

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
ĢEOGRĀFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE
ĢEOLOĢIJAS NODAĻA
LIETIŠĶĀS ĢEOLOĢIJAS KATEDRA

**ĢEOLOĢISKĀS STRUKTŪRAS TRĪSDIMENSIJU MODEĻA
ALGORITMIZĒTA IZVEIDE LATVIJAS TERITORIJAI
MAĢISTRA DARBS**

Autors: **Konrāds Popovs**

Stud. apl. kp05028

Darba vadītājs: asist. Dr. ģeol. Tomas Saks

RĪGA 2011

ANOTĀCIJA

Maģistra darba „Ģeoloģiskās struktūras trīsdimensiju modeļa algoritmizēta izveide Latvijas teritorijai” pētījumā ir izveidots noslēgtu tilpumu 3D ģeoloģiskais modelis Latvijas teritorijai, kas atspoguļo nogulumiežu segas ģeoloģisko uzbūvi ar tās galvenajiem struktūrelementiem.

Pētījuma realizācijai tika apkopots un digitāli apstrādāts pieejamais kartogrāfiskais materiāls no iepriekš publicētajām ģeoloģiskajām kartēm, kā arī apkopota un analizēta pieejamā urbumu ģeoloģiskā informācija no LVĢMC izstrādātās urbumu datubāzes „URBUMI.”

Darba ietvaros ir veikts pieejamo ģeoloģisko datu izvērtējums un analīze, veikta ģeoloģisko datu interpolācijas metodikas adaptācija modelējamās teritorijas specifikai un modeļa izveidei, kā arī izveidotās ģeoloģiskās struktūras uzbūves verifikācija un tās ģeoloģiskās nenoteiktības analīze un novērtējums.

Maģistra darba saturiskais apjoms ir 86 lappuses, kas strukturētas deviņās nodaļās un papildināts ar 39 attēliem un diviem pielikumiem.

Raksturvārdi: 3D ģeoloģiskais modelis, ģeometriskā modelēšana, biežumu interpolācija, lūzumi, ģeoloģiskā nenoteiktība.

ANNOTATION

The volumetric 3D geological model has been developed during the research of Master's thesis „Algorithmised approach to the three-dimensional model of geological structure of Latvia” for the territory of Latvia. The model reflects geological structure of the sedimentary formations and its main structural elements.

The model includes large amount of the digitally processed spatial material collected from the geological maps as well as LVGMC borehole data from the database „URBUMI” has been implemented.

Geological data analysis as well as adaptation of the data interpolation methods for the geological structure model territory is presented. Geological structure model has been verified and the uncertainty of the geological model geometry has been assessed.

The Master's thesis contains 86 pages and 39 figures and two appendixes, and is structured in ten chapters.

Keywords: 3D geological model, geometric modeling, volumetric interpolation, faults, geological uncertainty.

SATURS

IEVADS	6
1. IEPRIEKŠĒJIE ĢEOLOĢISKIE PĒTĪJUMI	8
2. LATVIJAS TERITORIJAS VISPĀRĪGA ĢEOLOĢISKĀ UZBŪVE UN ATTĪSTĪBAS POSMI.....	11
2.1. Vispārīga ģeoloģiskā uzbūve.....	11
2.2. Ģeoloģiskās uzbūves attīstības posmi	12
2.2.1. Kristāliskais pamatklintājs.....	13
2.2.2. Baikāla struktūrkomplekss	14
2.2.3. Kaledonijas struktūrkomplekss	14
2.2.4. Hercīnijas struktūrkomplekss	16
2.2.5. Alpu struktūrstāvs.....	17
3. MATERIĀLI UN METODEDES.....	18
3.1. Izmantotie materiāli, to sagatavošanas un apstrādes metodika	18
3.1.1. Pētījumā izmantotie dati un materiāli	18
3.1.2. Kartogrāfisko datu sagatavošana un apstrāde.....	20
3.1.3. Urbumu datubāzes ģeoloģisko datu sagatavošana un apstrāde	22
3.2. Ģeoloģiskā modeļa izveides metodoloģija.....	24
3.2.1. Triangulācijas režģa izveide	25
3.2.2. Izmantotās interpolācijas metodes.....	27
3.2.3. Ģeometriskā modeļa izveide un verifikācija	30
4. 3D ĢEOLOĢISKIE STRUKTŪRMODEĻI, TO IZVEIDES PAMATNOSTĀDNES UN METODES	32
4.1. 3D ģeoloģiskie struktūrmodeļi	33
4.2. Modeļu izstrādes galvenās pamatnostādnes	34
4.2.1. Topoloģiskā konsistence un ģeometriskie ierobežojumi.....	34
4.2.2. Modeļa izšķirtspēja, režģa veids un tā detalizācija	36
4.3. Ģeoloģisko datu interpolācijas metodes	38
4.4. Ģeoloģisko modeļu nenoteiktība	41
5. MODEĻA STRATIFIKĀCIJA	44
6. IZMANTOTO DATU VISPĀRĒJS IZVĒRTĒJUMS	50
6.1. Kartogrāfiskā materiāla izvērtējums.....	50
6.2. Urbumu informācijas izvērtējums	52
7. 3D ĢEOLOĢISKAIS MODELIS LATVIJAS TERITORIJAI	54
7.1. Slāņkopu laterālās izplatības implementācija modelī.....	57

7.1.1. Ordovika – silūra slāņkopu laterālā izplatība	58
7.1.2. Devona – juras slāņkopu laterālā izplatība	62
7.2. Lūzumi modeļa struktūrā	65
7.2.1. Lūzumi pamatklintāja – silūra slāņkopās	65
7.2.2. Lūzumi devona slāņkopā	71
8. MODEĻA ATBILSTĪBA URBUMU DATIEM	75
9. DISKUSIJA	82
9.1. Algoritmizētas 3D ģeoloģiskās struktūras veidošanas priekšrocības un trūkumi	82
9.2. Modeļa virsmu un urbumu nesaistes interpretācija	84
9.3. Datu blīvums un modeļa mēroga atbilstība	86
9.4. Ģeoloģiskās struktūras izveides algoritms	87
9.5. 3D ģeoloģiskās struktūras salīdzinājums ar kartogrāfisko materiālu	88
SECINĀJUMI	90
PATEICĪBAS	91
LITERATŪRAS SARAKSTS	92
1. pielikums. Modeļa griezumu profila līniju novietojuma mozaīka	98
2. pielikums. Modeļa rezultātu un urbumu datu nesaistes statistiskie rādītāji	99

IEVADS

Ģeoloģiskās uzbūves ģeometriskā interpretācija 3D ģeoloģiskajos modeļos ir aktuāla un salīdzinoši jauna pētniecības nozare, kas jau nosacīti standartizēta daudzās ģeoloģijas nozarēs kā struktūrģeoloģija, naftas un gāzes ģeoloģija, hidroģeoloģija un citās. Pateicoties praktiskajam pielietojumam, šie modeļi šajās nozarēs ir neatsverami un kļūst par dominējošajām ģeoloģiskās uzbūves interpretācijas metodēm, kas ļauj būtiski samazināt zināmās ģeoloģiskās uzbūves nenoteiktību (Bistacchi et al., 2008; Caumon, 2010; Tacher et al., 2005).

Latvijas teritorijā lokāla mēroga ģeoloģisko struktūru modelēšana ir veikta Inčukalna pazemes gāzes krātuves ģeoloģisko struktūru izpētei (Kaņevs, 2001), taču reģionāla mēroga ģeoloģiskās uzbūves modelēšanas pētījumi līdz šim nav veikti. Tomēr iepriekš veikto pētījumu rezultātā ir ievākts apjomīgs datu materiāls, kas pietiekami detalizēti raksturo teritorijas ģeoloģisko uzbūvi, lai būtu iespējams veikt šo datu 3D interpretāciju un iestrādi reģionāla mēroga ģeometriskajā modelī.

Maģistra darbam tika izvirzīts sekojošs **mērķis**: trīsdimensiju ģeoloģiskā modeļa algoritmizēta izveide Latvijas teritorijai un tā ģeoloģiskās nenoteiktības novērtējums.

Izvirzītā mērķa sasniegšanai tika definēti vairāki **uzdevumi**:

- pieejamo ģeoloģisko datu izvērtējums un analīze;
- ģeoloģisko datu interpolācijas metodikas izstrāde un adaptācija modelējamās teritorijas specifikai un modeļa izveidei;
- 3D ģeoloģiskās struktūras algoritmizēta izveide Latvijas teritorijai;
- izveidotās ģeoloģiskās struktūras uzbūves verifikācija un tās ģeoloģiskās nenoteiktības analīze un novērtējums.

Salīdzinot ar agrāk veiktajiem līdzīga rakstura pētījumiem Latvijā, šis pētījums atšķiras ar augstāku detalizāciju, iegūto rezultātu izšķirtspēju un apjomu. Pētījumā ir analizēta pieejamā nogulumiežu segu raksturojošā informācija, uzmanību pievēršot tektonisko struktūru aprakstošajai informācijai. Uz šo datu pamata ir izveidots teritorijas ģeometriskais modelis, kurš labi atspoguļo nogulumiežu segas ģeoloģisko uzbūvi ar tās galvenajiem struktūrelementiem, starpreģionālajām, reģionālajām, subreģionālajām un atsevišķām lokālām struktūrām, kam veikts tā ģeoloģiskās nenoteiktības novērtējums un analīze.

Pētījumā izmantotās metodes un pirmie rezultāti ir aprobēti vairākos ziņojumos Latvijas Universitātes 69. zinātniskajā konferencē (Dēliņa u.c., 2011; Jātnieks u.c., 2011; Popovs u.c., 2011*b*; Ukass u.c., 2011) un Daugavpils Universitātes 53. starptautiskajā zinātniskajā konferencē (Popovs et al., 2011*a*). Pētījumā izstrādātā 3D ģeoloģiskā modeļa

izveides metodika daļēji aprobēta iepriekš veiktajā pētījumā, kas publicēts žurnālā „Hydrogeology Research” (Delina et al., bez dat.).

Maģistra darbs ir strukturēts desmit nodaļās un 17 apakšnodaļās, kuru kopējais apjoms ir 86 lpp. Darbs ilustrēts ar 39 ilustrācijām, no kurām 34 ir autora sagatavotas oriģinālas ilustrācijas, piecām tabulām un diviem pielikumiem. Maģistra darba izstrādē izmantoti 48 publicētie, 6 npublicētie avoti, kā arī 14 interneta resursi, no kuriem astoņi ir LU ĢZZF ģeotelpisko datu WMS servisa resursi.

Maģistra darbs izstrādāts ESF aktivitātes „Cilvēkresursu piesaiste zinātnei” projekta „Starpnozaru zinātnieku grupas modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem,” projekta Nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060 (turpmāk tekstā – PUMA) ietvaros.

1. IEPRIEKŠĒJIE ĢEOLOĢISKIE PĒTĪJUMI

Slāņkopu telpiskā izplatība un iežu deformācijas ir nozīmīgi parametri ģeoloģisko struktūru ģeometriskajā modelēšanā (Groshong, 2006), kas Latvijas teritorijā veiktajos ģeoloģiskajos pētījumos līdz šim ir nepietiekami raksturoti. Latvijas teritorijā lokāla mēroga ģeoloģisko struktūru modelēšana ir veikta Inčukalna pazemes gāzes krātuves ģeoloģisko struktūru izpētei (Kaņevs, 2001), taču reģionāla mēroga ģeoloģiskās uzbūves modelēšanas pētījumi līdz šim nav veikti. Tomēr iepriekšējo pētījumu rezultātā ir ievākts ievērojams ģeoloģiskās informācijas apjoms, kas raksturo teritorijas ģeoloģisko struktūru un ir izmantojams šādu pētījumu realizācijai.

Pirmie ar ģeoloģisko struktūru deformācijas procesu un ģeometrisko uzbūvi saistītie pētījumi Latvijas teritorijā aizsākās 19. gadsimta beigu posmā, bet dziļi iegulošo slāņu un struktūru identifikācijas jautājumu plaša risināšana ir aizsākusies 20.gadsimta vidū. Šo pētījumu rezultātā radās jauni priekšstati par Latvijas teritorijas tektonisko uzbūvi kā daļu no Austrumeiropas platformas ZR reģiona. Šie rezultāti balstās uz dažādiem plašiem ģeofizikālajiem pētījumiem, kuru tiešais mērķis bija noteikt kristāliskā pamatklintāja virsmas reljefa raksturu un struktūru (Ковалевский и Озолинь, 1967). Šajos pētījumos pēc Latvijas teritorijas aeromagnētiskās kartēšanas materiāliem ir veikts kristāliskā pamatklintāja virsmas raksturojums, kur bija iespējams izdalīt atsevišķus reģionāla mēroga struktūrelementus. Tāpat pirmo reizi ir sagatavota Latvijas tektoniskā shēma, kā arī veikta plaša struktūrģeoloģiskā kartēšana devona nogulumiem, sniedzot starpreģionālo struktūru raksturojumu un sagatavojot devona Narvas un Amatas svītu struktūrkartes (Brangulis un Konšins, 2002; Ковалевский и Озолинь, 1967).

Latvijas tektonikas un ģeoloģiskās uzbūves izpētē sevišķi svarīgs ir laika posms starp 1948. un 1972. gadu, kad veikti plaši ģeofizikālie darbi (Kaņevs un Bērziņš, 1995) un izveidoti daudzi struktūrbūmi, kas sasniedz kristālisko pamatklintāju, sniedzot informāciju par dziļi iegulošajiem slāņiem. Tektonisko struktūru pētījumi tika turpināti 1975. – 1990. gados, kad tika veikti ievērojami ģeofizikālie pētījumi Baltijas jūras akvatorijā, kur tika iegūta informācija par pamatklintāja virsmu un nogulumiežu segas uzbūvi, papildinot par sauszemi pieejamo informāciju. Šī informācija ļāva konstatēt un apstiprināt daudzus tektoniskos lūzumus šajās teritorijās, kā arī veicināja lokālu struktūru izpēti. Pamatojoties uz šo informāciju, ir sagatavota Baltijas jūras tektoniskā karte (Vetreņņikovs, 1996).

Detalizētākie reģionāla mēroga pētījumi, kā ietvaros ir iegūts apjomīgākais ģeoloģisko uzbūvi raksturojošais faktiskais materiāls, ir ģeoloģiskās kartēšanas Latvijas teritorijai 1:50 000, 1:200 000 rezultāti un karšu komplekta mērogā 1:200 000 atjauninātais izdevums (Brangulis u.c., 2000). Šī informācija ir principiāli jauna, raksturojot devona līdz juras

slāņkopu ģeoloģisko uzbūvi un slāņkopu deformāciju, kā arī sniedz informāciju par Kaledonijas struktūrkompleksa nogulumiem un pamatklintāja virsmu.

Balstoties uz šo pētījumu plašo faktisko materiālu, tika izstrādāti un publicēti daudzi nozīmīgi zinātniski pētījumi par lokālu struktūru ģeoloģisko un tektonisko uzbūvi, kristāliskā pamatklintāja un Kaledonijas struktūrstāva disjunktīvajām struktūrām (Brangulis un Konšins, 2002; Брангулис и др., 1985; Гайлите и др., 1987; Ulste, 1961*a*; Ulste, 1961*b*). Ir sagatavots struktūrelementu apraksts Kaledonijas un Hercīnijas struktūrkompleksiem un sastādīta Latvijas tektoniskā karte M 1:500 000, kas papildināta ar Latvijas tektonikas raksturojumu, sagatavojot Kaledonijas un Hercīnijas struktūrstāvu tektoniskās rajonēšanas shēmas (Brangulis un Konšins, 2002). Atjauninātā karšu komplekta mērogā 1:200 000 nozīmīgs papildinājums ir Latvijas subkvartarās virsmas nogulumu izplatības karte (Brangulis u.c., 1998), mērogā 1:1 500 000 sagatavotās tektoniskās kartes pamatklintāja un ordovika, kā arī devona Amatas un Pērnavas svītu virsmām (Brangulis un Konšins, 2002).

Par Hercīnijas nogulumu izplatību un raksturojumu, jo īpaši devona nogulumiem, ir pieejama visdetālākā informācija, kam par iemeslu ir šo nogulumu dabiskā pieejamība atsegumos un pieejamā ievērojami detalizētākā informācija no urbumiem. Informācija par šo nogulumu pētījumu vēsturi un attīstību ir pieejama jau no pašiem ģeoloģisko pētījumu pirmsākumiem Latvijas teritorijā, bet nozīmīgākie pētījumi veikti pēdējās desmitgadēs. Plašs apkopojošs darbs par devona un karbons nogulumiem un faciālo izplatību ir sagatavots 1981. gadā un izdots grāmatā „Baltijas devons un karbons” (Сорокин и др., 1981).

Perma nogulumu aktuālākie pētījumi saistīti ar ģeoloģiskās kartēšanas M 1:50 000 etapu, savukārt faciālo izmaiņu un litoloģiskos pētījumus Latvijas teritorijā ir veikuši V.Kuršs un L. Savvaitova, kas rezultējās apkopojošajā darbā „Latvijas perma kaļķakmeņi” (Куршс и Савваитова, 1986). Saistībā ar triasa nogulumiem nozīmīgus pētījumus veicis P.Liepiņš, kurš sagatavojis līdz šim detalizētāko aprakstu par triasa nogulumu izplatību Latvijā (Liepiņš, 1947).

Tādejādi par Latvijas sauszemes teritoriju iepriekš veikto pētījumu rezultātā ir pieejama apjomīga ģeoloģiskā informācija, kamēr ievērojami mazāk pētīti ir Rīgas jūras līcis un Baltijas jūras piekrastes seklūdens zona. Plaši izpētes darbi ir veikti Baltijas jūrā, sniedzot informāciju par Latvijas teritorijai pieguļošo teritoriju ģeoloģisko uzbūvi (Cirša u.c., 1994; Kaņevs un Bērziņš., 1995; Latipova u.c., 1992). Seismiskā izpēte ir norisinājusies arī Baltijas jūrā un Rīgas jūras līča teritorijā, pēc kuras rezultātiem ir veikta paleozoja nogulumu korelācija Baltijas jūras un Rīgas jūras līča teritorijā (Tuulig & Floden, 2009). Tomēr, šajās teritorijās ir stipri ierobežota informācija par nogulumiežu segas dziļākajiem slāņiem un seklūdens zonu, kā arī kristāliskā pamatklintāja virsmu un uzbūvi šajās teritorijās. Rīgas jūras

līča teritorijas ģeoloģiskā uzbūve ir apzināta ģeoloģiskās kartēšanas M 1:200 000 laikā, kur iegūta informācija par atsevišķiem lūzumiem un struktūrelementiem. Dziļāk iegūto slāņu ģeoloģisko un strukturālo uzbūvi Rīgas jūras līcī palīdz precizēt un smalkāk raksturot dati no vēlāk veiktajiem seismoakustiskajiem pētījumiem (Latipova u.c., 1992).

2. LATVIJAS TERITORIJAS VISPĀRĪGA ĢEOLOĢISKĀ UZBŪVE UN ATTĪSTĪBAS POSMI

Pētījumu teritorija ir senās Austrumeiropas platformas sastāvdaļa (Brangulis un Konšins, 2002) un ietilpst Baltijas artēziskajā baseinā, kas aptver visu Baltijas, kā arī Polijas ZA, Baltkrievijas Z, un Krievijas pašu R pierobežas teritoriju (Levins u.c., 1998). Baltijas artēziskā baseina DR daļā nogulumiežu slāņkopas biezums ir izsekojams līdz pat piecu kilometru dziļumam (Levins u.c., 1998). Balstoties uz iepriekšējiem reģionāliem un lokāliem ģeoloģiskajiem pētījumiem un ģeoloģiskās kartēšanas rezultātiem mērogā 1:50 000 un 1:200 000 (Brangulis u.c., 2000), teritorijas ģeoloģiskā uzbūve ir pietiekami izziņāta, lai pēc šiem datiem, varētu veidot teritorijas ģeoloģiskos modeļus.

