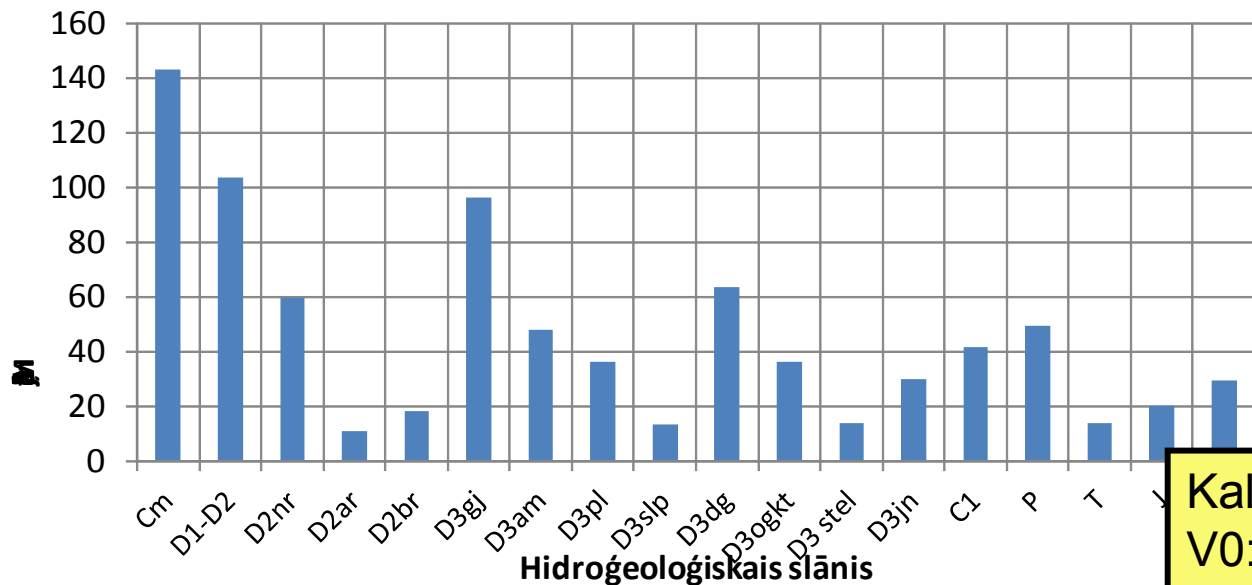
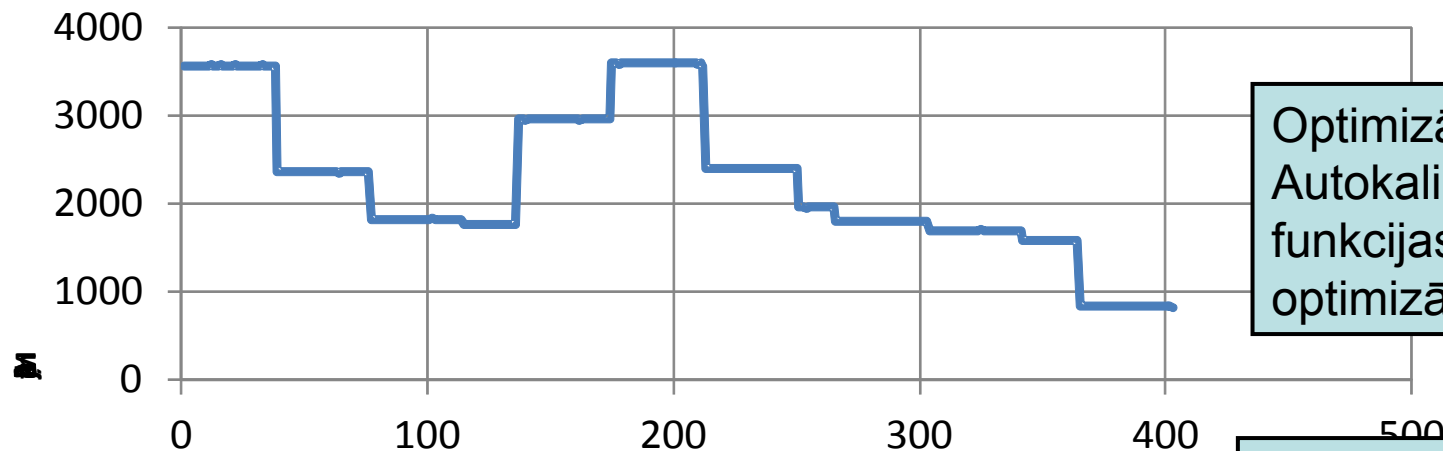
C. Zhu, R. H. Byrd and J. Nocedal. L-BFGS-B: Algorithm 778: L-BFGS-B, FORTRAN routines for large scale bound constrained optimization (1997), ACM Transactions on Mathematical Software, Vol 23, Num. 4, pp. 550 - 560.

Mērķa funkcija

$$M = \sum_{i=1..N} \frac{1}{N_i} \left(w_i^s \sum_{j=1..N_i} w_j^t w_j^l \left(\rho_i p_j^{obs} - p_j^{mod}(X) \right)^2 \right)$$