Reģionālā mērogā pētījumu teritorijas nogulumiežu slāņkopas sagulums ir subhorizontāls, taču vairāku tektonisko ciklu laikā izveidojušās dažādas tektoniskās struktūras, kas kopā ar denudācijas procesiem un sedimentācijas pārtraukumiem ir ievērojami sarežģījušas ģeoloģisko uzbūvi (Brangulis un Konšins, 2002; Brangulis u.c., 1998).

2.1. Vispārīga ģeoloģiskā uzbūve

Latvijas teritorijā nogulumiežu slāņkopas pamatni veido kristāliskais pamatklintājs, ko veido arhaja un proterozoja, izņemot Venda nogulumus, ieži. Visā Latvijas teritorijā šis iežu komplekss ir raksturojams kā metamorfie ieži, ko veido gneisi un kristāliskie slānekļi. Savukārt magmatiskie ieži sastopami tikai Kurzemes ziemeļos un Austrumlatvijā (Brangulis u.c., 2000).

Augstāk iegulošo nogulumiežu segu galvenokārt veido terigēnie, karbonātiskie un sulfātu ieži, kurus pārsedz kvartāra nogulumi. Kopējais nogulumiežu segas biezums variē no dažiem simtiem metru Latvijas DA daļā līdz pat divu kilometru biezumam Latvijas DR (Brangulis un Konšins, 2002).

Latvijas teritorijā paleozoja griezumam veido kembrija, ordovika, silūra, devona, karbona un perma periodu nogulumi, kur novērojamas klastiskās un terigēnās sedimentācijas slāņkopu mijas, kas atsaucas uz sedimentācijas baseinu konfigurācijas izmaiņām ģeoloģiskās attīstības gaitā (Brangulis u.c., 2002; Сорокин и др., 1981). Reģionālā mērogā zemkvartāra virsmā visplašāk pārstāvēta devona nogulumiežu klastiskā slāņkopa, kas veido aptuveni divas trešdaļas no pamatiežu virsmas, kamēr virs devona esošās karbona un perma slāņkopas ir izplatītas tikai atsevišķos rajonos Latvijas DR daļā (Brangulis un Konšins, 2002).

Vecākie zemkvartāra virsmu veidojošie nogulumi atbilst vidusdevona Narvas svītai, secīgi zemkvartāra virsmā atsedzas arī jaunāki nogulumi līdz augšdevona Šķerveļu svītas nogulumiem, kuri konstatējami lokālos apgabalos Kurzemē. Devona nogulumiem uzguļ

mezozoja nogulumi salīdzinoši lokālās teritorijās Latvijas DR daļā. To izplatības apgabali ir nelieli, ko noteica sedimentācijas baseina konfigurācijas izmaiņas un pleistocēna segledāju erodējošā darbība (Brangulis u.c., 2000).

Subkvartāra virsmas augstuma atzīmes variē no 160 m z.j.l. Baltijas jūras Latvijas akvatorijas ZR daļā līdz 140 m v.j.l. Vidzemes centrālās augstienes reģionā. Reljefa pazeminājumi atrodas Piejūras un Viduslatvijas zemienēs, kamēr augstākās vietas ir Austrumkursas augstienē un Rietumlatvijas teritorijā, tādejādi pamatiežu un mūsdienu reljefa virsmas raksturs ir salīdzinoši līdzīgs (Brangulis un Konšins, 2002). Pamatiežu virsmu lielā mērā veidojusi pleistocēna segledāju erodējošā un akumulējošā darbība, saglabājot nosacītas sākotnējā reljefa iezīmes (Brangulis u.c., 2000), ledāja erodējošajai darbībai vairāk izpaužoties līdzenumos nekā augstieņu reģionos.

Mezozoja nogulumiežu sega Latvijas teritorijā ir izsekojama fragmentāri, kas skaidrojams ar to, ka šajā laikposmā Latvijas teritorijas lielākajā daļā bija sauszemes apstākļi. To izplatību vēl vairāk ierobežoja pleistocēna apledojumu eksarācija. Mezozoja nogulumi kopā ar paleozoja griezumā augšējo daļu, karbona un perma slāņkopu, ir izsekojami Kurzemes DR daļā un Baltijas jūras akvatorijā (Brangulis u.c., 2000). No mezozoja nogulumiem vispilnīgākais griezumā ir juras sistēmai, pārējo sistēmu griezumā ir nepilnīgi (Brangulis u.c., 2000).

Kvartāra nogulumi veido nogulumiežu segas visjaunāko griezumā daļu, kas lielā mērā veidojusies pleistocēna segledāju erozijas, nogulumu akumulācijas un kontinentālās denudācijas rezultātā. Salīdzinājumā ar pirmskvartāra nogulumiem kvartāra nogulumi pētīti ievērojami detalizētāk. Kvartāra nogulumiem ir raksturīga sarežģīta ģeoloģiskā uzbūve, kur izsekojams liels daudzums maza mēroga glaciotektonisko struktūru un tiem raksturīga ievērojama heterogenitāte. Līdz ar to kvartāra ģeoloģiskā uzbūve ir jāapskata kā atsevišķs uzdevums individuāli.

2.2. Ģeoloģiskās uzbūves attīstības posmi

Latvijas nogulumiežu sega ir attīstījusies vairāku tektonisko ciklu laikā, kur, pamatojoties uz ģeoloģiskās uzbūves īpatnībām un izsekojamajām diskordancēm starp stratigrāfiskajām vienībām, tiek izdalīti atsevišķi struktūrstāvi (Brangulis un Konšins, 2002).

Slāņkopu telpisko raksturojumu lielā mērā veido to biežuma sadalījuma un formas izmaiņas dažādu ģeoloģisko procesu rezultātā. Reģionālā mērogā galvenie ir tektoniskie un sedimentogēnie procesi, kur tektonisko procesu ietekme visvairāk atspoguļojas slāņkopu formas un tilpuma izmaiņās, kas izpaužas jau kā deformāciju gala produkts (Ragan, 1985).

Latvijas teritorijā lūzumiem ir būtiska loma pamatklintāja un nogulumiežu segas uzbūvē (Брангулис, 1985; Brangulis un Konšins, 2002). Nogulumiežu segas attīstības laikā izveidojušies lūzumi šķeļ gan nogulumiežu segu, gan arī pamatklintāja iežus. Tomēr ne visā tās biežumā, jo lielākā daļa lūzumu ir konstatējami pamatklintāja virsmā un Kaledonijas struktūrstāva iežos, kamēr Hercīnijas un Alpu struktūrstāvu iežos ir sastopams salīdzinoši neliels skaits lūzumu (*ibid*).

Baikāla un Kaledonijas struktūrkompleksa iežos lūzumu struktūras visbiežāk izpaužas kā nomati, retāk kā pārbīdes un reversie lūzumi. Daļa no šiem lūzumiem Hercīnijas un Alpu struktūrkompleksa iežos izsekojami kā mazas amplitūdas nomatu sērijas (Ņikuļins, 2007). Vislielākā disjunktīvā dislokācija Latvijas sauszemes teritorijā ir Liepājas – Rīgas – Pleskavas lūzumu zona, kas konstatējama gan kristāliskā pamatklintāja virsmā, gan nogulumiežu segā, ar zonas vidējo platumu 10 – 20 km. Maksimālie vertikālie pārvietojumi sasniedz 700 m un ir konstatēti Latvijas R un ZA daļā. Centrālajā daļā maksimālie pārvietojumi ir līdz 150 m un lūzumu garums svārstās aptuveni 100 – 150 km robežās (Brangulis un Konšins, 2002).

Kvartāra segā lūzumu diagnosticēšana ir ievērojami komplicētāka, jo tās nogulumus veido vāji konsolidēta nogulumu sega, kur katram atsevišķam nogulumu tipam ir ierobežota izplatība.

Kristāliskajā pamatklintājā Latvijas teritorijā tiek izdalīti divi tektoniskie attīstības etapi: Svekofennas struktūrstāvs un platformas stabilizācijas etaps. Savukārt nogulumiežu segas uzbūve ir ievērojami sarežģītāka, – nogulumiežu segā ir izsekojami četri (Baikāla, Kaledonijas, Hercīnijas un Alpu) struktūrstāvi, kas savstarpēji ir nodalāmi ar sedimentācijas pārtraukumiem (Brangulis un Konšins, 2002; Brangulis u.c., 2000).

2.2.1. Kristāliskais pamatklintājs

Kristāliskajam pamatklintājam ir sarežģīta blokveida uzbūve, kur bloki savstarpēji ir atdalīti ar lūzumiem un lūzumu sistēmām (Brangulis un Konšins, 2002). Visi lūzumi, kas veidojušies pirms kembrija, neatspoguļojas pamatklintāja virsmā. Daļa no tiem ir nosakāma pamatklintāja iežos pēc ģeofizikālo lauku izmaiņām, kur lūzumi ir izsekojami pēc izteiktām magnētiskā lauka īpatnībām un gravitācijas lauka izmaiņām. Savukārt lūzumi, kas atspoguļojas pamatklintāja virsmā, ir veidojušies jau vēlākos tektoniskajos etapos, kur tie šķeļ gan nogulumiežu segu, gan pamatklintāju (*ibid*).

Kristāliskā pamatklintāja Svekofennas struktūrstāvs aptver Latvijas pamatklintāja lielāko daļu. Tajā ir izsekojami Rietumlatvijas un Latvijas granulītu bloki, kas ir arī senākās pamatklintāja virsmas sastāvdaļas Latvijas teritorijā (Brangulis un Konšins, 2002). Platformas stabilizācijas posma ieži ir izsekojami tikai Rietumlatvijā. Salīdzinot ar Svekofennas

struktūrstāvu, šai stāvā ir lielāka iežu dažādība – sastopami arī anortozīti, kvarca mangerīti un gabrolīti, kas ir intruzīvie veidojumi (*ibid*).

Lūzumu struktūras pamatklintāja virsmā un visā pamatiežu griezumā ir līdzīgas un Latvijas teritorijā reģionālā mērogā lūzumu līniju telpiskā orientācija telpā ir ZA-DR. (Ņikuļins, 2007). Virsmas saposmojums gar pamatklintāja lūzumiem ir izteikts un heterogēns, kur iežu bloku pārvietojums variē no 0 m līdz 100 m Latvijas D daļā un līdz 600 m ZA daļā gar Smiltenes – Apes lūzumu. Zināmais pamatklintāja virsmas raksturs Latvijas austrumdaļā, Latvijas sedlienes teritorijā ir krietni vienmērīgāks (Brangulis un Konšins, 2002; Brangulis u.c., 1998), kas varētu būt skaidrojams ar ierobežotiem pieejamajiem virsmu raksturojošajiem datiem.

2.2.2. Baikāla struktūrkomplekss

Nogulumiežu segas vecākais struktūrkomplekss ir Baikāla struktūrkomplekss. Struktūrstāvu veidojošie ieži atbilst venda kompleksa un apakškembrija Lontovas svītas nogulumiem, kur venda kompleksa iežus veido vulkanogēnie un nogulumieži. Šis komplekss ir konstatēts tikai atsevišķās Latvijas teritorijas daļās, t.i., Latvijas austrumdaļā, kur tā biezums nepārsniedz 300 m, un rietumdaļā, kur tas sastopams nelielās teritorijās sauszemē un piekrastes akvatorijā, tā biezums ir līdz 50 m, kā rezultātā šī struktūrkompleksa izpēte ir ierobežota (Brangulis un Konšins, 2002; Brangulis u.c., 1998).

Šajā laikā Latvijas teritorijas lielākā daļa bija sauszeme ar lokāliem sedimentācijas baseiniem Latvijas A daļā, kur iespējama nogulumiežu veidošanās. Situācija mainījās, kad vēlā venda un kembrija Lontovas laikposmā norisinājusies intensīva pamatklintāja grimšana, kā rezultātā pieauga terīgēno iežu uzkrāšanās intensitāte. To apstiprina iežu kompleksa salīdzinoši lielais terīgēno nogulumu biezums, kas Kurzemes ZR daļā un Baltijas jūras akvatorijā, dēļ mazākas pamatklintāja iegrimis ir līdz 30 m biezumā, savukārt Latvijas DA teritorijā tas sasniedz gandrīz 100 m biezumu (*ibid*).

2.2.3. Kaledonijas struktūrkomplekss

Baikāla struktūrkompleksam diskordanti uzguļošais Kaledonijas struktūrkomplekss ir izsekojams visā Latvijas teritorijā, kā arī Baltijas jūras akvatorijā. To veido kembrija, ordovika, silūra un apakšdevona Gargždu sērijas nogulumi. Kaledonijas struktūrstāvs ir samērā plaši pētīts, tādēļ šim struktūrkompleksam konstatēta sarežģīta uzbūve ar raksturīgiem lūzumu un lokālpacēlumu veidotiem struktūrelementiem (Brangulis un Konšins, 2002).

Kaledonijas struktūrstāvs mantojis reģionālo tektonisko raksturu, tādēļ katrā nākošajā tektoniskajā etapā tika reaktivēta daļa jau esošo pamatklintāja lūzumu. Virsmas telpiskās uzbūves struktūra ir līdzīga kā pamatklintājā (*ibid*). Lūzumu reaktivācija aizsākās silūra beigās, iezīmējot Kaledonijas kalnu veidošanās aizsākšanos, kad iežu bloki tika pacelti gar lūzumu virsmām, un pacēlumi ir raksturīgi lūzumu ziemeļu pusē. Šīs selektīvās pacelšanās rezultātā daļa silūra iežu nonāca zemes virspusē un tika pakļauti erozijai. Tāpat ir pazīmes, kas norāda par šo kustību turpināšanos līdz pat devona Pērnavas laikam (*ibid*).

Kembrija nogulumu virsmai ir raksturīgas izteismīgas absolūto augstuma atzīmju svārstības, un tā virsma lielā mērā atkārtoti kristāliskā pamatklintāja reljefu. Absolūtās augstuma atzīmes svārstās no aptuveni 300 m z.j.l. Latvijas ZA līdz 1600 m z.j.l. DR teritorijā, ar raksturīgu kopīgo reģionālo pazemināšanās DR virzienā. Kembrija slāņkopas biežumu lielā mērā nosaka paleoģeogrāfisko apstākļu diferenciācija Baltijas reģionā senās Austrumeiropas platformas R daļā, periodiski mainoties sauszemes un jūras apstākļiem (Ulste, 1961a). Kembrija sākumā Latvijas A teritorijā dominēja sekli baseini, savukārt Baltijas jūras un Latvijas R daļā bija sauszemes. Dziļākais sedimentācijas baseins veidojās uz ZA-A no Latvijas teritorijas (*ibid*).

Agrā kembrija beigās līdz viduskembrijam norisinājušies vairāki jūras transgresijas un regresijas cikli, bet Latvijas teritorijā lielākoties saglabājās sekla jūras apstākļi. Tikai Latvijas R daļā un Baltijas jūras akvatorijā pastāvēja dziļāka baseina apstākļi. Kembrija beigu posma nogulumu iespējams erodēti vēlā kembrija beigu posmā, par ko liecina fakts, ka augškembrija nogulumu Latvijā pagaidām nav ticami konstatēti (Ulste, 1961a; Ulste, 1961b).

Ordovika karbonātisko nogulumu dziļums Latvijas DR ir ap 1600 m z.j.l., bet ZA ap 300 m z.j.l., tādējādi virsmas reljefā saglabājot kristāliskā pamatklintāja un kembrija slāņkopas virsmu raksturu. Šo nogulumu biežums ievērojami mainās no 50 – 100 m Z daļā līdz aptuveni 250 m D daļā. Ordovika nogulumu veidojušies jūras apstākļos, mainoties no sekla jūras līdz relatīvi dziļas jūras apstākļiem. Līdz vēlā ordovika beigās apstākļi mainījās – norisinājās globāla regresija, kā rezultātā Latvijas teritorijā bija sedimentācijas pārtraukums, un visa teritorija kļuva par sauszemi (Ulste, 1961b).

Silūra nogulumu sastopami gandrīz visā apskatāmajā teritorijā, izņemot Inčukalna un Valmieras-Lokno valni Latvijas DA (Гайлите и др., 1987). Silūra virsmas dziļums mainās DR virzienā no 160 m z.j.l. līdz 1000 m z.j.l. DR daļā, bet tās biežums no aptuveni 15 m teritorijas A daļā, kur, līdzīgi kā ordovika nogulumiem, konstatēts nepilnīgs griezum, izsekojot tikai Landoveras un Venlokas laika nogulumus, līdz 650 m R daļā, kur griezum ir pilnīgs. Silūra nogulumu veidojušies dažāda dziļuma jūras apstākļos, tikai atsevišķos baseina

attīstības posmos veidojot sauszemes teritorijas, kā rezultātā Latvijas austrumu un centrālajā teritorijā daļa griezuma ir denudēta (Гайлите и др., 1987).

2.2.4. Hercīnijas struktūrkomplekss

Hercīnijas, tāpat kā Kaledonijas struktūrkompleksa ieži, ir sastopami visā Latvijas sauszemes teritorijā. Komplekss ietver nogulumiežus sākot ar devona perioda Gargždu sērijas un Ķemeru svītas, līdz apakškarbona nogulumiem, tos ieskaitot. Šī struktūrkompleksa biezums mainās no 100 līdz 900 m (Brangulis u.c., 2002). Hercīnijas struktūrstāvs pēc uzbūves ir vienkāršāks nekā Kaledonijas, tajā pagaidām ir izsekojama tikai neliela daļa reaktivēto Kaledonijas struktūrstāva lūzumu, kā arī daži jaunveidoti lūzumi, gar kuriem izsekojamas uzbīdījumu struktūras (*ibid*). Nelielo lūzumu skaitu Hercīnijas struktūrstāva iežos sauszemes teritorijā var skaidrot ar iepriekš veikto pētījumu zemo detalizācijas pakāpi. Par to liecina vēlākos pētījumos Rīgas jūras līcī un Baltijas jūras Latvijas akvatorijā veiktie seismoakustiskie pētījumi, kur konstatēti jauni lūzumi un lūzumu zonas (Brangulis u.c., 1998; Ņikuļins, 2007). Lūzumu reaktivācija ir sākusies vidusdevona sākumā, kas turpinājusies arī Amatas laikposmā, kur pārvietojumi gar lūzumiem salīdzinot ar Kaledonijas struktūrstāvu, ir ievērojami mazāki. Galvenās Hercīnās krokošanās fāzes ir norisinājušās karbona periodā (Brangulis u.c., 1998), kuru rezultātā sakrokoti arī devona nogulumi. Tajos konstatējamas arī lūzumu sistēmas. Vidusdevona baseina inversija daļēji nosaka to, ka apakšdevona un vidusdevona slāņkopai plānā raksturīgs mainīgs biezums, kur novērojamas kopīgas laterālas biezuma izmaiņas, kā arī biezuma izmaiņas gar lūzumu plaknēm.

Devona karbonātiskie un terīgēnie nogulumieži veidojušies galvenokārt jūru, lagūnu vai piekrastes līdzenumu apstākļos (Сорокин и др., 1981). Zemes garozas svārstību kustības veicināja vairāku jūras transgresiju un regresiju režīmu maiņu, kas noteica sedimentācijas vides režīma izmaiņas (Brangulis u.c., 1998; Сорокин и др., 1981). No karbona slāņkopas Latvijas teritorijā konstatējami tikai apakškarbona nogulumi nelielā teritorijā Latvijas D daļā un jūras akvatorijā, kur to maksimālais biezums nepārsniedz 80 m. Šo nogulumu piederība karbonam vēl ir diskutabla, jo Latvijas teritorijā nogulumos nav atrastas raksturīgās fosilijas (Сорокин и др., 1981).

Silūra beigās visa Baltijas teritorija bija pacelta, un grimšana atjaunojās devona periodā visu Latvijas teritoriju aptverot tikai vidusdevona otrajā pusē. Latvijas ieliece attīstījās kā vienots grimšanas apgabals, ko pamato maksimālā sedimentācijas apgabala novietojums un nosacīti arī pamatklintāja reljefs. Vidusdevona otrajā pusē un beigās Valmieras – Lokno vaļņa reģionā norisinājās intensīva teritorijas grimšana. Tas iespaidoja arī pamatklintāja virsmas

raksturu, izlīdzinoties pamatklintāja vaļņveida struktūrai gar Latvijas un Igaunijas austrumu robežām (Brangulis u.c., 2002).

Augšdevona Famenas laikmetā Latvijas teritorijas A daļa ievērojami pacēlās virs baseina ūdens līmeņa, tikmēr Latvijas DR daļā turpinājās teritorijas grimšana, kur par vertikālām kustībām liecina ievērojamais klastiskā materiāla daudzums nogulumos (Сорокин и др., 1981).

2.2.5. Alpu struktūrstāvs

Hercīnijas struktūrkompleksa iežiem uzgulošie Alpu struktūrkompleksa ieži aptver augšperma, apakštriasa un augšjuras nogulumiežus, kā arī kvartāra slāņkopu. Izņemot kvartāra nogulumus, Alpu struktūrkompleksa nogulumi sastopami tikai Kurzemes teritorijas dienvidrietumos un Baltijas jūras teritorijā ļoti ierobežotā laukumā (Brangulis un Konšins, 2002). Šī struktūrstāva nogulumu biezums nepārsniedz aptuveni 120 m neskaitot kvartāra slāņkopu. Virsmai ir raksturīgs monoklināls sagulums ar lēzenu reģionālo kritumu, aptuveni 0,5 m uz 1 km, DR – ZA virzienā (Brangulis u.c., 1998).

Kvartāra nogulumu veido nogulumiežu segas visjaunākos nogulumus, kas lielākoties veidojušies pleistocēna segledāju erozijas un nogulumu akumulācijas, kā arī kontinentālās denudācijas rezultātā, veidojot ļoti sarežģītu ģeoloģisko griezumus. Mūsdienu neotektoniskās kustības ir cieši saistītas ar glacioizostātiskajām kustībām, ko izraisa pēdējā apledošanas ledāja segas radītā spiediena izlīdzināšanās. Šo kustību amplitūda ir salīdzinoši neliela ar maksimālo amplitūdu 2 līdz 5 mm gadā, kas konstatēta Latvijas teritorijas sauszemes daļā (Nikuļins, 2007; Suveizidis et al., 1994).

3. MATERIĀLI UN METODEDES

3.1. Izmantotie materiāli, to sagatavošanas un apstrādes metodika

3.1.1. Pētījumā izmantotie dati un materiāli

Maģistra darbā izklāstītas ar tā tēmu saistītās literatūras studijas un esošās ģeoloģiskās informācijas izvērtējums un analīze. Tika apkopota un izvērtēta informācija par Latvijas ģeoloģisko uzbūvi un strukturālo raksturojumu, kā arī par ģeoloģisko struktūru trīsdimensiju modelēšanu, t.i., to realizācijai pieejamajām metodēm, slāņkopu biezumu analīzes un ģeoloģiskās nenoteiktības izvērtēšanas metodiku.

Pētījuma realizācijai tika apkopots un digitāli apstrādāts pieejamais kartogrāfiskais materiāls no ģeoloģiskajām kartēm 1:50 000, 1:200 000, 1:500 000 1:1 500 000 mērogā, kā arī apkopota un analizēta pieejamā urbumu ģeoloģiskā informācija no Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra (turpmāk tekstā – LVĢMC) izstrādātās urbumu datubāzes „URBUMI” (turpmāk tekstā – urbumu datubāze) (LVĢMC, bez dat.).

Maģistra darba ietvaros apstrādātais un izmantotais kartogrāfiskais un faktiskais ģeoloģiskais materiāls ietver:

- Valsts ģeoloģijas dienesta izdotās ģeoloģiskās kartes:
 - pamatklintāja virsmas reljefa karte 1:1 500 000 mērogā (Pamatklintāja virsma 500K);
 - ordovika virsmas reljefa karte 1:1 500 000 mērogā (Ordovika virsma 500K);
 - vidusdevona Pērnavas svītas virsmas reljefa karte 1:1 500 000 mērogā (Pērnavas virsma 500K);
 - augšdevona Amatas svītas virsmas reljefa karte 1:1 500 000 mērogā (Amatas virsma 500K);
 - zemkvartāra virsmas reljefa karšu lapu mozaīka M 1:1 500 000 (LVGD Zemkvartāra);
 - pirmskvartāra nogulumu karšu lapu mozaīka 1:200 000 mērogā (LVGD Pirmskvartāra);
 - Kaledonijas struktūrkompleksa tektoniskā karte 1:1500 000 mērogā (Kaledonijas struktūrkomplekss 500K);
 - Hercīnijas struktūrkompleksa tektoniskā karte M 1:1 500 000 mērogā (Hercīnijas struktūrkomplekss 500K);
- stratigrāfisko un litoloģisko vienību punktveida dati no LVĢMC datubāzes „URBUMI” (LVĢMC, bez dat.);
- CIGAR SRTM V4.1 digitālais reljefa modelis (Jarvis et al., 2008).

Izmantoto datu avots, tips un prioritārais iedalījums pēc to detalizācijas un izmantošanas mērķa

(sagatavojis autors)

Avots	Tips	Detalizācija	Prioritāte	Mērķis
Urbumi	Slāņu virsmu augstuma atzīmes	Vertikālā detalizācija 0,5-10 m	1	Slāņu virsmu ģenerācija un rezultātu kontrole
Urbumi	Slāņu biezumi	Vertikālā detalizācija 0,2-10 m	1	Slāņu biezumu ģenerācija un rezultātu kontrole
Urbumi	Stratigrāfiskais iedalījums	Svītu līdz nodaļu izšķirtspēja	1	Modeļa stratifikācijas izveide
Kartogr. materiāls	Lūzumu novietojums pēc struktūrkartēm	M 1:1 500 000	1	Lūzumu iestrāde modelī
Kartogr. materiāls	Struktūrvirsmu reljefa dati no struktūrkartēm	M 1:1 500 000; izolīniju solis: 100, 25, 10 m	2	Slāņu virsmu ģenerācija
Kartogr. materiāls	Nogulumu izplatības poligoni	M 1:200 000	3	Slāņu izplatības apgabalu definēšana
Karto-shēmas	Nogulumu izplatības poligoni	M 1:2 000 000 un lielāks	4	Slāņu izplatības apgabalu definēšana

Šie materiāli savstarpēji atšķiras gan pēc to tipa, gan pēc ietvertās ģeoloģiskās informācijas detalizācijas pakāpes, mēroga un prioritārā iedalījuma pētījuma realizācijā (3.1.tabula). Prioritātes iedalījums balstīts uz datu izvērtējuma pēc izmantoto datu kopu nozīmes modeļa izveidē. Augstākās prioritātes dati ir urbumu informācija, kas tieši izmantota modeļa ģeometrijas izveidē, kā arī struktūrkāršu tektonisko lūzumu novietojuma un iežu bloku pārvietojuma informācija. Pamatojot ar zemu horizontālo un vertikālo izšķirtspēju, struktūrkāršu reljefa informācija definēta ar sekundāru nozīmi. Terciārās prioritātes materiāli ir zemkvartāra virsmas nogulumu izplatības areālu informācija. Lai gan šis materiāls ir sagatavots ar augstu detalizācijas pakāpi, tam apvienojumā ar pieejamo urbumu informāciju ir novērojama horizontālā nesaiste, kur daļa urbumu informācijas neatbilst kartē atspoguļotajai informācijai, raksturojot nogulumus ārpus kartes izplatības apgabala. Zemākās pakāpes materiāli, kas izmantoti informatīviem mērķiem ir dažādas nogulumu izplatības kartoshēmas (Brangulis un Konšins, 2002; Гайлите и др., 1987) no iepriekš publicētiem datiem, kas izmantotas apvienojumā ar urbumu informāciju dziļāk iegulošo nogulumu izplatības apgabalu definēšanai.

Kartogrāfiskais materiāls ir manuāli vektorizēts, iegūstot vektordatu punktveida reljefa augstuma atzīmju, izolīniju un lūzumu līniju, kā arī poligonveida svītu izplatības datus. Kartogrāfiskā materiāla digitizēšanas darbos kā patstāvīgs autora veikums jānodala

pamatklintāja un devona Amatas svītas virsmu reljefa karšu izolīniju un lūzuma līniju digitizēšana un pirmskvartāra nogulumu izplatības karšu lapu mozaīkas digitizēšana.

LVĢMC urbumu datubāze „Urbumi” ir veidota uz *ORACLE* datubāzu platformas, kas satur informāciju par Latvijas teritorijā esošo ģeoloģiskās kartēšanas, izpētes, ekspluatācijas un struktūrmeklēšanas urbumu administratīvo piederību, topogrāfisko un ģeoloģisko informāciju. Datubāzē uzkrātā ģeoloģiskā informācija ietver stratigrāfiju, litoloģiju, ģeofizikālās izpētes rezultātus un pielietoto ģeofizikālo analīžu veidus, kā arī hidroģeoloģisko parametru datus – pazemes ūdeņu horizontu ūdens līmeņus, iežu filtrācijas parametrus un pazemes ūdeņu ķīmiskā sastāva datus kopumā aptuveni 26 tūkstošos urbumu (LVĢMC, bez dat.).

Digitālais Zemes virsmas reljefa modelis ar horizontālo izšķirtspēju 90 m un vertikālo 16 m (Jarvis et al., 2008) izmantots modeļa topogrāfiskās pamatnes sagatavošanai, kas modelī iestrādāta kā kvartārsegas virsmas reljefs.

3.1.2. Kartogrāfisko datu sagatavošana un apstrāde

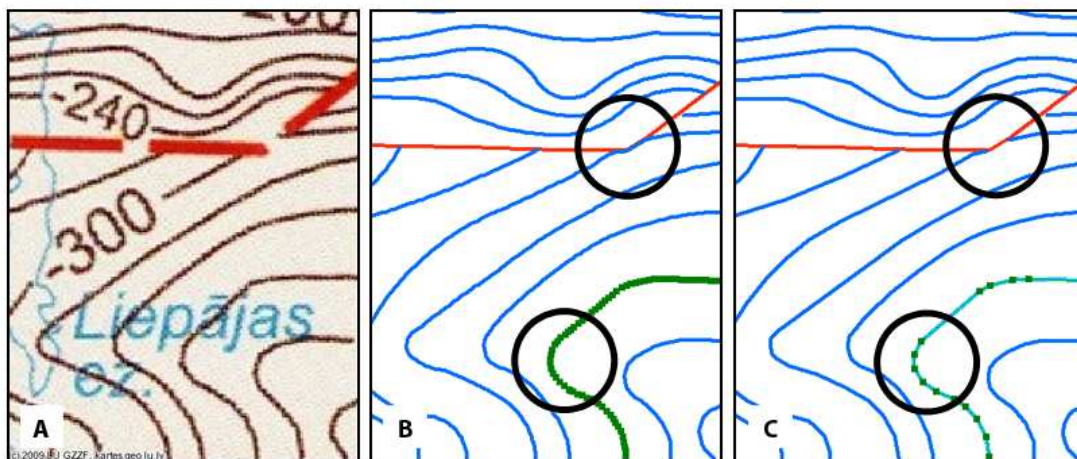
Datu kārtošana, apstrāde un statistiskie aprēķini tika veikti, izmantojot *MS OFFICE EXCEL* un *R* datorprogrammas. Kartogrāfiskā materiāla sagatavošanai, datu digitizēšanai un apstrādei izmantota *ESRI ArcGIS* datorprogrammu saimes *ArcGIS Desktop 9.3* datorprogramma ar ArcInfo licenci. Urbumu informācijas atlasei no datubāzes, to apstrādei un vienkāršajiem aprēķiniem izmantota *MySQL* datubāzu saskarnes datorprogramma *HeidiSQL*.

Ņemot vērā lielo datu apjomu, vektorizētie kartogrāfiskie rastra un vektordati tika pārnesti uz jaunizveidoto *ArcGIS* ģeodatubāzi (Jātnieks u.c., 2011), kas nodrošina nepieciešamo datu uzkrāšanu un uzturēšanu vienkopus, kā arī atvieglo to pārnesi uz citiem nepieciešamo datorprogrammu failu formātiem. Ģeodatubāzē iespējams veikt ciparoto datu verifikāciju, kas nodrošina dažādu ar datu digitizēšanu saistīto problēmu un kļūdu (gan datorprogrammas radīto, gan lietotāja pieļauto) automātisku risināšanu (ArcGIS, bez dat.; Tacher et al., 2006).

Veicot agrāk publicēto kartogrāfisko materiālu vektorizēšanu, ir jārīsinā vairākas problēmas, kas iedalāmas sekojošās kategorijās:

- dažādas izšķirtspējas datu harmonizācija un pēcapstrāde;
- datu ievades kontrole, ievadīto datu verifikācija;
- vektorizēto datu ģeneralizācija;
- topoloģiska rakstura problēmu risināšana, piemēram, līniju paškrustošanās;
- ģeoloģisko struktūru raksturojošo datu nepilnīgums.

Veicot datu vektorizēšanu, katram datu avotam tika veikta ievades kontrole, pārbaudot pieļaujamo vērtību diapazonu un „nulles” vērtības, kur tās nav pieļaujamas, piemēram, vektorizētas virsmas izolīnijas bez augstuma atzīmju atribūtiem (Jātnieks, u.c., 2011). Izmantojot *ArcGIS* līklīnijas rīku ciparoto elementu atspoguļošanai iegūtais punktu blīvums ievērojami pārsniedz reprezentablo skaitu, tādēļ nepieciešams veikt datu ģeneralizāciju reducējot līniju veidojošo verteksu (punktu) skaitu līdz apjomam, kas apskatāmajā mērogā atbilstoši reprezentē ģeometriskos elementus, bet ir tehniski vienkāršotāks, izmantojot 50 m toleranci starp punktiem (3.1.att.) (Jātnieks u.c., 2011).



3.1.attēls. Kartogrāfiskā materiāla vektorizēto datu ģeneralizācijas un topoloģisko problēmu automātiskas korekcijas piemērs (sagatavojis autors). A – fragments no augšdevona Amatas svītas struktūrkartes, B – vektorizētas izolīnijas un lūzuma līnijas, kur ar melnu krāsu apvilktas izolīniju verteksu blīvuma un līniju krustošanās problēmvietas, C – ģeneralizētas izolīnijas un atrisināta līniju krustošanās.

Primārās pētījumā sastopamās problēmas, kam topoloģijas verifikācija nodrošina automātisku labošanu, ir (*ibid*):

- vektorizēto līniju (izolīnijas, lūzumu un profilu līnijas) savstarpējā krustošanās, paškrustošanās un dubultošanās;
- digitizēto poligonu pārklāšanās un blakus esošo poligonu nesakļaušanās gar kopējām robežām;
- daudzdaļīgu objektu nepieļaušana, piemēram, vienādu vērtību augstuma izolīniju saposmju vietās, kur tas nav nepieciešams, vai blakus esošu poligonu izveide ar identiskiem atribūtiem;
- datu telpiskās tolerances ievērošana darbā ar vairākiem slāņiem, kur objekti dažādos slāņos, kuriem ir vienotas robežas, savstarpēji nepārklājas, bet sakļaujas gar šo robežu.

Strādājot ar *ArcGIS* ģeodatubāzes topoloģijas validēšanas iespējām, lai nepieļautu un likvidētu topoloģijas kļūdas, jānodrošina sekojoša darba kārtība iepriekš aprakstīto topoloģijas problēmu automātiskai labošanai (Jātnieks u.c., 2011; Zanchi et al., 2009):

- pēc datubāzes izveidošanas katrs jaunais slānis tiek pievienots topoloģijai, un norādīti katram slānim individuāli un vairāku slāņu objektu savstarpējie noteikumi;
- dati tiek validēti, izmantojot iestrādātās ArcGIS topoloģijas validēšanas iespējas, kas veic iepriekš aprakstīto topoloģiska rakstura problēmu automātisku labošanu un rezultātu verifikāciju;
- jāveic manuāla koriģēto datu pārbaude ar mērķi koriģēt nevēlamus automātiskos labojumus vai automātiski nekonstatētās kļūdas.

Izmantojot ArcGIS datorprogrammu un precīzi ievērojot šos soļus, tika saglabāta sākotnējo materiālu detalizācija un sagatavots kvalitatīvs vektordatu materiāls turpmākajam pētījumam (Jātnieks u.c., 2011).

3.1.3. Urbumu datubāzes ģeoloģisko datu sagatavošana un apstrāde

LVĢMC urbumu datubāze no oriģinālās *ORACLE* datubāzu platformas tika transformēta uz *MySQL* platformu, tādējādi uzlabojot savietojamību ar pētījumā lietotajām modelēšanas un vizualizācijas datorprogrammām. Darbam ar datubāzi apgūta *MySQL* sintakse datu pieprasījumu izveidei, datu atlasei un datu eksportam no datubāzes uz dažādiem nepieciešamajiem datu failu formātiem. Urbumu numurus, X, Y un slāņu virsmu Z, un biežumu vērtības iegūtas, atlasot pēc ģeoloģiskajiem indeksiem urbumos. X un Y ir urbumu novietojuma koordinātes LKS92 koordināšu sistēmā, Z ir slāņu absolūtā augstuma atzīmes metros v.j.l.