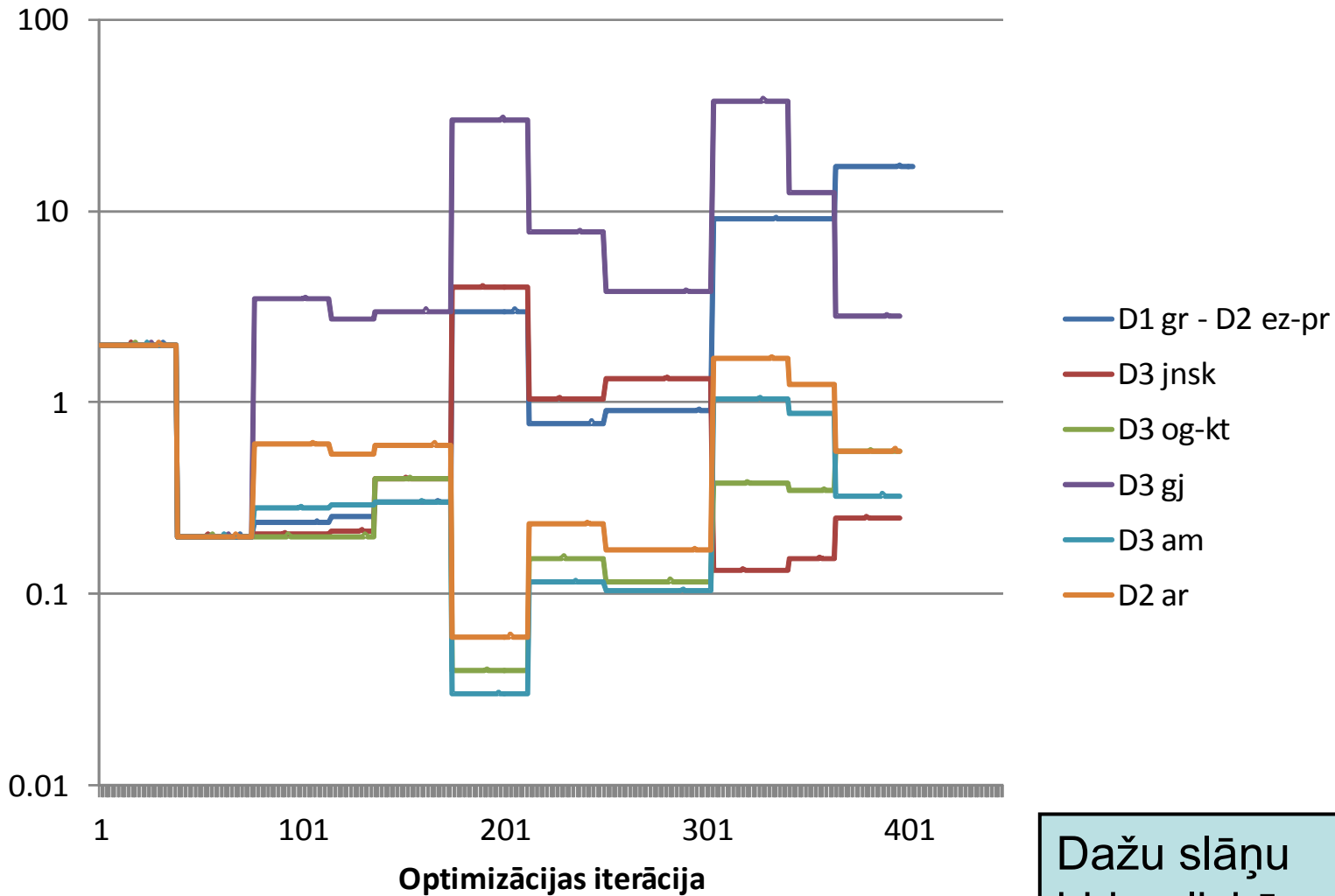


Filtrācijas modeļa kalibrēšana



Kalibrācijas rezultāts
V0: M=1100 – 14 slāņi
vidējā kvadrātiskā novirze 9m
V1: M=820 – 18 slāņi
vidējā kvadrātiskā novirze 6.7m