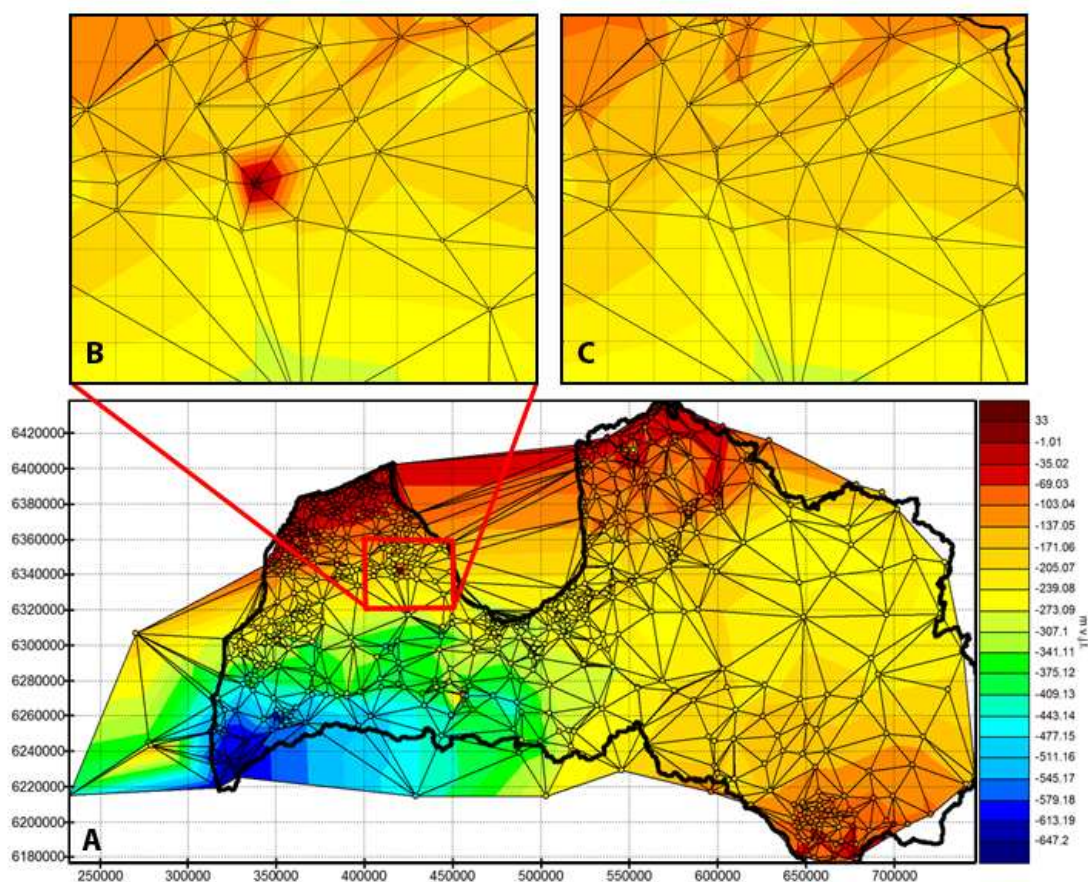
Urbumu datubāzē ir sastopami kļūdaini ģeoloģiskās informācijas ieraksti. Kļūdainās stratigrāfisko vienību nosaukuma, augstuma un biežuma vērtības, par kurām liecina anomālas un nepamatotas vērtību svārstības nelielā laukumā, konstatējamas, izveidojot no šiem datiem TIN datu modeli (3.2. att. – A) (Popovs u.c., 2011), kur zināmo punktu X, Y un Z koordinātes tiek piešķirtas TIN režģi veidojošajiem punktiem. TIN datu modelis tiek veidots, savienojot datu veidojošos punktus ar līnijām, tādējādi izveidojot savstarpēji savienotu trijstūru tīklu, kuru malas nekrustojas (*ibid*). Šādi izveidotam modelim telpiskā tolerance balstīta uz ievades datiem, kas ļauj vizuāli novērtēt datu savstarpējo attiecību un noteikt anomālas vērtības (3.2. att. – B) (Groshong, 2006). Konstatējot anomālas vērtības, tās tiek izslēgtas no turpmākajai apstrādei lietotās datu kopas (3.2. att. – C).

Urbumu datubāzes stratigrāfisko indeksu klasifikatorā ietilpst 778 indeksi, starp kuriem ir ne tikai tādi, kas definē vienu konkrēto stratigrāfisko vienību, piemēram, D_{3gj}, bet arī tādi, kas ietver pārejas starp divām un vairākām stratigrāfiskajām vienībām, piemēram, D_{2nr} – D_{3gj}-am (LVĢMC, bez dat.). Lai nezaudētu ģeoloģisko informāciju, pamatojoties uz

izstrādāto modeļa stratifikāciju (sīkāk apskatīts 5. nodaļā), nodalītas divas stratigrāfisko indeksu kopas:

- stratigrāfisko indeksu kopa, kas satur klasifikatora kodus, kas viennozīmīgi saistāmi ar pieņemtās modeļa stratifikācijas slāņiem (turpmāk tekstā – noteiktie indeksi);
- stratigrāfisko indeksu kopa, kas satur klasifikatora kodus, kas nav viennozīmīgi piederīgi vienam modeļa stratifikācijas slānim (turpmāk tekstā – nenoteiktie indeksi).

Noteikto indeksu kopā iekļauti tikai tie indeksi, kas atbilst izdalītajai stratifikācijai vai veido daļu no stratifikācijas vienības, tajā iekļaujoties. Šī datu kopa ir primārā un izmantota slāņu biezumu atlasei, analīzei un interpolācijai, kā arī modeļa ģeometrijas konstruēšanai.



3.2. attēls. Vidusdevona Narvas svītas virsmas TIN modelis (sagatavojis autors). TIN modelis izveidots no 1077 urbumu augstuma atzīmju punktiem. A – TIN modelis; B – modeļa apgabals ar konstatēto anomālo vērtību; C – TIN modelis, no kā veidojošo datu kopas izskausta anomālā vērtība.

Nenoteikto indeksu kopu veido tie indeksi, kas atbilst vairākām izdalītajām stratifikācijas vienībām, cieši neiekļaujoties vienas vienības robežās. Šī datu kopa izmantota kā atbalsta dati modeļa izveidē un verificācijā, izmantojot stratigrāfisko indeksu slāņu augšējo un apakšējo robežu Z vērtību datus tikai pie nosacījuma, ka šo stratigrāfisko vienību robežas sakrīt ar izstrādātās modeļa stratifikācijas slāņu robežām.

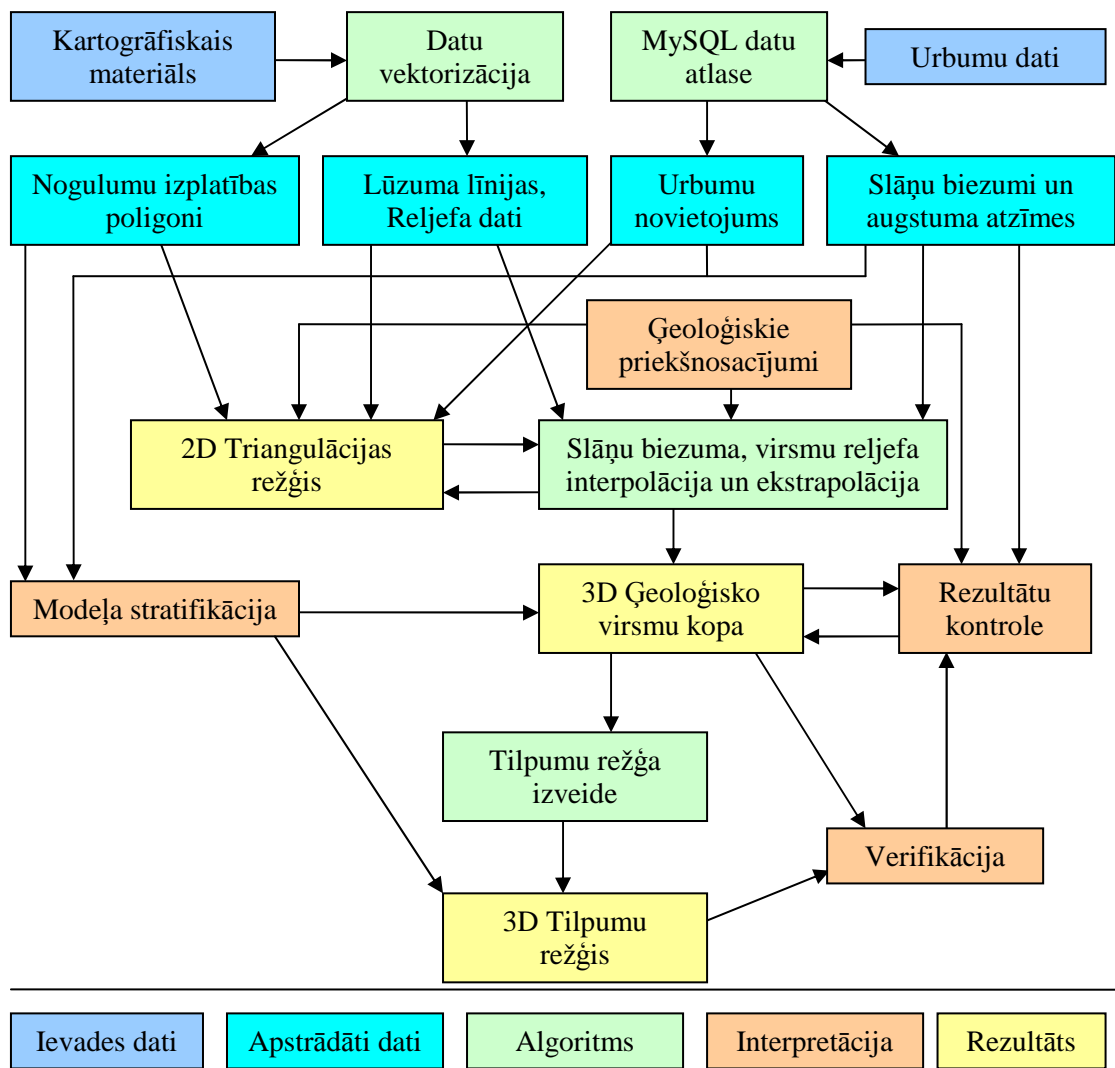
Modeļa stratifikācija izveidota, balstoties uz izstrādāto Latvijas nogulumiežu stratigrāfisko shēmu (Stinkulis, 2003), zemkvartāra nogulumiežu izplatības karti, publicētajām Kaledonijas un Hercīnijas struktūrkompleksu tektoniskajām kartēm (Brangulis un Konšins, 2002) un urbumu datubāzes stratigrāfisko vienību klasifikatoru. Analizējot klasifikatora ierakstu detalizāciju un atbilstību stratigrāfijas shēmai, kā arī klasifikatorā ietverošo indeksu sastopamību urbumu vertikālā griezumā aprakstā un šo urbumu telpisko izkliedi Latvijā teritorijā, modelī atspoguļotās stratigrāfiskās vienības ģeneralizētas līdz modeļa telpiskajai izšķirtspējai. Tās apvienotas līdz sistēmu, nodaļu, reģionālo stāvu, svītu un svītu kopu izšķirtspējai. Pamatojoties uz šiem kritērijiem, izstrādātajā modeļa stratifikācijā izdalīts 31 slānis.

Modeļa izveide balstās uz nogulumu biezumu interpolāciju. No urbumu datu kopas katra slāņa ietvaros tika atlasītas tikai tās biezuma vērtības, kas urbuma vertikālajā griezumā ir pārstāvētas pilnā biezumā, tas ir, kam seko dziļāk ieguļošais slānis un eksistē pārsedzošais slānis. Modeļa izveidē netika iekļautas tehniski nekorektās biezuma vērtības no urbumiem, kuros raksturota tikai daļa no slāņa. No šīs datu kopas slāņu virsmas augstuma atzīmes izmantotas kā atbalsta dati modeļa verifikācijā.

3.2. Ģeoloģiskā modeļa izveides metodoloģija

Ģeoloģiskais modelis izveidots PUMA projekta ietvaros izstrādātajā modelēšanas sistēmā MOSYS, kas paredzēta 3D ģeoloģisko struktūru izveidei un hidroģeoloģisko aprēķinu veikšanai (Seņņikovs, 2011). Rezultātu vizualizēšanai izmantotas datorprogrammas MeshEditor (PAIC, 2002; PAIC, bez dat.*b*), kas paredzēta 2D režģu izveidei, koriģēšanai un reljefa datu vizualizēšanai, un HifiGeo (PAIC, bez dat.*a*), kas izmantota ģeoloģiskās struktūras vizualizēšanai un analīzei.

Modeļsistēmas pamatā ir programmēšanas valoda *python*, ar kuras palīdzību sistēmas darbība tiek abstrahēta no detalizētām operācijām, sniedzot lietotājam šauru to pielietojumu (Downey, 2008). MOSYS modelēšanas sistēmā darbs noris, izmantojot *python* skriptu valodu, kas ļauj veidot atsevišķus ģeoloģiskās struktūras izveides algoritmus, kas sastāv no dažādām operācijām un komandām, vienlaicīgi veicot darbību detaļu dokumentāciju, sniedzot iespēju atkārtoti veikt eksperimentu (Seņņikovs, 2011).



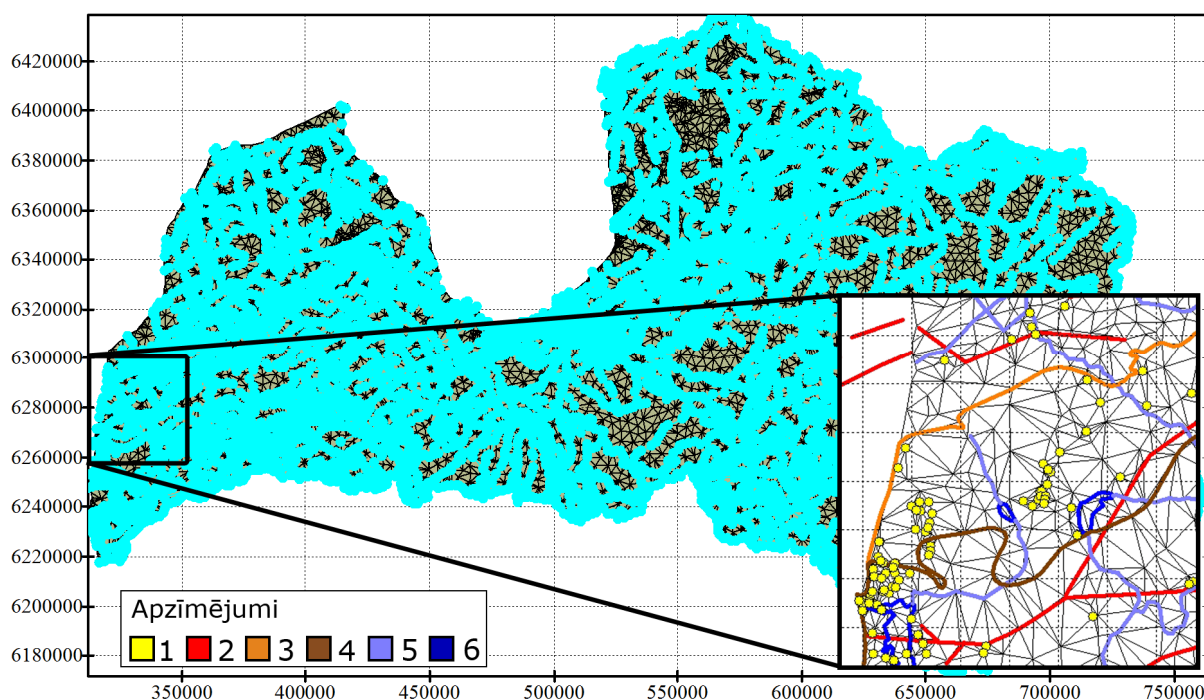
3.3. attēls. Modeļa izveides, verifikācijas un datu implementācijas loģiskā shēma (sagatavojis autors).

Modelēšanas procedūra shematiski attēlota 3.3. attēlā, kurā var izdalīt vairākus secīgus un savstarpēji atkarīgus soļus – ievades datu sagatavošana (sīkāk aprakstīts 3.1.2. un 3.1.3. nodaļās), 2D triangulācijas režģa izveide, virsmu interpolācija un rezultātu kontrole (sīkāk apskatīts 3.2.1. un 3.2.2. nodaļās) un 3D struktūras tilpuma režģa izveide, kontrole un verifikācija (sīkāk apskatīts 3.2.3. nodaļā).

3.2.1. Triangulācijas režģa izveide

Geometriskais modelis tika izveidots, apvienojot 3D ģeoloģisko virsmu datnes, kuru reljefa virsmas atzīmes tiek definētas uz trijstūru režģa krustpunktiem, piešķirot virsmām X, Y un Z koordinātes. Triangulācijas režģis Latvijas teritorijai izveidots, balstoties uz raksturīgām dabiskām robežlīnijām, tādām kā upju līnijas un ezeru kontūras, pieņemtajām ģeoloģiskajām

robežām no nogulumu izplatības kartēm un urbumu punktu novietojuma, pēc kā režģa apgabalos definēta dažāda detalizācijas pakāpe.



3.4. attēls. Modeļa triangulācijas režģa kopskats un tā fragmenta tuvinājums (sagatavojis autors).

Ar gaiši zilo krāsu kopskatā iezīmētas predefinētās režģi veidojošās līnijas. Tuvinājumā: 1 – urbumu punkti, 2 – lūzumu līnijas, 3 – D_{3jn}-ak nogulumu izplatības robeža, 4 – D_{3ktl}-sk nogulumu izplatības robeža, 5 – ūdensteces, 6 – ūdenstilpņu krasta līnijas.

Predefinētās režģi veidojošās līnijas ir (3.4. att.):

- valsts sauszemes robeža;
- upju un jūras robežas, un ezeru krasta līnijas;
- ģeoloģiskajās kartēs definētās izplatības robežas;
- ģeoloģiskajās kartēs definētās tektonisko lūzumu līnijas un aprakto ieleju kontūras.

Režģi veidojošo līniju informācija papildināta ar urbumu novietojuma koordinātēm, lai varētu precīzi salīdzināt izveidotā ģeometriskā modeļa virsmas atzīmes ar urbumu datiem. Apgabali starp režģi veidojošajām līnijām triangulēti, izmantojot delaunija triangulāciju (Delaunay, 1934), t.i., sadalīti trijstūros ar malu garumu ne lielāku par 1 – 4 km, iegūstot kontrolētu režģa detalizāciju, kas ir lielāka apgabalos ar detalizētāku ģeoloģisko informāciju un mazāka apgabalos, kur pieejamā ģeoloģiskā informācija ir mazāka (Seņņikovs, 2011). Triangulācijas režģa trijstūru maksimālais laukums ir 10 km², bet minimālais – 30 m², kopējais režģa punktu skaits ir 16516 punkti.

Apvienojot līnijas, režģa ģeneralizācijā ir ievērota dažāda tolerance, kas pamatota ar datu avota mērogu un šo līniju nozīmi modeļa izveidē. Nogulumu izplatības robežlīnijas, lūzumu līnijas un aprakto ieleju robežas, kurām nereti raksturīga izliekta un dažviet

ievērojami izlocīta forma, ģeneralizētas ar 800 m toleranci. Urbumu punktiem piešķirta 500 m tolerance ar mērķi tos savietot ar režģi veidojošajām līnijām un vienkāršot režģa detalizāciju apgabalos, kur ir mazs attālums starp urbumiem. Urbumi apvienoti vienā režģa punktā, ja attālums starp tiem ir vienāds vai mazāks par 500 m. Virszemes ūdensteču un ūdenstilpju līnijām ģeoloģiskās uzbūves veidošanā ir sekundāra nozīme, un režģa izveidē tās iekļautas ar 1 km toleranci.

Izveidotais režģis ģeneralizēts, izņemot konkrētus punktus vietās, kur līniju krustpunktā veidojas leņķis, kas mazāks par 12 grādiem, kā arī punktus, kas nepieder nevienai līnijai. Katrai režģa līnijai un punktam tiek piešķirts noteikts režģa identifikators. Pēc tiem var šķelt režģi pa nepieciešamajām līnijām lūzumu iestrādei modelī un izgriezt apakšrežģus atsevišķu slāņu augstuma un biezuma datņu interpolācijai. Balstoties uz šīm režģi definētajām līnijām, modeļa izstrādes gaitā tika izgatavoti apakšrežģi noteiktu stratigrāfisko vienību predefinētu izplatības apgabalu iegūšanai, kas izmantoti šo stratigrāfisko vienību biezumu interpolācijai.

Modeļa režģi ir iekļauti no iepriekšējiem ģeoloģiskajiem pētījumiem zināmie lūzumi pamatklintāja, ordovika un devona Pērnavas un Amatas svītu virsmās. Ņemot vērā to, ka visi lūzumi nav izsekojami visās virsmās, režģis tika šķelts vairākkārt. Sākumā tika izveidots pamatrežģis, kurš tika sašķelts pa visām zināmajām lūzumu līnijām, iegūstot dubultpunktus katram no lūzumu līniju punktiem. Tad sašķeltais režģis tika apvienots un veikta atkārtota režģa šķelšana ar katras virsmas zināmajiem lūzumiem, tādejādi saglabājot režģa punktu identifikatoru numerāciju un iespēju ģenerētās virsmas attēlot uz visiem režģiem.

Katra izveidotā ģeoloģiskā virsma uzdota noteiktā kopējā trijstūru režģa apakšapgabalā. Apvienojot visas virsmas, iegūts 3D tilpumu režģis, ko veido prizmu, piramīdu un tetraedru elementi (Seņņikovs, 2011).

3.2.2. Izmantotās interpolācijas metodes

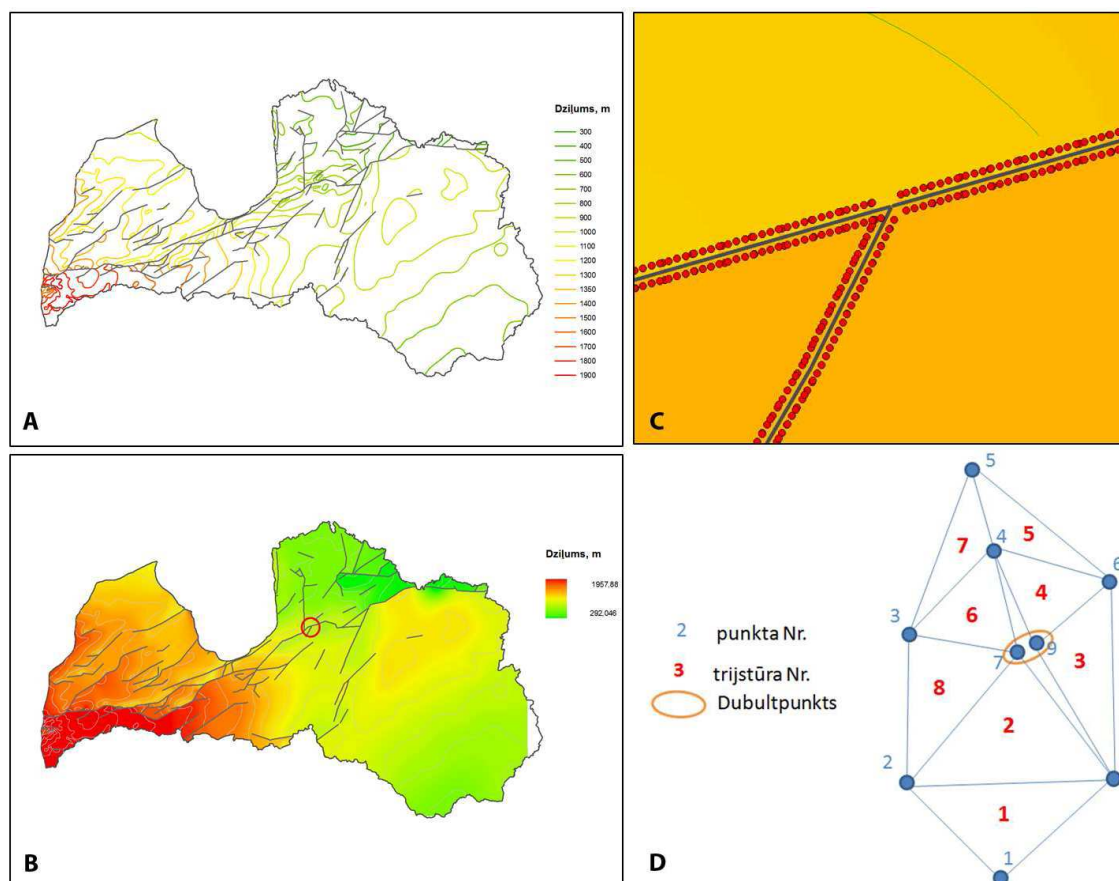
Ģeoloģisko virsmu augstuma atzīmju, tāpat kā jebkuru citu īpašību un vērtību interpolācija, ir dabas procesu modelēšana, kur dabā esošās vērtības tiek aproksimētas, tādēļ vienmēr jāņem vērā modelētās teritorijas mērogs, ievades datu izkliede un detalizācija (Caumon, 2010). Jebkura ģenerēta virsma sniegs tikai aptuvenu virsmas atainojumu, kas ir atkarīgs no ievades datu daudzuma, kvalitātes un interpretācijas (*ibid*).

Ģeoloģisko virsmu izveidei izmantota vairāku interpolācijas metožu apvienošanas pieeja. Punktveida informācijai izmantota lineārā interpolācija (Groshong, 2006), kas apvienota ar ArcGIS *Spline with barriers* interpolācijas metodi (Zoraster, 2003). Šis paņēmiens pielietots pārvietojuma gar lūzuma līnijām no iepriekš publicētā kartogrāfiskā

materiāla iekļaušanai modeļsistēmā (3.5 att. – B) (Dēliņa u.c., 2011; Popovs u.c., 2011; Popovs et al., 2011).

Tādejādi ir panākts priekšnosacījums ģeoloģisko virsmu interpolācijai teritorijās ar tektoniskajiem lūzumiem, kur augstuma vērtību interpolācija netiek veikta pāri lūzumu līnijām (Popovs u.c., 2011; Popovs et al., 2011).

Nogulumu biezumu interpolācija veikta, izmantojot lineāro interpolāciju, kas balstīta uz pieņēmumu, ka slīpums starp ievades datu punktiem ir taisne (sīkāk apskatīts 4.3. nodaļā) (Groshong, 2006).



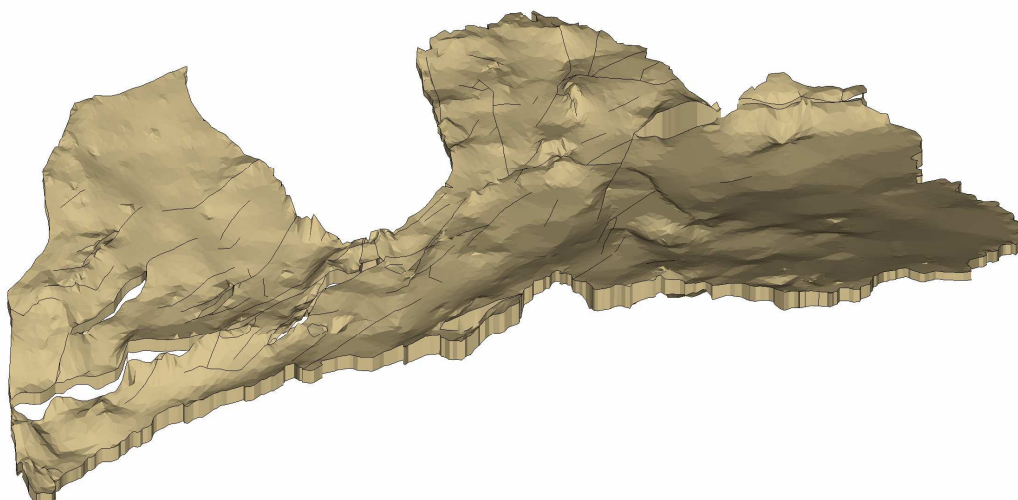
3.5. attēls. Lūzumu implementācija ģeoloģiskajā modeli, ordovika virsmas piemērs (pēc Dēliņa u.c., 2011). A – vektorizētas izolīnijas un lūzuma līnijas; B – izolīniju un urbumu punktu rastra reljefa modelis; C – lūzumu informācijas pārnesanas metodika no rastra uz ģeometriskā modeļa režģi; D – principālā shēma lūzumu iekļaušanai modeļa režģī.

Augstuma datnes ar pārvietojuma vērtībām gar lūzumiem iegūtas, interpolētās biežumu vērtības summējot ar iepriekš publicēto ģeoloģisko virsmu reljefa datiem, kas modelī ir definētas kā pamata atskaites virsmas (Popovs et al., 2011).

Kartogrāfiskā materiāla vektorizēto tektonisko lūzumu ar definētu pārvietojumu interpolācija iestrādei modelī aprakstāma vairākos soļos (3.5. att.) (Dēliņa u.c., 2011; Popovs u.c., 2011):

- vektorizētās izolīnijas no kartogrāfiskā materiāla ArcGIS vidē ar rīku “Spline with barriers” tiek interpolētas, izmantojot lūzumu līnijas kā barjeras (3.5. att. – A), kurām reljefa dati netiek interpolēti pāri, iegūstot rastra datu režģi ar šūnas izmēru 50 x 50 m (3.5. att. – B);
- ArcGIS vidē paralēli lūzuma līnijām 100 m attālumā no tām abās pusēs tiek izveidots punktu vektorfails ar 50 m toleranci starp punktiem. Šī faila atribūtos punktiem definētas lūzuma līniju “labās” un “kreisās” puses vērtības, nolasot tās no izveidotā virsmas rastra režģa (3.5. att. – C);
- modeļa triangulācijas režģis pa lūzuma līnijām tiek sašķelts, gar lūzumiem izveidojot dubultpunktus (3.5. att. – D), kam tiek interpolētas vērtības no sagatavotā punktu vektorfaila, definējot pārvietojuma vērtības gar lūzuma līnijām.

Iepriekš publicēto ģeoloģisko virsmu iestrāde modeļsistēmā veikta, vektorizējot kartogrāfiskā materiāla izolīniju datus, tos papildinot ar urbumu datubāzes punktveida reljefa informāciju par konkrēto ģeoloģisko virsmu, lai iegūtu virsmas atbilstību pret urbumu datubāzes datiem. Šī datu kopa tiek lineāri interpolēta, rezultējošo datu kopu papildinot ar lūzumu pārvietojuma informāciju (3.6. att.) (Popovs et al., 2011).



3.6. attēls. **Modeļa slāņa virsmas reljefs un biezuma modelis, Pērnavas svītas piemērs** (sagatavojis autors). Virsma ģenerēta par pamatu ņemot reljefa izolīnijas, papildinot ar virsmas atzīmēm no 550 urbumiem, slāņa biezums interpolēts no 432 urbumu datiem. Vertikālā mēroga pārspīlējums 50:1.

Pētījuma metožu izstrādes sākuma aprobācijas stadijā pēc pirmo rezultātu izvērtēšanas tika nolemts neveikt interpolēto virsmu augstuma atzīmju gludināšanu (Popovs u.c., 2011), kas interpolēto virsmu padara vizuāli pievilcīgāku un ierobežo dažādu tehnisku virsmas artefaktu un kļūdaino datu vērtību izpausmi virsmu modeļos. Šāds lēmums pamatots ar to, ka gludināta ģeoloģiskā virsma ir grūti salīdzināma ar urbumu informāciju, rada papildus

interpretācijas grūtības biežumu interpolācijai un slāņu biežumu summēšanai un apgrūtina ģeoloģisko virsmu rakstura problēmu konstatāciju (Popovs u.c, 2011; Groshong, 2006).

Reljefa un biežumu datu ekstrapolācija veikta uz apgabaliem bez vērtībām, pamatojoties uz tuvāk esošo urbumu datiem. Teritorijās, kur šādi dati nebija pieejami, datu kopai vērtības tika manuāli pavairotas, tādejādi atvieglot datu ekstrapolācijas procesu ģeoloģiskās nenoteiktības mazināšanai (Groshong, 2006).

3.2.3. Ģeometriskā modeļa izveide un verifikācija

Ģeometriskā modeļa izveide norisinās, izmantojot algoritmizētu darba plūsmu, kurā ietverti datu apstrādes, atlases, režģa triangulācijas un katra slāņa virsmas izveides posmi. Pēc izstrādātās modeļa stratifikācijas sagatavojot ģeoloģisko virsmu 3D reljefa modeļu kopu, tā apvienota 3D tilpumu modelī sākot no modeļa zemākā slāņa, ievērojot ģeoloģiskās attīstības secīgumu (Popovs et al., 2011).

Daudzās manuālas darba plūsmas datorprogrammās un modeļsistēmās, ja nepieciešams izmainīt kādu parametru vai ievades datu kopu kādam modeļa slānim, ir jāveic visa ģeoloģiskā modeļa atkārtota izveide. Algoritmizēta pieeja ļauj brīvi mainīt un labot jebkuru parametru visos modeļa ģenerācijas ciklos viegli kontrolējamā veidā.

Par atskaites virsmām izmantotas pamatklintāja, ordovika, devona Pērnavas un Amatas svītu virsmas reljefa kartes, kas papildinātas ar urbumu datiem. Virs šīm virsmām iegulošo stratigrāfisko vienību virsmas iegūtas, veicot to biežuma interpolāciju un biežumu secīgu summēšanu, iegūstot katra slāņa tilpuma atspoguļojumu starp divām virsmām (Popovs et al., 2011).

Struktūras izveides metodoloģijas specifika nosaka, ka katrs modeļa slānis ir izsekojams visā modeļa apgabalā, bet struktūrā ir pieļaujams slāņu biežums ar „0” vērtību apgabalos, kur šie slāņi nav izsekojami (Seņņikovs, 2011). Biežumu interpolācijā uz apgabaliem bez vērtībām tika definēta „0” vērtība, un slāņa virsmas iegūšanā, pieskaitot interpolēto biežumu pie paguļošās virsmas, šajos apgabalos tika pārņemtas zemāk iegulošā slāņa augstuma atzīmes. Struktūras izveidē šie slāņi sakļauti pa vienādajām augstuma atzīmēm.

Ģeoloģiskās informācijas nesaistes novērtēšanai modelī ir iestrādāti divi mākslīgi slāņi – silūra un devona, kā arī pamatiežu un kvartāra robeža. Pēc šo slāņu izplatības un biežuma izmaiņām tika novērtēta nesaiste starp Kaledonijas un Hercīnijas struktūrkompleksiem. Šāda nesaiste konstatēta arī starp pamatiežu un kvartāra nogulumiem. Pēc nesaistes novērtēšanas un tās mazināšanas šīs virsmas izmantotas, lai mainītu zemāk iegulošo saistīto slāņu virsmas,

pārņemot to reljefa informāciju vietās, kur šīs virsmas saskaras, krustojas vai to nesaiste ir neliela.

Katrai modeli veidojošā slāņa virsmai un tās izplatības apgabalam veikta gan vizuāla, gan skaitliska rezultātu kontrole, t.i., pārbaudot rezultējošo virsmas sakritību ar urbumu informāciju un augstāko, kā arī paguļošo modeļa virsmu, kontrolējot virsmu paškrustošanos un izplatības apgabalu atbilstību (Popovs et al., 2011).

Modeļa un urbumu datu sakritības novērtēšanai izmantota urbumu datu kopa, kas ietver gan urbumus, kuros ir pilns slāņa biezums un kuri ir izmantoti virsmas izveidē, gan tos urbumus, kuri vertikālajā griezumā tikai sasniedz slāņa virsmu. Izmantojot urbumu informāciju, tiek kontrolēta modeļa atbilstība urbumu datiem, kā arī kontrolēta kļūdu iespēja virsmu ģenerācijas algoritmos, kā arī salīdzināta režģa detalizācijas ietekme uz ģenerētajām virsmām modeļapgabalos, kur urbumu novietojums nesakrīt ar režģa punktiem.

4. 3D ĢEOLOĢISKIE STRUKTŪRMODEĻI, TO IZVEIDES PAMATNOSTĀDNES UN METODEDES

Ģeoloģiskās uzbūves ģeometriskā interpretācija ģeoloģiskajos modeļos ir aktuāla un salīdzinoši jauna pētniecības nozare, bet jau nosacīti standartizēta daudzās ģeoloģijas nozarēs, kā, piemēram, struktūrģeoloģijā, naftas un gāzes ģeoloģijā, hidroģeoloģijā un citās. Ģeoloģiskās kartēšanas metodoloģijas attīstības vēsture lielā mērā saistās ar grafiski interpretatīvu tehniku attīstību, kas sekmējusi kompleksu ģeoloģisko struktūru interpretāciju (Groshong, 2006).

Ģeoloģiskās kartes nereti tiek uzskatītas par pamatu ģeoloģiska rakstura jautājumu risināšanā, tajās atspoguļoti ne tikai novērojumu dati, bet arī veikta šo datu interpretācija. Tās sniedz atbildes uz noteiktiem jautājumiem, tomēr tās ir nepilnīgas kompleksu jautājumu risināšanā, piemēram, to, kas saistīti ar ģeoloģiskās uzbūves ģeometrisko interpretāciju trīs dimensijās, jo īpaši pieaugot izpētes dziļumam, kur samazinās ģeoloģiskās informācijas detalizācija (Caumon, 2010).

Ģeoloģiskajām interpretācijām ir izstrādātas dažādas vizualizācijas metodes, sākot ar agrākajām manuālajām, turpinot ar jaunākām digitālām un datorizētām metodēm (Kemp & Sprague, 2003). Piemēram, dažāda veida telpiski orientētu datu 3D projekcijas, 3D blokdiagrammas, šķērsprofili, daudzveidīgas interpolācijas metodes (*ibid*, Ramsay & Huber, 1987), kā arī GIS integrēšana ģeoloģiskās informācijas interpretācijā (Kemp & Sprague, 2003).

Pēdējos gados ir attīstījusies 3D ģeoloģisko – ģeometrisko modeļu izveides un datu apstrādes, interpolācijas un interpretācijas metodoloģija. Ar tās palīdzību iespējams veikt datu interpretāciju un analīzi 3D vidē (Bistacchi et al., 2008; Tacher et al., 2006). Mūsdienās šīs metodes, pateicoties praktiskajam pielietojumam, ir neatsveramas un kļūst par dominējošām daudzās ģeoloģijas apakšnozarēs, piemēram, naftas un gāzes ģeoloģijā, struktūrģeoloģijā, hidroģeoloģiskajā modelēšanā un citās nozarēs (Calgano et al., 2008).

Ierobežoto zināšanu par ģeometrisko uzbūvi, izmantoto datu nenoteiktības un interpretācijas, kā arī izmantoto metožu kļūdu dēļ, 3D ģeometriskie modeļi sniedz tikai nosacītu ģeoloģiskās uzbūves priekšstatu un tiem piemīt ievērojama nenoteiktība (*ibid*), kā rezultātā tie nav uzskatāmi par atbilstošiem reālajai situācijai. Šādi modeļi ir uzskatāmi tikai par skaitlisku ģeoloģiskās realitātes labāko iespējamo aproksimāciju, kas atkarīga no pētījuma mēroga, sākotnējām ģeoloģisko objektu uzbūves un izveides hipotēzēm, pieejamās ģeoloģiskās informācijas kvalitātes un kvantitātes, kā arī modeļa interpretācijas nenoteiktību. Tie var būt ievērojami nepareizi, jo īpaši teritorijās ar ierobežotu pieejamās informācijas apjomu (Caumon, 2010, Zhu & Zhuang, 2010).

4.1. 3D ģeoloģiskie struktūrmodeļi

3D ģeoloģisko modeļu izstrādes mērķi nosaka to detalizācijas un precizitātes pakāpi, kas ir pamatota ar modeļa mērogā atspoguļotiem modelējamās teritorijas ģeoloģiskās uzbūves elementiem. Šādi matemātiskie modeļi tiek izstrādāti ar mērķi attēlot un iegūt ģeoloģiskās uzbūves iespējami labāko tuvinājumu no jebkura skatu punkta (Caumon, 2009; Caumon, 2010).