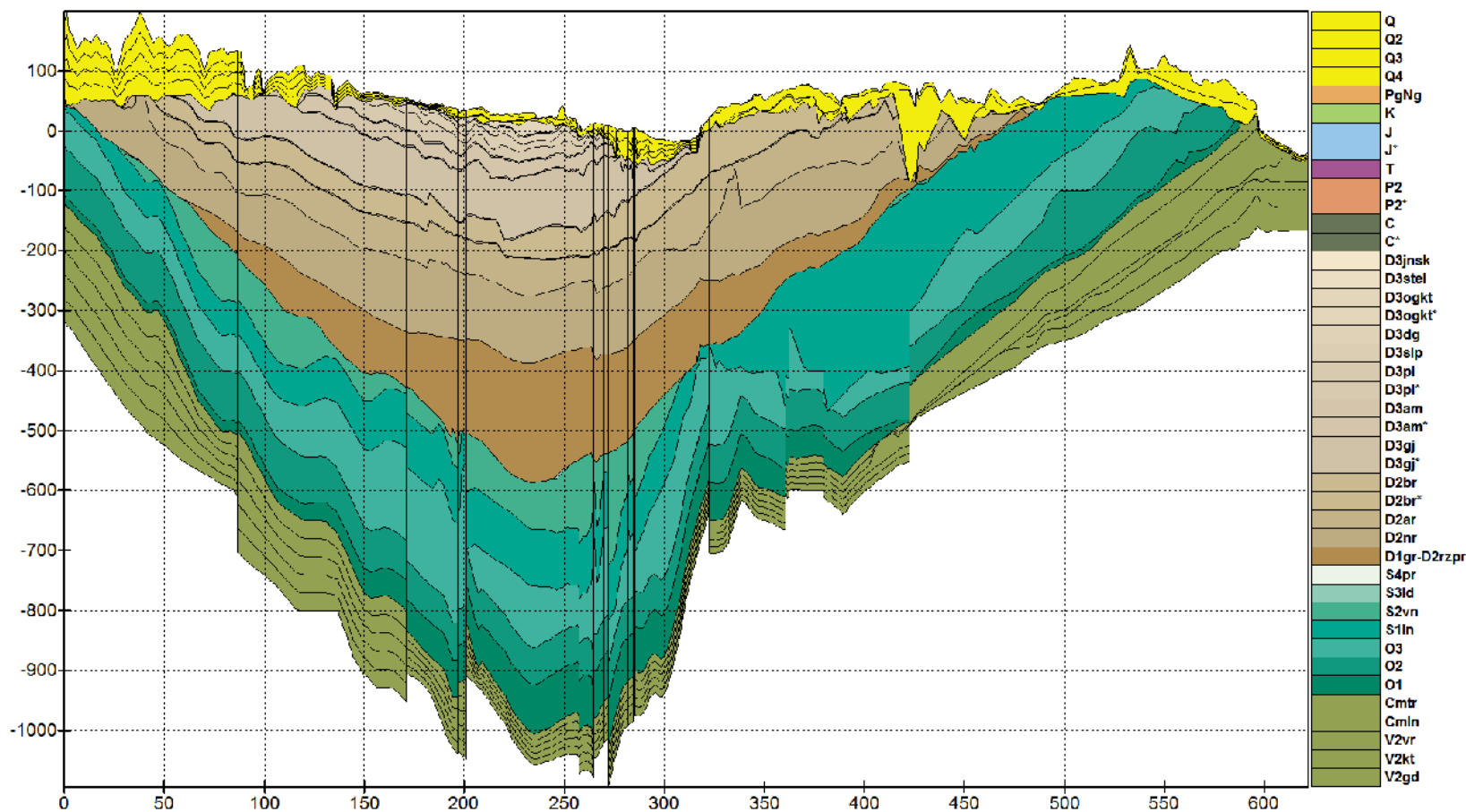
Filtrācijas modeļa kalibrēšana



Dažu slāņu
hidrauliskās
vadītspējas izmaiņas
optimizācijas gaitā

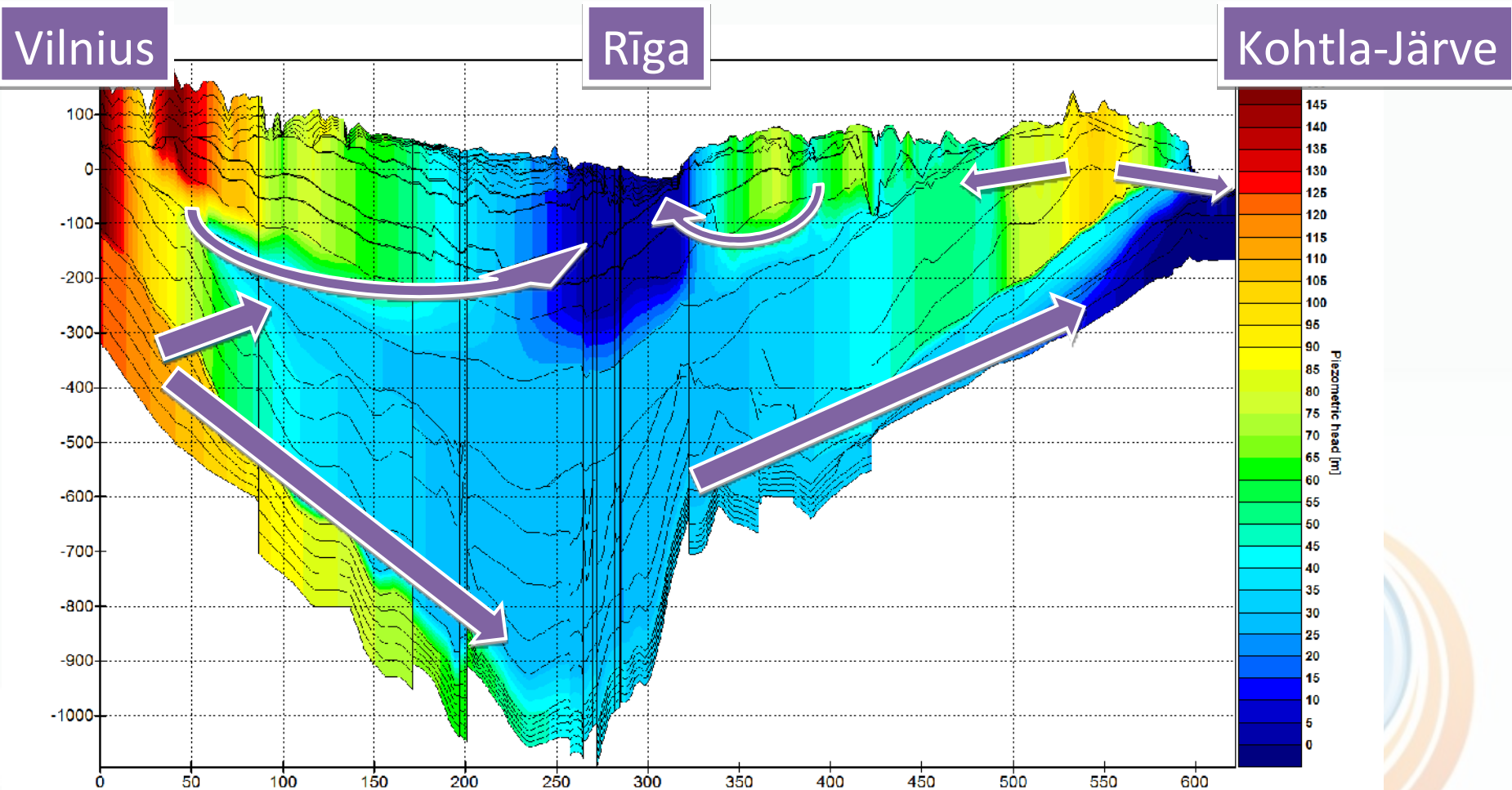
Rezultātu piemēri

Vertikālais griezum Viļņa - Rīga – Kohtla-Järve, ģeoloģiskā struktūra



Rezultātu piemēri

PZŪL sadalījums griezumā, shematisks plūsmu attēlojums



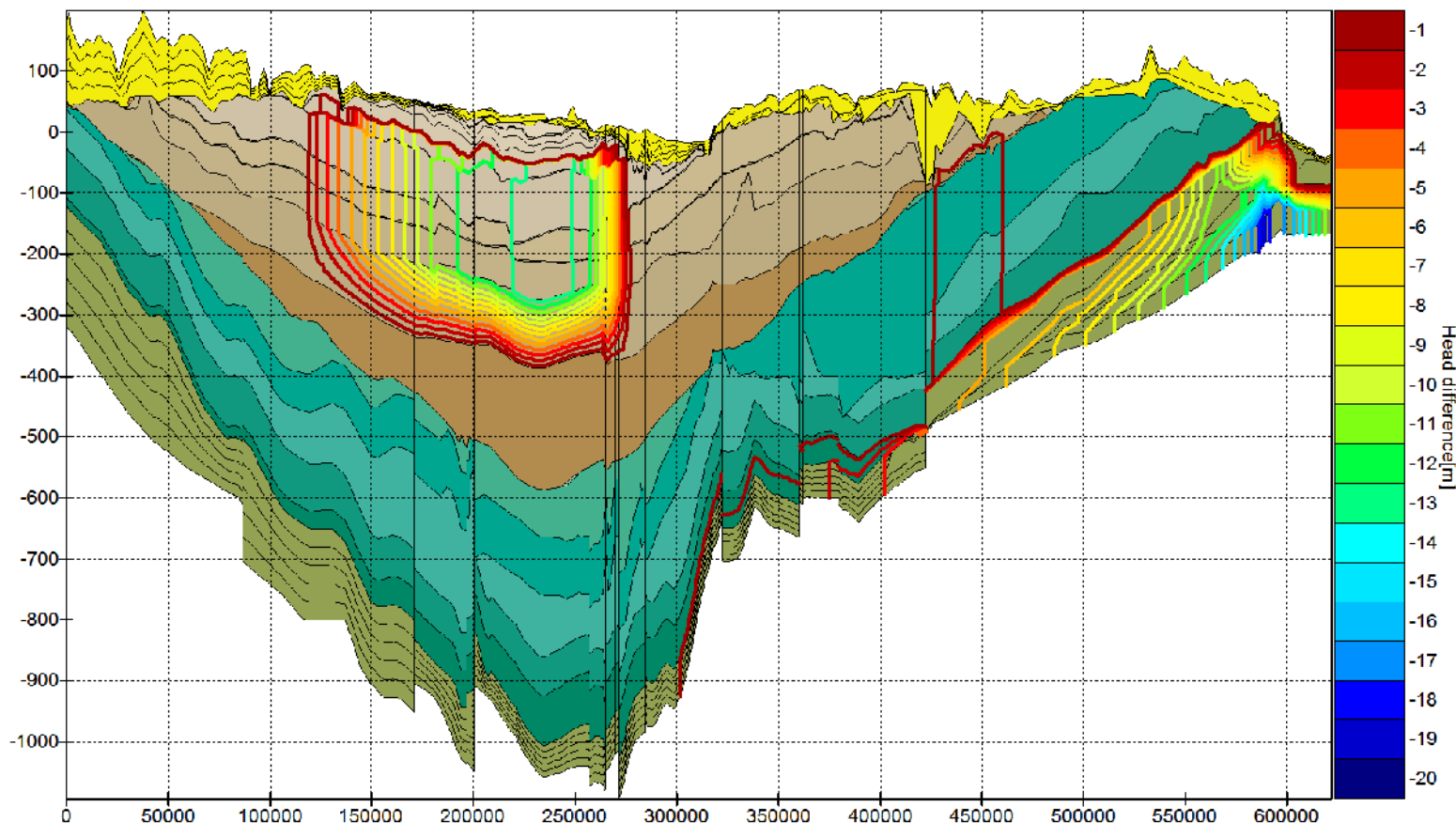
Rezultātu piemēri

Ūdensguves rezultātā izveidojies ūdenslīmeņa pazeminājums

Vilnius

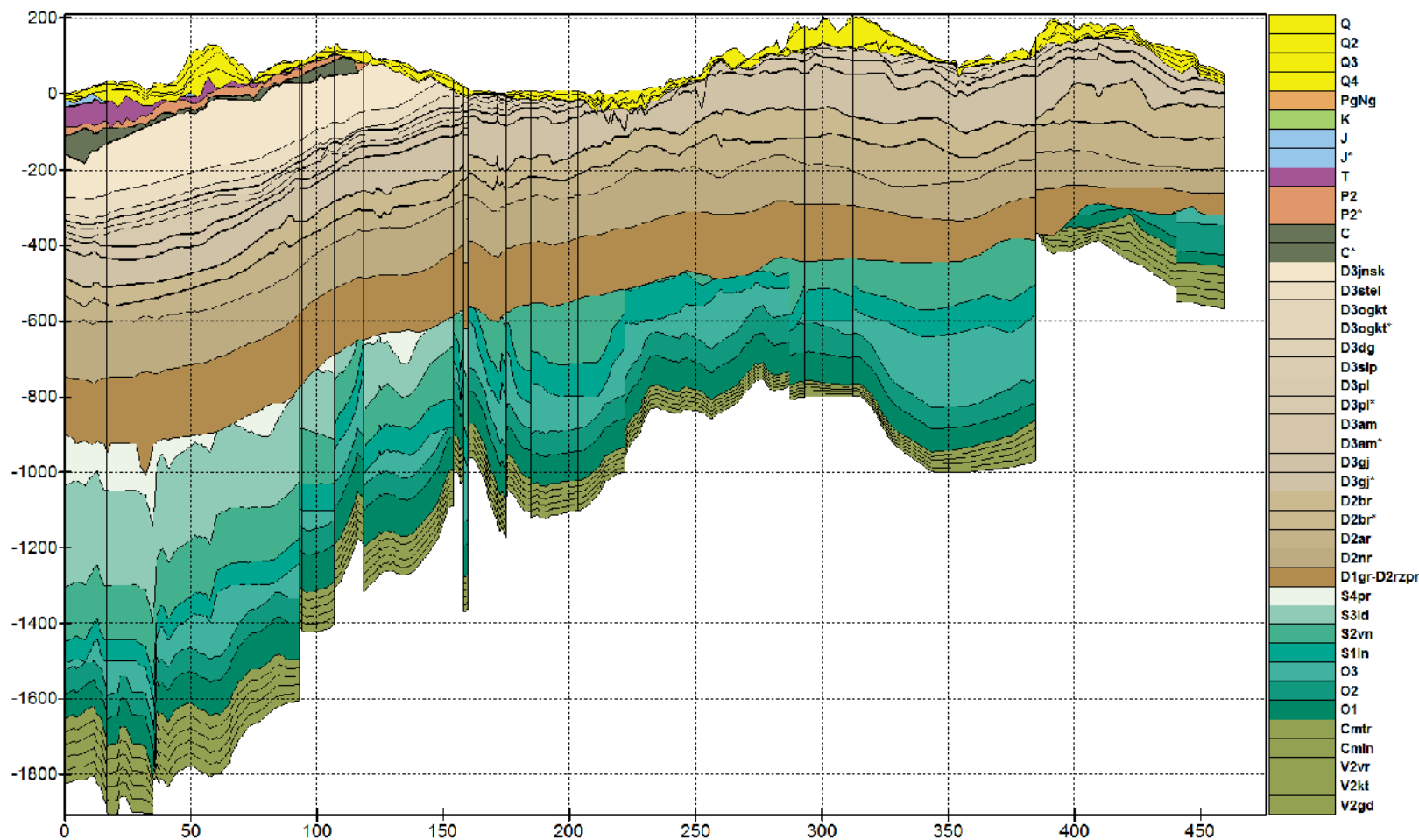
Rīga

Kohtla-Järve



Rezultātu piemēri

Vertikālais griezumums Rucava – Rīga - Pleskava , ģeoloģiskā struktūra



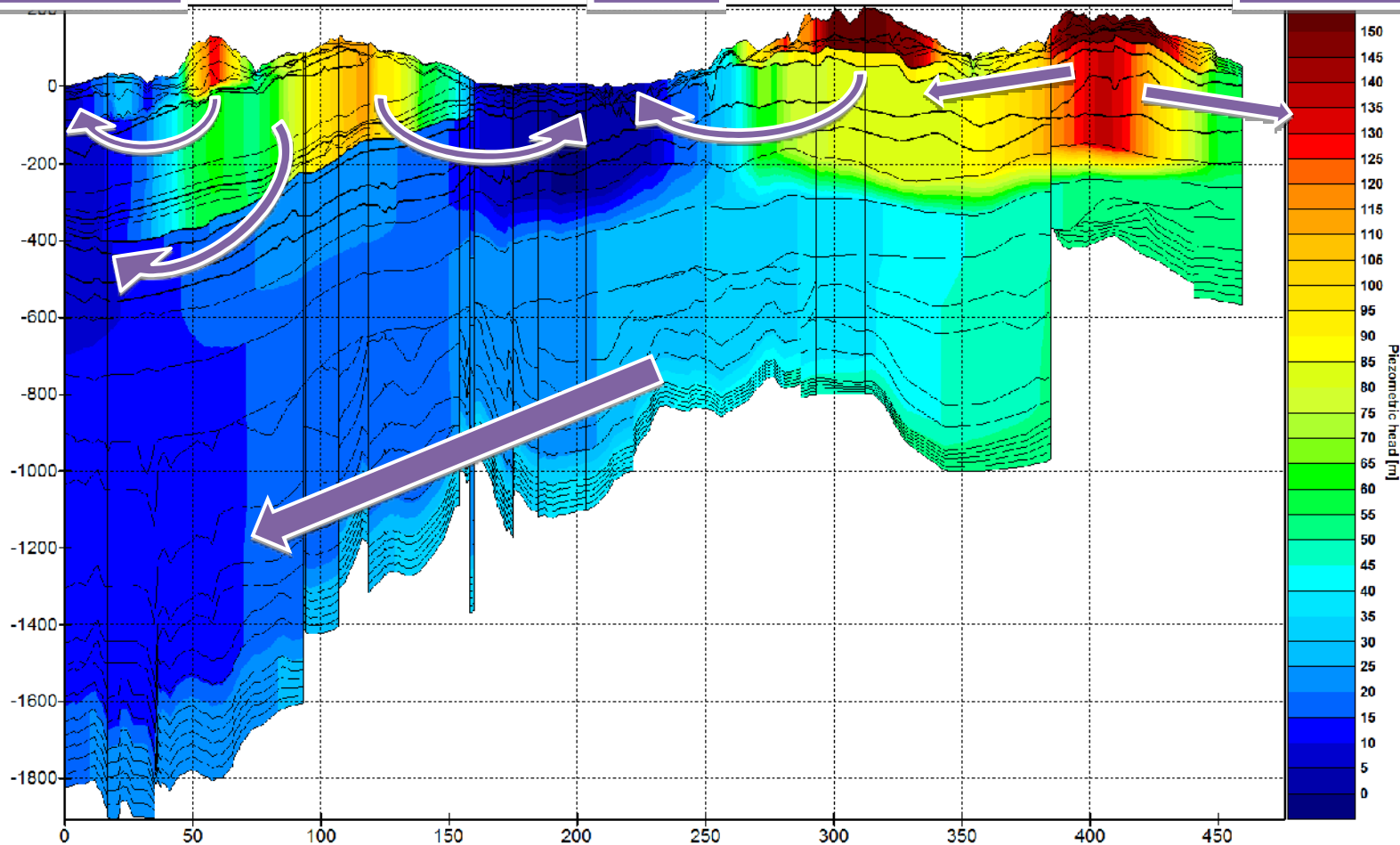
Rezultātu piemēri

PZŪL sadalījums griezumā, shematisks plūsmu attēlojums

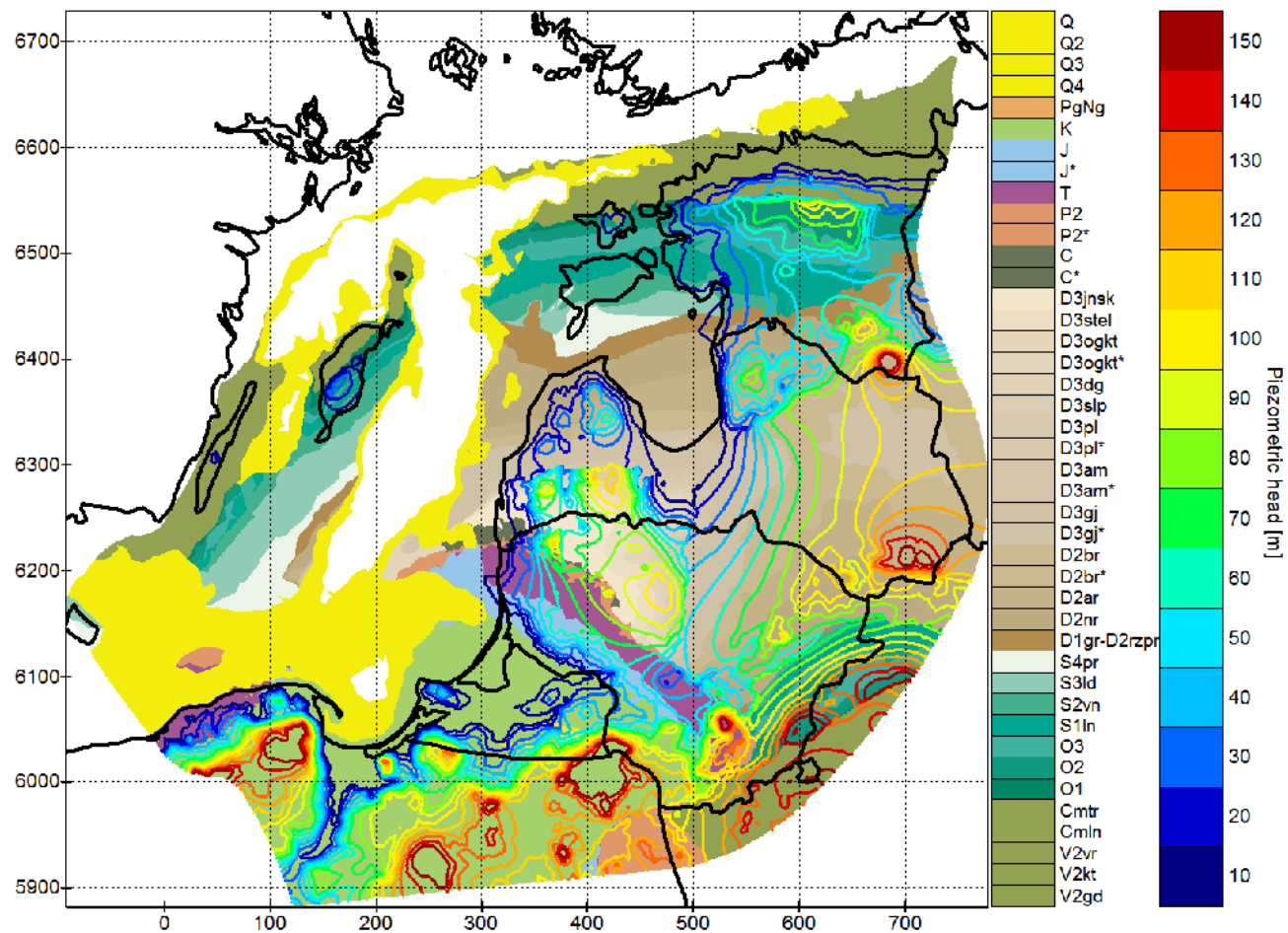
Rucava

Rīga

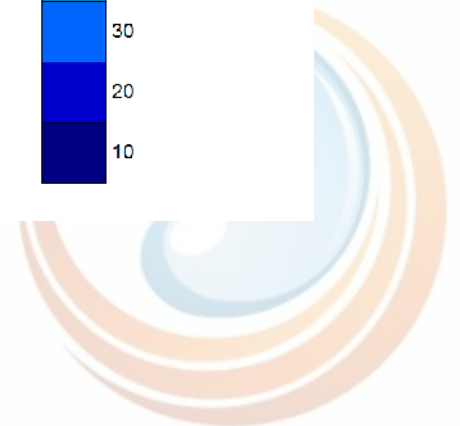
Pleskava



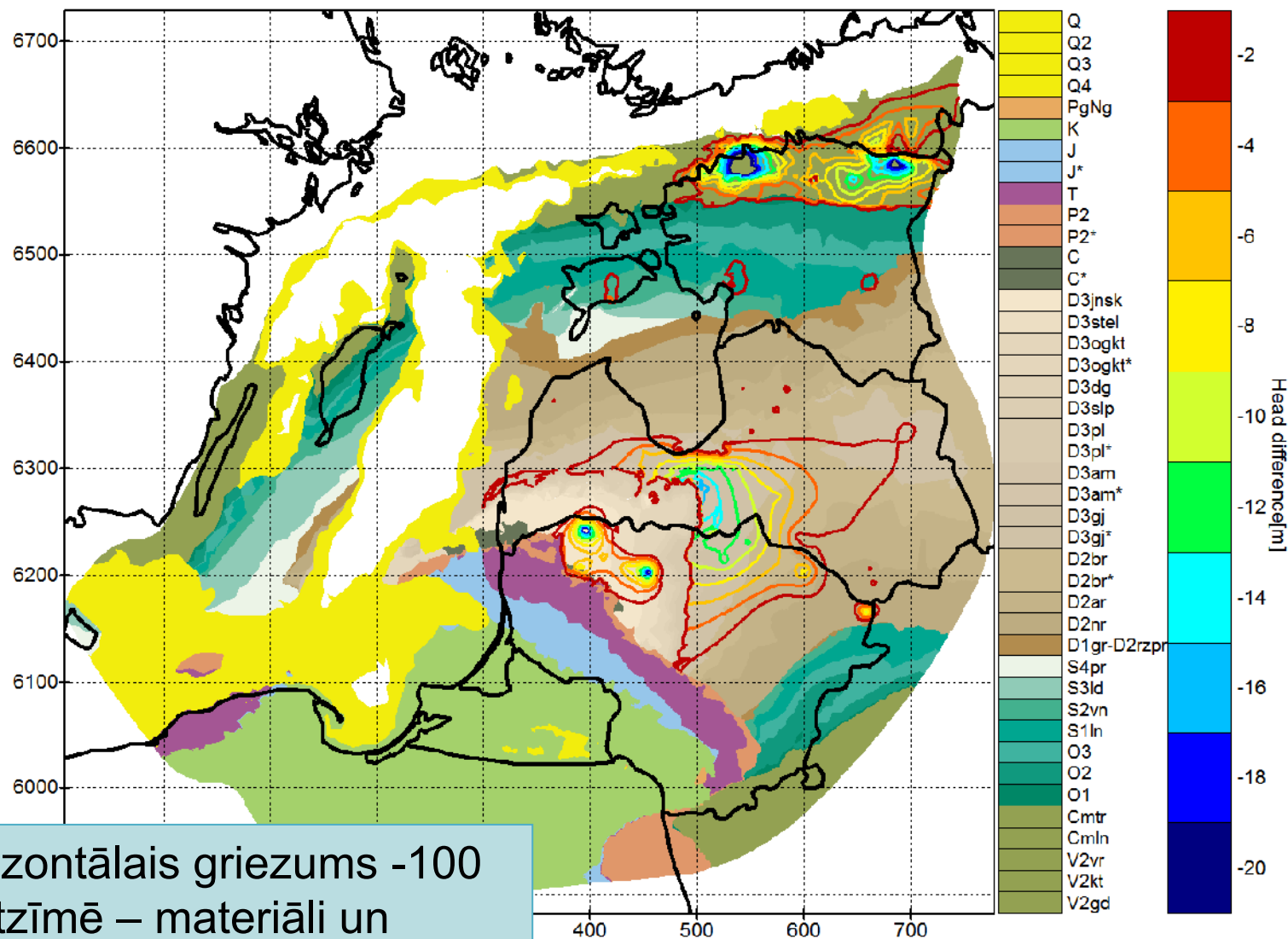