Tie tiek konstruēti, balstoties uz lauka pētījumos gan ar tiešām, gan netiešām metodēm iegūtiem datiem un to interpretāciju (Zhu & Zhuang, 2010), tādejādi ģeoloģiskās struktūras raksturotas ar 3D ģeometriskām formām, veicinot ģeoloģisko elementu telpisku korelāciju (*ibid*), t.i., tie veicina šo datu savstarpēju integrāciju un uzlabo interpretāciju caur vizualizāciju un konfrontāciju savā starpā un ar modeli (Caumon, 2010). Datu 3D interpretācijā iespējams iekļaut to teritorijas ģeoloģisko raksturu, kas nereti, interpretējot datus divās dimensijās, pazūd vai ir nekorekti interpretēts.

Tradicionāli, veidojot ģeoloģiskos modeļus, tie tiek balstīti uz punktveida ģeoloģisko informāciju, seismiskās izpētes datiem, kartogrāfisko materiālu un ģeoloģisko griezumu informāciju, kas ir jau interpretēti vai daļēji interpretēti materiāli ar noteiktu nenoteiktību (Bistacchi et al., 2008; Zhu & Zhuang, 2010).

Ģeoloģisko modeļu nenoteiktība var tikt ievērojami samazināta, izprotot nogulumu un stratigrāfiskā saguluma ģenētisko izcelsmi un izmantojot konsekventas datu un priekšstatu interpretācijas metodes, bet to nav iespējams novērst pilnībā, tāpēc īpaša uzmanība ir jāvelta korektu metožu izvēlei un izmantošanai (Bistacchi et al., 2008). Ņemot vērā to, ka pieejamā ģeoloģiskā informācija nekad nav pilnīga, ģeoloģiskie modeļi tiek papildināti ar datu interpretāciju, kas ir pamatota ģeoloģiskajā pieredzē (Tacher et al., 2006).

Aktuālākā problemātika saistās ar tektonisko struktūru implementēšanu 3D modeļos un modeļu izveides algoritmizāciju (Bistacchi et al., 2008). Daudzām ģeoloģiskajām struktūrām ir raksturīga ģeometriska līdzība un līdzīgas attīstības likumsakarības, tomēr šo struktūru veidojošo procesu sprieguma orientācija visos gadījumos ir nevis homogēna, bet gan heterogēna, kur spriegums var būt ar līdzīgām attiecībām un vienādu virzību, bet ne vienmēr identisks (Tacher et al., 2006). Šādu heterogēnu struktūru iekļaušana 3D ģeoloģiskajos modeļos ar ierastajām tradicionālajām individuālās interpretācijas metodēm (Caumon, 2010) pieprasa kvantitatīvu struktūru aprakstošo datu apjomu un individuālu pieeju katrai tektoniskajai struktūrai un modeļa slānim, tomēr nereti pieejamais datu apjoms ir izkliedēts un nepietiekams (Tacher et al., 2006; Zhu & Zhuang, 2010).

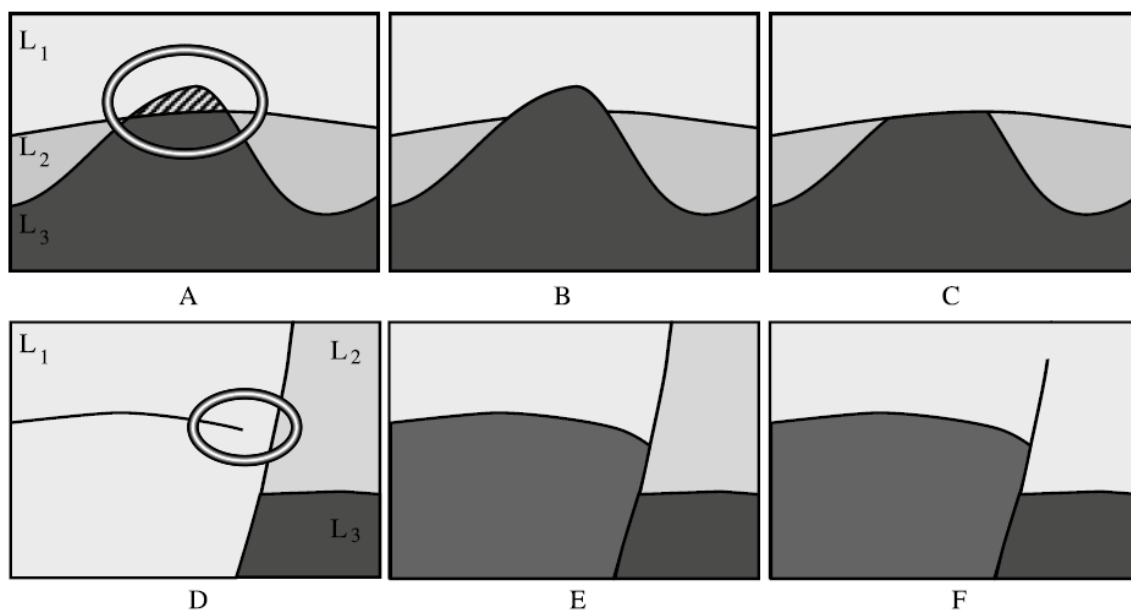
Shematizējot datu interpretācijas un modeļa ģenerēšanas shēmas soļus un piemērojot tos dažādām ģeoloģisko struktūru veidošanās apstākļu vidēm un gadījumiem, iespējams veikt

modeļa izveides algoritmizāciju, kur pēc predefinētas shēmas tiek veikta automātiska datu sagatavošana un modeļa objektu ģenerācija un kombinēšana. Tai ir nepieciešama rezultātu kontrole, ļaujot koriģēt tikai ģeoloģiskās struktūras atsevišķus elementus un veikt komplicētu struktūru individuālu interpretāciju (Tacher et al., 2006).

4.2. Modeļu izstrādes galvenās pamatnostādnes

4.2.1. Topoloģiskā konsistence un ģeometriskie ierobežojumi

Ģeoloģiskie modeļi tiek veidoti, apvienojot ģeoloģiskos elementus – slāņus un lūzumus, balstoties uz pieejamajiem novērojumu datiem. Ņemot vērā modeļa mērogu un detalizāciju, kā arī ievades datu detalizāciju, modeļa elementiem ir jāatbilst ievades datu precizitātei. Piemēram, nogulumu izplatības poligoni no dažāda mēroga kartēm var nesakrist ar modeļa elementiem, bet urbumu datu atbilstībai modelim ir jābūt ievērojami lielākai, tas ir, modeļa mēroga ietvaros (Calgano et al., 2008; Caumon, 2009).



4.1.attēls. Slāņu virsmu un lūzuma plakņu savstarpējo attiecību pamatnostādnes (pēc Caumon, 2009). A, D nekonsistenti modeļi, kur A- slāņi, kas savstarpēji krustojas, D – ģeoloģisko vienību robežas nav definētas līdz lūzumu plaknei; B, C, E, F – konsistenti modeļi.

Katram interpretētajam 3D ģeoloģiskajam slānim ir noteikta izplatība un biezums, ko ierobežo sedimentācijas apstākļu maiņa, erozija un tektoniskā darbība ģeoloģiskās attīstības gaitā. Tādējādi konsistentam ģeoloģiskajam struktūrmodelim ar noteiktu precizitāti ir jāatbilst ne tikai ievades datiem, bet arī jābūt pamatotam ar atbilstošām modelējamās teritorijas attīstības likumsakarībām, ko var nosacīti iedalīt vairākās ģeometrisko modeļu izstrādes pamatnostādņēs (*ibid*).

Lielākoties šīs pamatnostādnes ir saistītas ar modelējamo objektu makro- un mirkotopoloģijas atšķirībām un lielā mērā nosaka modeļa režģa un objektu detalizāciju. Tās principiāli neatšķiras no ģeoloģisko materiālu 2D interpretācijas kartēm un griezumiem (Kemp & Sprague, 2003), tomēr, piešķirot aplūkojamajām problēmām trešo dimensiju, ir ievērojami grūtāk definēt problēmapgabalus, kuros šīs pamatnostādnes netiek ievērotas (Caumon, 2009).

Neatkarīgi no iekļautajiem parametriem 3D virsmas ģenerācijā tā var būt matemātiski un ģeometriski patiesa, bet tas nenozīmē, ka tā reprezentē patiesu dabisko objekta virsmu, kas pastāv starp diviem ģeoloģiskajiem slāņiem, stratigrāfiskajām vai litoloģiskajām vienībām (Calgano et al., 2008; Caumon, 2009; Caumon, 2010).

Viena no aktuālākajām 3D strukturālās modelēšanas problēmām ir noteikt slāņu un lūzumu plakņu savstarpējās attiecības (4.1. att.). Slāņi nedrīkst tieši krustoties, un tiem ir jāsakļaujas gar izplatības robežām, ko veido erozijas, akumulācijas vai tektonisko procesu veidotās reljefa formas (Caumon, 2009; Zanchi et al., 2009). 4. attēlā – A parādīts variants, kur divas ģeoloģiskās virsmas savstarpēji krustojas, kas nav pieļaujams. B un C piemēros parādīts vienkāršots 2D risinājums ar izvēli starp erozijas virsmu (B) un zemāk iegulošā slāņa intrūziju vai paliksni (C), kas atrisina modeļa konsistences problēmu (Caumon, 2009).

Geomodelēšanas vajadzībām katru ģeoloģiskās vienības virsmu nosacīti var iedalīt vairākās loģiskajās vienībās, kas ir nepieciešams lūzuma līniju un pārvietojumu gar lūzumiem iekļaušanai modelī (4.1. att. – D un E). Ja slāni šķēļ lūzums, slāņa virsmai viennozīmīgi ir jābūt definētai līdz lūzuma līnijai, bet pati lūzuma plakne var arī nebūt definēta gan slāņa augšējā, gan apakšējā virsmā (4.1. att. – E un F). Stratigrāfisko un litoloģisko slāņu virsmas, ja šos slāņus šķēļ lūzumi, nepieciešams definēt līdz lūzumu plaknēm, kamēr slāņa iekšienē, ja pārvietojuma amplitūda tuvojās nulles vērtībai, lūzumi var izzust (4.1. att. – F) (Caumon, 2009).

Nepieciešams objektīvi izvērtēt datu atbilstību un no tiem konstruētā ģeometriskā modeļa reālismu. Modeļa kvalitātes kontroli nepieciešams veikt gan vizuāli, analizējot 3D ainas un modeļa šķērsgriezumus, gan datu diagrammas, salīdzinot ievades datus ar modeļa rezultātiem, kā arī vairāku modeļa scenāriju rezultātu savstarpējo scenāriju (Zhu & Zhuang., 2010).

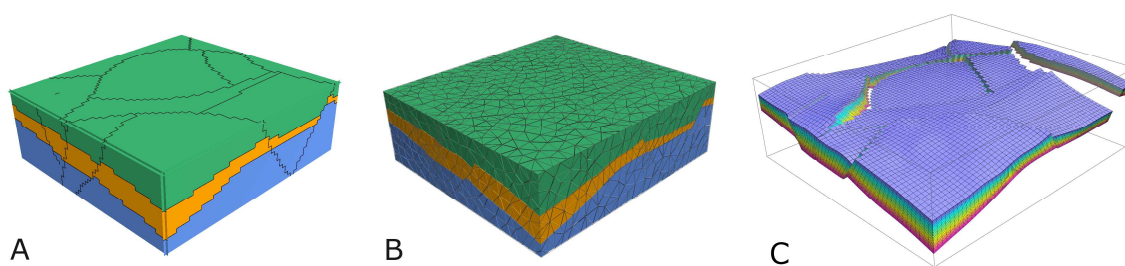
Vertikālās svārstības tiek aplūkotas, pārbaudot modeļa slāņu biezuma variācijas, īpaši pie lūzumu plaknēm, un nosakot to izmaiņu cēloņus un saderību ar slāņkopu kinemātiku (Walsh et al., 2002).

Modeļa slāņu virsmas un pašu modeli pārbaudot vizuāli, iespējams noteikt modelēšanas procesa artefaktus un konstatēt nesaderības ievades datos, kā arī kļūdainu

ģeoloģisko interpretāciju modeļa ģenerācijā (Caumon, 2009). Analizējot datu nesaderību ar modeli, ir jāņem vērā modeļa mērogs, jo detalizēti dati ar lielu izšķirtspēju pie maza modeļa mēroga tiks ievērojami ģeneralizēti līdz modeļa mērogam un tos būs ievērojami grūtāk salīdzināt ar modeļa rezultātiem (Kemp & Sprague, 2003).

4.2.2. Modeļa izšķirtspēja, režģa veids un tā detalizācija

Modeļa izšķirtspēju veido modeļa stratifikācija, režģa detalizācija un kvalitāte, kam ir viena no noteicošajām lomām konsekventa modeļa izveidē. Iespējamais cēlonis ievades datu neatbilstībai modelim ir virsmu ievērojamā ģeneralizācija, kas atkarīga no modeļa režģa izšķirtspējas, kā minēts 4.2.1. nodaļā (Calgano et al., 2008; Caumon, 2009). Vēlamā stratēģija gadījumam, kad šāda neatbilstība nav vēlama, ir globāla vai reģionāla modeļa tīkla detalizācijas palielināšana vai samazināšana līdz izšķirtspējai, kad modeļa režģim ir novērtējama sakritība ar ievades datiem (*ibid*).



4.2. attēls. Ģeoloģisko modeļu uzbūves veidi (pēc Caumon, 2010, ar autora papildinājumiem). A – regulāra kvadrātiska režģa modeļi, B – neregulāra trijstūru režģa modeļi, C – neregulāra kvadrātiskā režģa modeļi.

Mūsdienās tiek plaši pielietoti vairāku veidu tilpumu modeļu tipi (Caumon, 2010):

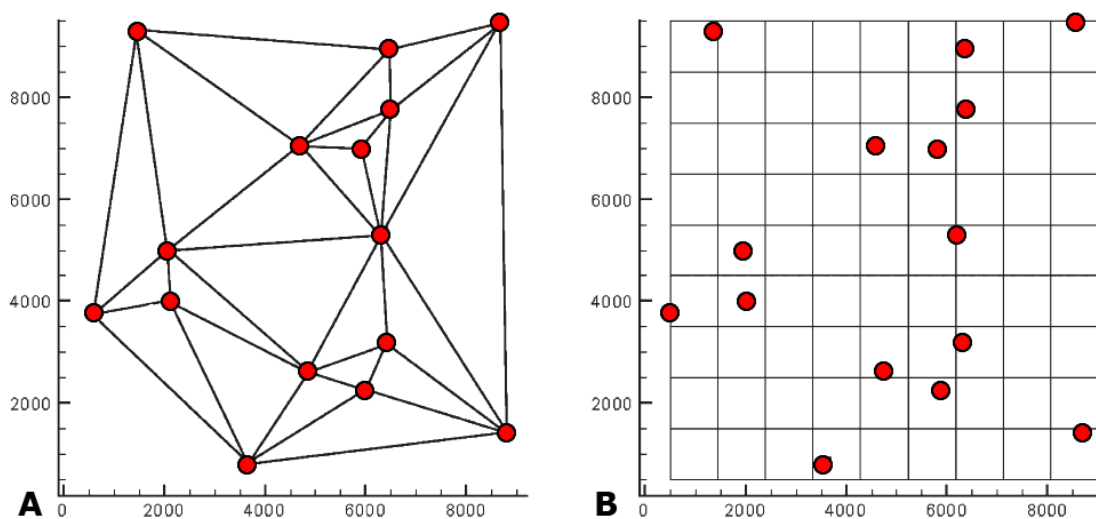
- regulāri kvadrātiskā režģa modeļi, (4.2. att. – A);
- neregulāri trijstūru režģa modeļi (4.2. att. – B);
- neregulāri kvadrātiskā režģa modeļi (4.2. att. – C).

Šie modeļu veidi atšķiras pēc ģeoloģisko struktūru tilpumu un ģeoloģisko robežu attēlojuma (Caumon, 2009).

Regulāra kvadrātiska režģa modeļus, sastāvošus no noteikta daudzuma kubiskiem elementiem, var izmantot nosacīti vienkāršas ģeoloģiskās uzbūves modelēšanai, jo šāda modeļa reprezentācija tieši neatbilst lūzumu struktūras un lokāli mainīgu iežu deformācijas anizotropiju (Caumon, 2010).

Neregulāra kvadrātiska režģa modeļi ir standartizēti plašam pētījumu lokam baseinu ģeoloģijas modelēšanā. Tie tiek konstruēti uz regulāra virsmas režģa, bet pieļauj tā vertikālas deformācijas, kas savukārt uzlabo ģeoloģisko struktūru anizotropijas konstruēšanu, bet

lūzumu ģeometrijas implementācija modelī ir ierobežota (*ibid*, Caumon, 2009). Līdzīgi kā regulāra kvadrātiska režģa implementācijā, režģi pa lūzumu plaknēm iespējams šķelt tikai gar režģa elementiem, saglabājot lūzuma līnijas virzienu, kurai būs kvadrātisku režģa elementu aproksimēta ģeometrija. Līdz ar to tajā ir grūti implementēt maza leņķa lūzumus un subhorizontālus lūzumu kontaktus. Šo ierobežojumu dēļ šādus modeļus ir komplicēti adaptēt reģionāla mēroga ģeoloģiskajiem modeļiem, kuros ir nepieciešams vizualizēt kompleksas tektoniskās struktūras (Caumon, 2010). Lineārās režģa struktūras dēļ kvadrātiska režģa modeļiem ir apgrūtināti panākt to sakrītību ar ievades datiem. Šāda tipa modeļiem ir grūti arī realizēt dažādas detalizācijas apgabalu iestrādi ģeoloģiskajā modelī, kas struktūru modelēšanā ir īpaši svarīgi nenoteiktības novērtēšanā (Caumon, 2009, Caumon, 2010, Wellman et al., 2010).



4.3.attēls. Interpolācijas režģu veidi (sagatavojis autors). A – neregulārs triangulācijas režģis (TIN); B – regulārs kvadrilaterāls interpolācijas režģis (GRID).

Iepriekš minētie ierobežojumi ir atrisināmi, izmantojot neregulāra trijstūru režģa modeļus, kur iespējams konstruēt ļoti komplicētus strukturālos modeļus, ko ļoti plaši izmanto ģeomodelēšanā (Caumon, 2010). Izmantojot režģa trijstūrus, iespējams mainīt to izmērus un papildināt triangulācijas datu kopu ar papildus punktiem. Tāpat ar noteiktu ģeneralizāciju iespējams modelī iestrādāt dažādas detalizācijas apgabalus, kas ierobežoti ar patvaļīgi definētiem punktiem vai raksturīgām ģeoloģiskajām robežām, piemēram, nogulumu izplatības poligoniem, lūzumu līnijām un tml. Neregulāra trijstūru režģa modeļu tilpums tiek veidots no dažāda izmēra tetraedriem, kurus, mainot režģa detalizāciju, var adaptēt ģeoloģisko objektu reālistiskai 3D implementēšanai un to noteiktības novērtēšanai (*ibid*, Caumon, 2009).