Rezultātu piemēri



Horizontālais griezum -100 m atzīmē – materiāli un PZŪL izolīnijas



Rezultātu piemēri



Horizontālais griezum -100 m atzīmē – materiāli un PZŪL pazeminājuma izolīnijas

Vispārīgs parciāldiferenciālvienādojums masas pārnesei ar reakcijām

$$\frac{\partial (n_w C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D'_d \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial (C v_i n)}{\partial x_i} + \sum R + Q_c$$

Masas izmaiņa laika vienībā uz tilpuma vienību

Dispersijas plūsmu diverģence

Difūzijas plūsmu diverģence

Advekcijas plūsmu [pārnese] diverģence

Vielas [iekšējie] avoti/noteces

Vielas avoti reakciju rezultātā

Vienādojumi derīgi mazu ($C \ll \rho_w$) koncentrāciju gadījumam

Bez koncentrācijas atgriezeniskas ietekmes uz plūsmām [caur blīvuma izmaiņām]

Ievietojot filtrācijas vienādojumu

$$\frac{\partial n_w}{\partial t} = - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = - \frac{\partial (v_i n)}{\partial x_i}$$

$$n_w \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D'_d \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - v_i n \frac{\partial C}{\partial x_i} + \sum R + Q_c$$

Piemaisījumu modelēšana (ūdens vecums)

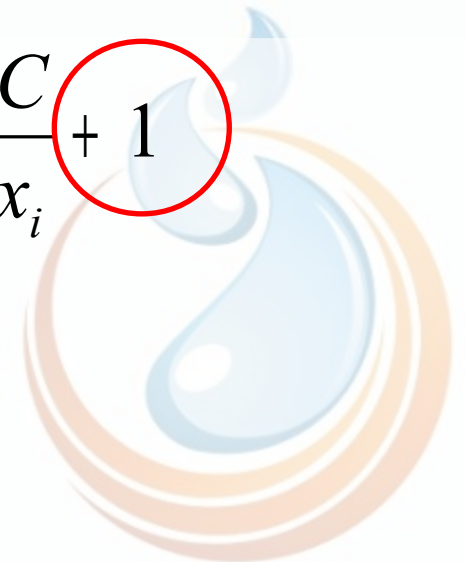
Pārneses vienādojumā C – ūdens vecums (dienās).

Robežnosacījumi – uz virsmas tiek uzdots ūdens vecums 0.