4.3. attēlā ir attēlota neregulāra triangulācijas režģa (A) un regulāra kvadrilaterāla režģa (B) veidi un to sakrītība ar ievades datiem. Šie režģi ir ģenerēti no identiskām datu kopām, kur TIN režģa krustpunktos sakrīt ar ievades datiem, kamēr GRID režģim atstatums

starp režģa punktiem ir pieņemts kā minimālais attālums starp datu kopas tuvākajiem punktiem, precīzi nesakrīt ar ievades datiem (Groshong, 2006). Ģeoloģiska rakstura pētījumos ir svarīgi, lai ievades dati atbilst modeļa rezultātiem, tāpēc korektāku un salīdzināmāku rezultātu sniedz TIN izmantošana (*ibid*).

Jo lielāka ir modeļa diskretizācija, jo tam ir labāks tuvinājums reālajai situācijai, kur diskrētas virsmas precizitāte ir nosakāma ar režģa punktu blīvumu un atbilstību ievades datiem. Tas dod papildu brīvības pakāpi režģa izveidē, kas atkarīga no modeļa elementu savstarpējās atkarības, kas vienlaikus ir arī nosacījums režģa detalizācijas izveidē (Caumon, 2009). Tomēr blīva režģa vizualizācija un procesēšana var būt neefektīva un pārmērīga modeļa diskretizācija nav vēlama, tam ir jābūt adaptētam modeļa ievades datu blīvumam (Calgano et al., 2008; Caumon, 2009; Caumon, 2010).

Triangulācijas režģa izveidē, lai nodrošinātu gan relatīvi līdzenu, gan ievērojami deformētu virsmu ģenerāciju, jāievēro adaptīva režģa izšķirtspēja, ko nodrošina režģu punktu blīvums un izkliede. Šādu režģa izveidi var panākt triangulācijā ievērojot Delaunija nosacījumu, kas ieviests un plaši izmantots dažādās ar ģeometriju saistītās nozarēs, bet jo īpaši ģeozinātnēs, jo nodrošina kvalitatīvu un datiem adaptīvu režģa izveidi (Delaunay, 1934).

4.3. Ģeoloģisko datu interpolācijas metodes

Ģeoloģisko virsmu un biezuma karšu izveidei tiek veikta interpolācija no punktveida datiem un ekstrapolācija uz teritorijām bez tiem. Izmantojot dažādas interpolācijas metodes ar dažādiem interpolācijas parametriem, no vienas datu kopas iespējams iegūt praktiski neierobežotu skaitu dažāda rakstura reljefa vai biezuma sadalījumu modeļu. Lai iegūtu optimālo interpolācijas rezultātu, tas jāveic, izvēloties piemērotāko interpolācijas metožu kopu, kas jāpamato ar ievades datu raksturu un to ģeoloģisko interpretāciju (Groshong, 2006).

Telpiski dati var tikt interpolēti divējādi. Uzmanība jāpievērš interpolācijas metožu saderībai ar iepriekšējā nodaļā aprakstītajiem ģeoloģisko modeļu veidiem (4.3. att.) un to sniegto detalizāciju (Groshong, 2006):

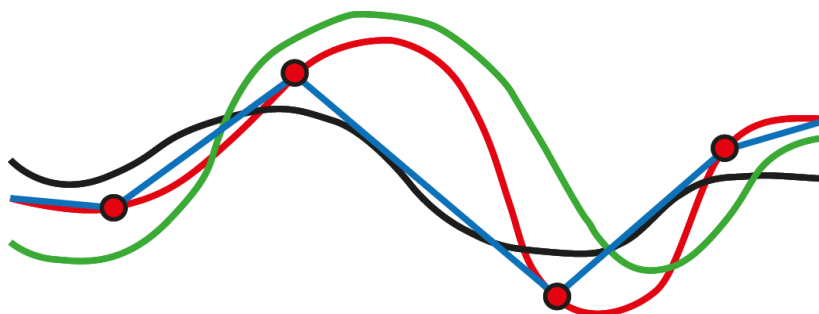
- izmantojot neregulāru triangulācijas tīklu (TIN), kas izveidots no interpolācijas datu kopas vai ar noteiktu detalizāciju sagatavots jau iepriekš, kur interpolētās vērtības tiek piešķirtas režģa punktiem, kas sakrīt ar ievades datu novietojumu vai predefinētā TIN režģa punktiem (4.3. att. – A).
- izmantojot regulāru kvadrilaterālu interpolācijas režģi (GRID) ar predefinētu šūnas izmēru, kas aprēķināma statistiski pēc ievades datu telpiskās izklandes vai individuāli piešķirtu, balstoties uz nepieciešamo rezultātu izšķirtspēju (4.3. att. – B).

Pie ierobežota datu daudzuma, kas ir atšķirīgs dažādiem ģeoloģiskajiem struktūrelementiem un samazinās, pieaugot dziļumam, ieteicamā izvēle ir TIN pielietošana (Groshong, 2006), kur interpolācijas režģis tiek ģenerēts, savienojot blakus esošos punktus ar taisnām līnijām. Šāds paņēmiens ir plaši pielietots manuālā konturēšanā vairākumā agrāko pētījumu (Banks, 1993) un ir ļoti populārs arī datorkonturēšanā (*ibid*, Groshong, 2006).

Galvenās šīs metodes priekšrocības ir laba veiktspēja, konstruētās virsmas reljefa informācija precīzi atbilst ievades datiem, kā arī attēlojums 3D sniedz labu priekšstatu par struktūras raksturu (Banks, 1993). Struktūru interpretācijā ir ļoti svarīgi, lai visas vērtības precīzi atbilst interpolētajam virsmas režģim, ieskaitot ekstremālās vērtības, jo tās nereti var norādīt uz svarīgu strukturālo informāciju (Groshong, 2006).

Savukārt regulāra kvadrilaterāla režģa galvenās priekšrocības ir režģa regularitāte, kas ievērojami atvieglo divu dažādu virsmu salīdzināšanu, kā arī biežumu, un tilpumu aprēķinus. Galvenais trūkums ir tāds, ka neatkarīgi no režģa punktu attāluma aprēķiniem nav iespējams panākt režģa punktu sakritību ar ievades datiem, kas var radīt problēmas ar rezultējošās virsmas sakritību. Šī problēma ir daļēji risināma, ievērojami sabiezinot režģa punktu tīklu, tādējādi samazinot arī nesakritības diapazonu, taču tas samazina režģa veiktspēju (*ibid*).

Ir pieejamas daudzas interpolācijas metodes, no kurām liela daļa ir izstrādātas tieši reljefa datu interpolācijai ģeoloģijā, ar kurām operē ar X,Y un Z koordinātēm (Caumon, 2009), pēc nepieciešamības mainot Z vērtības uz citu parametru, piemēram, biežuma vērtībām. Tāpat lielu daļu interpolācijas metožu iespējams parametrizēt, interpolējot X,Y,Z, *i* datu kopu, kur *i* ir kāda noteikta īpašība, kā arī norādot ierobežojumus datu interpolācijā, piemēram, rādīsim, kurā ievades datiem ir lielāka nozīme – virziena piešķiršana interpolācijai (Calgano et al., 2008). Izmantojot šīs metodes, kas balstās uz datu telpisku autokorelāciju, tiek interpretēta virsmas vai kādas īpašības raksturs teritorijās bez informācijas (Childs., 2004).



4.4. attēls. Interpolācijas metožu salīdzinājums vertikālā griezumā sintētiskā piemērā (pēc Childs, 2004, ar autora papildinājumiem). Zaļā krāsā – *Kringing*, melnā krāsā – *IDW*, sarkanā krāsā *Spline*, zilā krāsā – lineārā interpolācija.

IDW metode ir labi piemērota lietošanai, kad datu kopas punktu blīvums ir pietiekami liels, lai jau no datiem būtu iespējams nojaust par lokālās virsmas reljefa variāciju. Izmantojot šo metodi, vērtības režģa punktiem tiek noteiktas, balstoties uz lineāri svērto kombināciju no ievades datiem, ko var izteikt kā attāluma funkciju starp ievades datiem. Jo lielāks ir attālums starp punktiem, jo mazāka ir šo punktu ietekme uz interpolētajām vērtībām. Taču šī metode neatbalsta datu ekstrapolēšanu uz teritorijām bez vērtībām (*ibid*).

Natural Neighbor metode izmanto vidēji svērto principu starp ievades datiem, kas ir ļoti līdzīgs *IDW* interpolācijas metodes principam. Šai metodei nav vajadzīgas lielas skaitļošanas jaudas, tāpēc tā ir piemērota liela apjoma datu kopām. Tā arī atbalsta datu ekstrapolāciju, aprēķinot ievades punktu nozīmi teritorijām bez vai ierobežota daudzuma datiem (*ibid*).

Kriging interpolācijas metode, ir visplašāk pielietotā metode ģeozinātnēs, tostarp plaši lietota ģeoloģijā (Groshong, 2006). Tā balstīta datu statistiskajā apstrādē, pieņemot, ka attālums vai virziens starp punktiem atstāj iespaidu uz datu telpisko korelāciju, ko var izmantot, mēģinot skaidrot interpolējamās virsmas variācijas, pielietojot funkciju atsevišķiem punktiem vai arī visai datu kopai. Šī metode sniedz labus rezultātus gadījumos, ja ir zināma datu telpiskā korelācija vai arī virsmas raksturīgais slīpums, kur paredzamās vērtības tiek iegūtas, nosakot ievades datu savstarpējo attiecību, pielietojot sarežģītas vidējā svērtā noteikšanas tehnikas. Tāpat kā ar *IDW* un *Natural Neighbor* metodēm, ar šo metodi ģenerētie reljefa modeļi ar ievades datiem nesakrīt precīzi, bet gan ar nenoteiktu aproksimācijas soli (4.4. att.) (Childs, 2004).

Ar *Spline* interpolācijas metodi ģenerētie reljefa modeļi precīzi sakrīt ar ievades datiem, tomēr šī metode datu interpolācijai izmanto matemātisku funkciju, kas minimizē vispārējo virsmas izliekumu, kas rezultējās gludā virsmā, atbilstot visiem ievades datiem. Šī metode ir grūti parametrizējama svāra piešķiršanai ievades datiem, un gala rezultātā atsevišķās modeļa daļās starp ievades punktiem novērojamas nepamatotas interpolēto vērtību svārstības (*ibid*).

ArcGIS vidē ir veikta šīs metodes labāka piemērošana ģeoloģiskiem datiem, ļaujot veikt virsmu ģenerāciju ar lūzumu pārvietojumiem (Zoraster, 2003), ja tiek ievēroti vairāki nosacījumi: reljefa dati netiek interpolēti pār lūzuma līnijām un, ja starp vairākiem lūzumiem ir viena vērtība, tā tiek ekstrapolēta līdz lūzumu līnijām. Šo metodi iespējams daļēji parametrizēt pēc virsmas rakstura (*ibid*). Šī metode sniedz labus rezultātus lūzumu pārvietojumu iegūšanai, tomēr, līdzīgi kā iepriekš aprakstītās metodes, nav piemērota kvalitatīvai modeļu konstruēšanai no vairākām virsmām nepamatotu biežuma izmaiņu kontroles dēļ (Popovs u.c., 2011).

Lineārā interpolācija balstās uz pieņēmumu, ka slīpums starp datu punktiem ir taisna līnija, un pēc savas būtības ir ļoti vienkārša. Datu punkti tiek savstarpēji triangulēti un interpolējamās vērtības lineāri attiecinātas uz līnijām starp šiem punktiem (4.4. att.) (Groshong, 2006). Šī ir standarta pieeja topogrāfisko karšu izveidei, kur ir labi zināmi reljefa paaugstinājumi un pazeminājumi, nogāzes slīpuma rādītāji, kā arī raksturīgo reljefa barjeru novietojums starp kontroles punktiem, taču, izmantojot šo metodi izklidētu datu interpolācijai un nezinot tipisko virsmas raksturu, var iegūt nepamatotu rezultātu.

Izvērtējot iepriekš aprakstītās interpolācijas metodes, pētījuma realizācijai izvēlēta lineārās interpolācijas metode. Zinot teritorijas ģeoloģiskās attīstības galvenos posmus un likumsakarības, nogulumu biezumu datu interpolācijai izmantojot lineārās interpolācijas metodi, iegūtais rezultāts ir viegli kontrolējams un verificējams, kā arī apmierinošs pat pie ievērojami izklidētiem datiem (*ibid*; Popovs et al., 2011).

4.4. Ģeoloģisko modeļu nenoteiktība

Jebkurš parametrs un vērtība, kas raksturo kādu ģeoloģisko objektu vai procesu, to grūtā skaitliskā raksturojuma un pieejamās informācijas ierobežotības dēļ, ir nenoteiktības cēlonis (Bardossy & Fodor, 2001). Tomēr, attīstoties ģeoloģiskajiem pētījumiem, pieaug novērojumu un mērījumu rezultātu skaits, kuru pienācīga novērtēšana nav iespējama bez matemātiskajām metodēm. Piemērojot matemātiskās metodes ģeoloģijā, ir iespējamās divu veidu pieejas – labākā minējuma (labākā vērtējuma) un uz nenoteiktību orientēta statistiskā pieeja (*ibid*).

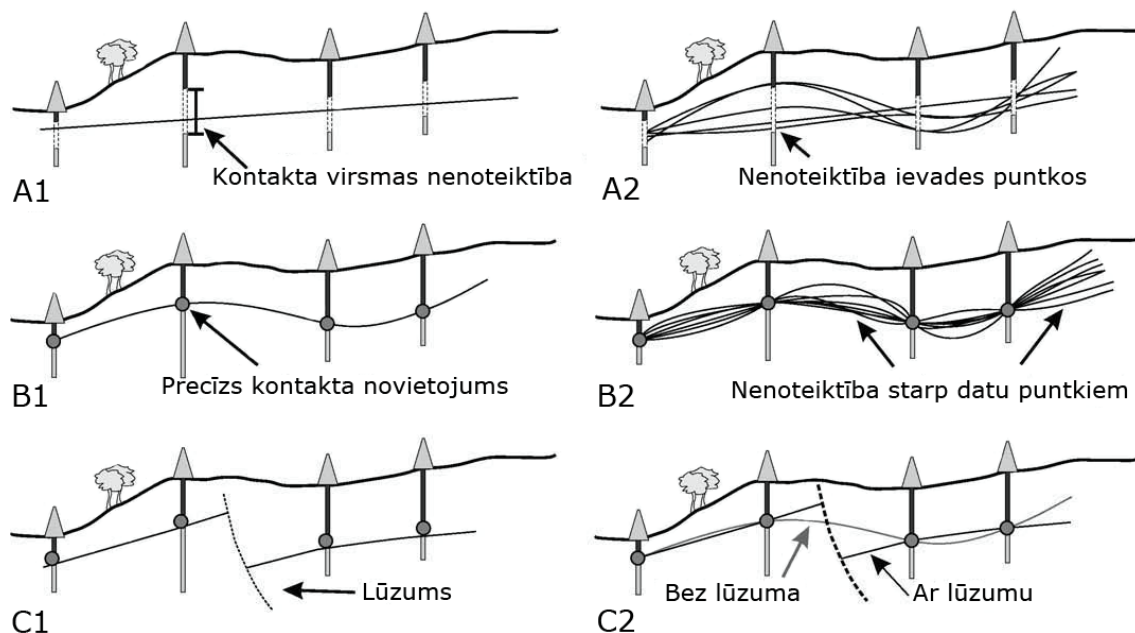
Pirmajā gadījumā interpretāciju nosaka autora pieņēmums par labāko rezultātu. Šādā pieejā interpretācija tiek aprakstīta ar dažiem statistiskiem parametriem, piemēram, dispersiju vai standarta novirzi, nemēģinot kvantitatīvi skaitliski aprakstīt nenoteiktību (Caumon, 2010).

Otrajā gadījumā jau sākuma stadijā katrā pētījuma posmā nenoteiktībai tiek pievērsta pastiprināta uzmanība, iespēju robežās apskatot arī kļūdu attīstību un savstarpējo atkarību, tādejādi cenšoties cēloņus aprakstīt ar matemātiskām sakarībām (Bardossy & Fodor, 2001).

3D ģeoloģiskie modeļi tiek veidoti, balstoties uz faktisko materiālu, kas ir subjektīvi interpretēts un matemātiski interpolēts. Pamatojoties uz to, ka faktiskais materiāls nereti ir nepietiekams, liela nozīme ir objektīvai interpretācijai un matemātiskajām interpolācijas – ekstrapolācijas tehnikām. Tomēr tās mēdz novest pie neprecīzas ģeoloģiskās interpretācijas, jo neatkarīgi no tā, cik labi izveidots 3D ģeoloģiskais modelis, noteiktā tuvinājumā tā ticamības un izšķirtspējas kvalitāte samazināsies (Caumon, 2010).

Visiem ģeoloģiskajiem modeļiem piemīt zināma nenoteiktība, kuru var klasificēt vairākos veidos: ievades datu kvalitāte un precizitāte vai šo datu nepietiekama izklide un

nepilnīgas zināšanas par modelējamās teritorijas ģeoloģisko uzbūvi (Wellman et al., 2010). 3D ģeoloģisko modeļu interpretācijai un tālākai izmantošanai ir nepieciešama to kvalitātes novērtēšana, tomēr līdz šim nav izstrādāta visaptveroša 3D pieeja modeļu nenoteiktības novērtējumam (Tacher et al., 2006; Turner, 2006).



4.5. attēls. Manna klasifikācijas adaptācija ģeoloģiskās modelēšanas nenoteiktībai (pēc Wellman et al., 2010, ar autora papildinājumiem). A1 –ģeoloģiskās kontaktvirsmas interpretācija, balstoties uz vāji definētiem datiem, un A2 – rezultējošā nenoteiktība interpretētajos datos; B1 – iespējamais kontaktvirsmas novietojums un B2 – interpolētā un ekstrapolētā robeža starp ievades datiem; C1 – iespējamais lūzums un kontaktvirsmas un C2 – iespējamā interpretācija bez un ar lūzumu.

Kamēr datu interpretācija ir variabls process, kur ar izslēgšanas metodi var iegūt optimālo un ticamāko rezultātu (Wellman et al., 2010), ievades dati ir tā datu kopa, kurā iekļautā nenoteiktība ir īpaši svarīga un grūti izskaužama. No šiem datiem kā nenoteikti, kurus var izmantot ar zināmu brīvības pakāpi, ir nodalāmi nogulumu izplatības apgabali un tipiskie ģeoloģiskie griezumumi, kā arī seismiskie dati, kuros ir pieļaujamas nobīdes no aktuālās situācijas, bet urbumu informācija ir pamata dati, kuriem jābūt ticamiem vai ar iespēju novērtēt to kļūdu (Caumon, 2009). Tomēr arī pamata datiem ir nepieciešama atlase pēc noteiktiem kritērijiem, lai izvairītos no iespējami kļūdainiem datiem, kas var rasties mērījumu neprecizitātes, paraugošanas ierobežojumu, nepietiekama paraugu skaita, nepilnīgu hipotēžu un koncepciju, ievērojamas ģeoloģisko apstākļu heterogenitātes un daudzu citu faktoru dēļ (Wellman et al., 2010).

Adaptējot Manna klasifikāciju (Mann, 1993) strukturālās modelēšanas vajadzībām (Wellman et al., 2010), var izdalīt trīs tipiskos, obligāti ievērojamos nenoteiktības tipus (4.5. att.):

- pirmais tips (4.5. att. – A1, A2) – kļūdas, novirzes un neprecizitātes visos ievades datu veidos, kas izmantoti modelēšanai, piemēram, slāņu robežu atzīmes, struktūru orientācija un amplitūda;
- otrais tips (4.5. att. – B1, B2) – stohastiskas un raksturīgas nejaušības, kas lielākoties parāda nenoteiktību zināmo datu punktu interpolācijā un ekstrapolācijā;
- trešais tips (4.5. att. – C1, C2) – nepietiekamas zināšanas par modelējamo teritoriju, struktūrģeoloģisko priekšstatu un vispārējas konceptuālās neskaidrības un vispārinājumi.