Pārneses vienādojumā tiek pievienots iekšējais avots, kas katrā laika palielina C par laika soļa garumu (dienās).

Atrisinājuma stacionārajā stāvoklī C sakrīt ar ūdens vecumu

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D'_d \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - v_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + 1$$



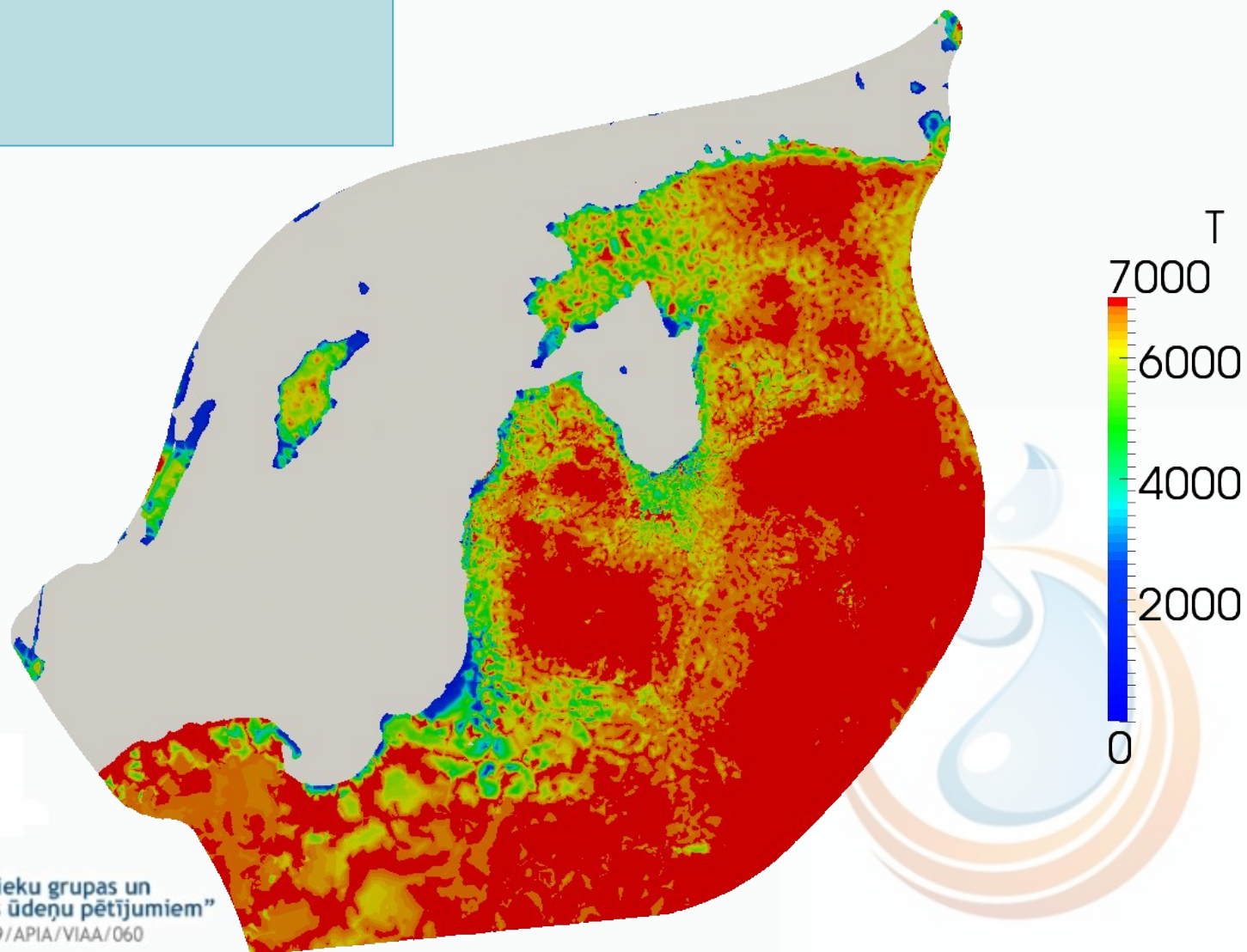
Rezultātu piemēri

Horizontālais griezumums -10 m atzīmē

– ūdens vecums (nosacītas mērvienības)

Sarkans – vecāks

Zils - jaunāks



Kopsavilkums

Modeļu sistēma:

- Izveidota skripta valoda Python valodā ģeometriskās struktūras, aprēķinu ieejas datu sagatavošanas automatizēšanai. Visa modeļsistēmas uzbūve reproducējama automātiski.

Ģeometriskais modelis:

- Izveidots BAB ģeoloģiskās struktūras ģeometrijas modelis ar 42 slāņiem.
- Uzlabota kvartāra detalizācija, modeļa struktūrā iekļautas četras rekonstruētas reģionālās erozijas virsmas.
- Modeļa uzbūvei papildus V0 datiem izmantoti Igaunijas un Lietuvas lūzumu dati un Igaunijas urbumu datubāze

Filtrācijas modelis:

- Veikta modeļa kalibrācija uz visiem pieejamajiem ūdenslīmeņu novērojumu datiem.
- Veikti filtrācijas plūsmu stacionārie aprēķini 3 situācijām: mūsdienām, pirmsindustriālajai situācijai un 1980-gadiem
- Uzsākta piemaisījumu modelēšana (ūdens vecums)



Tālākās darbības virzieni

- Modeļsistēmas papildināšana: ar Lietuvas (ūdensguve), Krievijas, Baltkrievijas un Polijas (visa veida) datiem
- Modeļsistēmas funkcionalitāte: ķīmisko reakciju, vielu pārneses modelis
- RADĪTA IZPĒTES PLATFORMA – VISU VEIDU PĒTĪJUMI AR MODELĒŠANAS PALĪDZĪBU