Šobrīd pieejamajā literatūrā trūkst visaptveroša visu šo nenoteiktību tipu analīzes 3D strukturālās ģeoloģijas jomā (Caumon, 2009; Caumon, 2010; Mann, 1993). Tomēr pirmā tipa nenoteiktības ir iespējams noteikt un daļēji izslēgt, izmantojot ģeostatistikās metodes (Chiles & Delfiner, 1999). Šo nenoteiktību ievērojami samazina arī seismiskās izpētes dati un to interpretācijas, bet arī šo datu papildinājums nereti ir nepietiekams (Wellman et al., 2010). Nenoteiktību ir iespējams mazināt vai vismaz novērtēt, pēc noteiktiem kritērijiem klasificējot un sadalot ievades datu kopu vairākās daļās, kur viena datu kopa tiek rezervēta modeļa kalibrācijai, pie nosacījuma, ka šie dati tiek uzskatīti par ticamiem, bet katra nākamā datu kopa tiek izmantota modeļa konstruēšanai un rezultātu salīdzināšanai (Tacher et al., 2006).

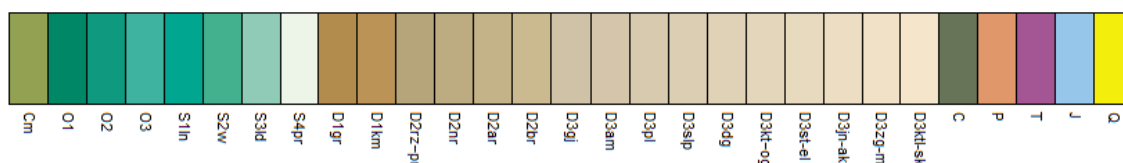
Otrā tipa nenoteiktības ir atkarīgas no statistisko un ģeostatistisko metožu, tostarp, dažādu telpisko datu interpolācijas un ekstrapolācijas metožu, rezultātu savstarpējās variācijas, kas ir labi dokumentētas un matemātiski nosakāmas. Tās ļauj modeļa izstrādes sākuma stadijā novērtēt šo metožu piemērojamību pieejamo datu raksturam (*ibid*).

Savukārt trešā tipa nenoteiktības novērtēt ir ievērojami grūtāk, dažkārt pat neiespējami, jo tās balstās pētnieku priekšstatos par modelējamās teritorijas raksturu un ģeoloģiskajām zināšanām (Mann, 1993).

5. MODEĻA STRATIFIKĀCIJA

Modeļa ģeoloģiskā stratifikācija balstīta uz nogulumiežu segas stratigrāfisko vienību, nevis litoloģisko iedalījumu, tā ierobežojot ģeoloģisko nenoteiktību un saglabājot ģeoloģiskās uzbūves pārskatāmību, kā arī ierobežojot ģeoloģiskās vides heterogenitāti.

Stratifikāciju veido 30 slāņi, kas izdalīti, balstoties uz urbumu datubāzes stratigrāfisko vienību klasifikatoru – tajā ietilpstošo indeksu sastopamību urbumu vertikālā griezumā aprakstā. Tika izmantoti tikai noteikto stratigrāfisko vienību apraksti, neņemot vērā apvienojošos klasifikatora ierakstus (sīkāk aprakstīts 3.1.3. nodaļā). Papildus ņemta vērā arī urbumu telpiskā izkliede modeļapgabalā, nogulumu izplatības informācija no zemkvartāra nogulumu izplatības kartes un publicētajām Kaledonijas un Hercīnijas struktūrkompleksu virsmu kartēm. Ņemot vērā ietverošo urbumu izkliedi un slāņu biezumu, veikta šīs informācijas sistemātiska analīze, un modeļa stratifikācija iedalīta iespējami labākajā detalizācijā līdz sistēmu, nodaļu, reģionālo stāvu un arī svītu un svītu kopu izšķirtspējai (5.1. att.).



5.1. attēls. **Modeļa stratifikācija** (sagatavojis autors).

Modeļa stratifikācijas iedalījuma pamatojums pēc atbilstības Latvijas nogulumiežu segas stratigrāfiskās shēmas hronostratigrāfiskajām vienībām sniegts 5.1., 5.2., 5.3. un 5.4. tabulās, pamatojot to ar šo slāņkopu biezuma variācijām urbumos, urbumu skaitu, kuros izdalītie slāņi konstatēti, kā arī sniegts urbumu datubāzes stratigrāfisko vienību klasifikatora vienību daudzums, kas ietilpst izdalītajā slānī.

Modeļa apakšējo slāni veido kristāliskā pamatklintāja virsma, ko atspoguļo 214 urbumi, kas sasnieguši virsmu (5.1. tabula), un pamatklintāja virsmas reljefa karte.

Venda nogulumi griezumā stratifikācijā netika izdalīti, to pamatojot ar faktiskā materiāla trūkumu, jo venda nogulumu sastopamība urbumu vertikālajā griezumā ir salīdzinoši neliela, bet šo urbumu izkliede ir ievērojama. Šīs slāņkopas iekļaušana modeļa struktūrā apgrūtinātu pētījuma veikšanu, tādēļ venda nogulumiem atbilstošie stratigrāfisko indeksu klasifikatora ieraksti pievienoti kembrija slānim un modelī iekļauti vienotā kembrija slāņkopā.

Kembrija nogulumi ir izplatīti visā Latvijas teritorijā (Ulste, 1961a) un konstatēti 258 urbumos, tomēr tie izdalīti sistēmas ietvaros, kur sīkāks iedalījums bija apgrūtināts stratigrāfisko vienību klasifikatora sadrumstalotības dēļ (5.1. tabula). Lielākajā daļā urbumu

kembrija slāņkopa raksturota ar apvienotajām stratigrāfiskajām vienībām, kas tikai atsevišķos urbumos izdalītas sīkākās vienībās.

Ordovika un silūra sistēmu nogulumi stratificēti nodaļu ietvaros, ordovika sistēmu iedalot trīs nodaļās, bet silūra – četrās (5.1. tabula). Ordovika un silūra slāņkopas ar mainīgu slāņkopu biezumu un dažādiem izplatības apgabaliem ir izsekojamas lielākajā daļā Latvijas teritorijas (Гайлите и др., 1987). Ņemot vērā šo slāņkopu ievērojamo biezumu un balstoties uz urbumu telpisko izkliedi un vertikālo griezumu stratifikāciju, šīs slāņkopas konsekventi bija iespējams izdalīt līdz nodaļu izšķirtspējai. Sīkāks iedalījums bija apgrūtināts datu heterogenitātes dēļ urbumu vertikālo griezumu stratifikācijā, kur daļai urbumu aprakstu griezuma detalizācija ir veikta svītu un sīkaku vienību ietvaros, bet dominējošajai daļai tikai nodaļu vai svītu apvienojumā.

5.1. tabula

Modeļa stratifikācijas iedalījuma pamatojums pamatklintāja līdz silūra Pršidolas nodaļas slāņkopai (sagatavojis autors)

Modeļa slānis	Atbilstība hronostratigrāfiskajām vienībām *							Ietilpstošās urbumu datubāzes stratigrāfiskā klasifikatora vienības (skaits)	Slāņkopas biezums urbumu datubāzē (m)			Urbumi, kuros raksturots slānis (skaits)
	1	2	3	4	5	6	7		no	līdz	vid.	
<i>Ar-Pr</i>	X							-	-	-	-	214
<i>Cm</i>	X							39	17,5	303	120	258
<i>O₁</i>		X						33	10	108	66	261
<i>O₂</i>		X						33	10	110	61	261
<i>O₃</i>		X						34	4	132	58	271
<i>S_{1ln}</i>		X						27	10	280	80	281
<i>S_{2vn}</i>		X						20	3	248	133	276
<i>S_{3ld}</i>		X						15	4	408	155	171
<i>S_{4pr}</i>		X						10	8	214	96	53

* Paskaidrojumi: 1 – sistēma, 2 – nodaļa, 3 – stāvs, 4 – reģionālais stāvs, 5 – reģionālo stāvu apvienojums, 6 – litostratigrāfiskā vienība, 7 – litostratigrāfisko vienību kopa.

Devona nogulumi dažādā stratigrāfiskajā apjomā ir izplatīti visā Latvijas teritorijā un, sākot jau no vidusdevona Narvas svītas nogulumiem atsedzas zemkvartāra virsmā. Tādēļ, veidojot modeļa stratifikāciju, devona slāņkopa mērķtiecīgi iedalīta detalizētākās vienībās salīdzinājumā ar ordovika un silūra slāņkopām (5.2. un 5.3. tabulas).

Apakš un vidusdevona slāņkopa modelī stratificēta sešos slāņos, kur apakšdevona nogulumi raksturoti ar diviem modeļa slāņiem, bet vidusdevona nogulumi – ar četriem (5.2. tabula). Apakšdevona iedalījumā abi slāņi izdalīti litostratigrāfisko vienību ietvaros – Gargždu sērija un Ķemeru svīta. Vidusdevona slāņkopa izdalīta reģionālo stāvu ietvaros, izdalot

Pērnavas reģionālo stāvu ar Pērnavas un Rēzeknes svītām, kā arī Narvas, Arukilas un Burtnieku reģionālos stāvus.

Apakšdevona iedalījums pamatots ar silūra un devona robežas problemātisko noteikšanu, kur devona nogulumi pārklāj izskaloto silūra virsmu ar lielu stratigrāfisko diskordanci. Izdalīt atsevišķi D_{1gr} un D_{1km} pēc ierobežotās urbumu informācijas ir sarežģīti, tomēr, ņemot vērā to, ka urbumos litoloģiskā sastāva mainība ir grūti izsekojama, bet robeža ir ģeometriski nozīmīga, ir svarīgi modelī šo robežu iestrādāt pēc iespējas sīkākā stratigrāfiskajā iedalījumā.

Pērnavas, Narvas, Arukilas un Burtnieku slāņkopas urbumos telpiski ir izplatītas plašāk un ir pārstāvētas ar ievērojami lielāku urbumu skatu un ir pamatojami izdalāmas pēc stratigrāfisko vienību klasifikatora, kuros Pērnavas, Arukilas un Burtnieku slāņkopas klasificētas viennozīmīgi un ar mazu ierakstu skaitu. Narvas slāņkopas aprakstā dominē lielāks skaits ierakstu, kuros stratigrāfiskās vienības iedalītas sīkāk pēc to litoloģiskās mainības (LVĢMC, bez dat.). Šai slāņkopai sīkāks iedalījums nav nepieciešams, jo sīkāks litostratigrāfiskais iedalījums atšķiras dažādās Latvijas daļās un noteikt šo vienību robežu pēc pieejamā faktiskā materiāla ir apgrūtināti un nav nepieciešams maģistra darbā izvirzīto mērķu sasniegšanai.

5.2. tabula

Modeļa stratifikācijas iedalījuma pamatojums apakšdevona un vidusdevona slāņkopai

(sagatavojis autors).

Modeļa slānis	Atbilstība hronostratigrāfiskajām vienībām *							Ietilpstošās urbumu datubāzes stratigrāfiskā klasifikatora vienības (skaits)	Slāņkopas biežums urbumu datubāzē (m)			Urbumi, kuros raksturots slānis (skaits)
	1	2	3	4	5	6	7		no	līdz	vid.	
D_{1gr}						X		1	1,5	92	34	55
D_{1km}						X		7	3	415	93	393
D_{2rz-pr}				X				5	6	94	36	550
D_{2nr}				X				12	10	194	117	1123
D_{2ar}				X				2	0,5	115	42	2441
D_{2br}				X				4	0,2	133	38	3879

* Paskaidrojumi: 1 – sistēma, 2 – nodaļa, 3 – stāvs, 4 – reģionālais stāvs, 5 – reģionālo stāvu kopa, 6 – litostratigrāfiskā vienība, 7 – litostratigrāfisko vienību kopa.

Augšdevona slāņkopa Latvijas ģeoloģiskajā griezumā ir viena no biežākajām, daudzveidīgākajām un detalizētāk stratificētajām. Tajā izdalīti 18 reģionālie stāvi. Veicot faktiskā materiāla un urbumu datubāzes stratigrāfisko vienību analīzi, augšdevona slāņkopa izstrādātās modeļa stratifikācijas ietvaros iedalīta deviņos slāņos, kas sastāv no reģionāliem stāviem, to kopām, kā arī sīkākām litostratigrāfiskām vienībām un to kopām (5.3. tabula).

Liela daļa litostratigrāfisko vienību ir izsekojamas fragmentāri, apgrūtinot izplatības apgabalu noteikšanu. Tām ir salīdzinoši nelieli biežumi (LVĢMC, bez dat.), kas apgrūtina to atspoguļojumu modeli.

Vidējais biežums šīm slāņkopām variē no 12 līdz 50 m, kamēr dokumentētās mazākās vērtības ir tikai 20 cm, bet maksimālās sasniedz pat 130 m. Stratigrāfisko vienību klasifikatora ierakstu skaits ir daudzveidīgs, kur izvēlētais iedalījums viennozīmīgi pamatots Gaujas, Amatas un Salaspils slāņkopām, kas urbumu griezumos ir pārstāvētas ar nelielu skaitu izdalīto vienību, kamēr pārējie izdalītie slāņi vertikālajā griezumā ir klasificēti ievērojami detalizētāk (5.3.tabula).

5.3. tabula

Modeļa stratifikācijas iedalījuma pamatojums augšdevona slāņkopai (sagatavojis autors)

Modeļa slānis	Atbilstība hronostratigrāfiskajām vienībām *							Ietilpstošās urbumu datubāzes stratigrāfiskā klasifikatora vienības (skaits)	Slāņkopas biežums urbumu datubāzē (m)			Urbumi, kuros raksturots slānis (skaits)
	1	2	3	4	5	6	7		no	līdz	vid.	
<i>D₃gj</i>				X				5	1	155	53	7098
<i>D₃am</i>				X				6	0,2	93	25	5254
<i>D₃pl</i>				X				18	0,2	57	17	6207
<i>D₃slp</i>						X		3	0,5	36	13,5	4645
<i>D₃dg</i>				X				16	0,2	43	12	5990
<i>D₃kt-og</i>							X	10	0,3	130	20	911
<i>D₃st-el</i>					X			15	0,2	26	59	1622
<i>D₃jn-ak</i>							X	8	1	71	26	1425
<i>D₃zg-mr</i>					X			9	1	110	38	1614
<i>D₃ktl-šk</i>					X			8	1	90	29	1145

* Paskaidrojumi: 1 – sistēma, 2 – nodaļa, 3 – stāvs, 4 – reģionālais stāvs, 5 – reģionālo stāvu kopa, 6 – litostratigrāfiskā vienība, 7 – litostratigrāfisko vienību kopa.

Pļaviņu slāņkopa modeļa stratifikācijā izdalīta reģionālā stāva ietvaros. Tomēr stratigrāfiskā iedalījuma klasifikatorā ir ieraksti, kas atbilst ietverošajām sīkākām litostratigrāfiskajām vienībām. Veicot šo ierakstu telpisko un kvantitatīvo analīzi, summējot ierakstus pa urbumiem un vērtējot to telpisko izkliedi, konstatēts, ka faktiskais materiāls ir pārāk fragmentārs, lai ģeometriski pilnīgi būtu iespējams šīs vienības atspoguļot modeli.

Daugavas reģionālā stāva slāņkopa pa stratigrāfiskajām vienībām ir iedalīta līdz litostratigrāfiskajām vienībām, atbilstošām Latvijas stratigrāfiskās shēmas iedalījumam (Stinkulis, 2003), tomēr līdzīgi kā Pļaviņu slāņkopas faktiskā materiāla analīzē, izdalīt sīkākas vienības ir apgrūtināti, tāpēc izvēlēts slāni detalizēt līdz reģionālā stāva izšķirtspējai.

Augstāk iegulošai slāņkopai, no *D₃kt* līdz *D₃šk*, modeļa stratifikācijas izveidē veikta ievērojama ģeneralizācija, izdalot piecus slāņus svītu un to kopu ietvaros (5.3. tabula). Šāda ģeneralizācija veikta, pamatojoties uz sīkāku stratigrāfisko vienību nelielajiem biežumiem,

ievērojami mainīgo litoloģisko sastāvu, kas būtiski atšķiras no pārējās Latvijas devona klastiskās slāņkopas, un nogulumu izplatības poligonu ievērojamo komplikētību (LVGD Pirmskvartāra). Šīs slāņkopas sīkā stratifikācija, nekoncekvence stratigrāfisko vienību klasifikatorā un šo vienību izsekojamība plānā, apskatāmajā modeļa detalizācijā ir grūti realizējama.

Karbons – juras slāņkopas nogulumi sastopami tikai Latvijas teritorijas pašos dienvidrietumos salīdzinoši lokālā izplatības apgabalā un pārstāvēti nelielā biezumā. Šie nogulumi stratificēti piecos slāņos, apvienojot visas slānim piederīgās litostratigrāfiskās vienības (5.4.tabula).

5.4. tabula

Modeļa stratifikācijas iedalījuma pamatojums karbons līdz kvartāra nogulumu slāņkopai

(sagatavojis autors)

Modeļa slānis	Atbilstība hronostratigrāfiskajām vienībām *							Ietilpstošās urbumu datubāzes stratigrāfiskā klasifikatora vienības (skaits)	Slāņkopas biezums urbumu datubāzē (m)			Urbumi, kuros raksturots slānis (skaits)
	1	2	3	4	5	6	7		no	līdz	vid.	
<i>C</i>							X	7	2	97	31	555
<i>P</i>							X	7	0,6	41	15	739
<i>T</i>						X		4	0,3	89	26	272
<i>J</i>							X	15	0,7	72	14	155
<i>Q</i>	X							-	-	-	-	-

* Paskaidrojumi: 1 – sistēma, 2 – nodaļa, 3 – stāvs, 4 – reģionālais stāvs, 5 – reģionālo stāvu kopa, 6 – litostratigrāfiskā vienība, 7 – litostratigrāfisko vienību kopa.

Karbons nogulumi no šīs slāņkopas pārstāvēti vislielākajā biezumā, kas variē no diviem līdz 97 m, un šajā slāņkopā apvienotas Lētiņas, Paplakas un Nīcas svītas. No perma nogulumiem Latvijas teritorijā sastopami tikai Naujoji Akmenes svītas nogulumi, bet no Triasa – Nemunas svīta. Neskatoties uz ierobežoto nogulumu stratifikāciju, pamatojoties uz faktiskā materiāla daudzumu un šo nogulumu sastopamību urbumos, tos iespējams konsekventi izdalīt un iekļaut modeļa ģeometriskajā uzbūvē.

Juras nogulumi izdalīti, apvienojot visas trīs Latvijas ģeoloģiskajā griezumā sastopamās svītas – Papiles, Zaņas un Dunikas. Neskatoties uz šīs slāņkopas salīdzinoši nelielo biezumu, urbumu datubāzes stratigrāfisko vienību klasifikatorā juras nogulumiem izdalītas 15 stratigrāfiskās vienības, kur katra svīta izdalīta vairākās pasvītās, kā arī šīm svītām raksturīgie nogulumi izdalīti ar apvienojošiem stratigrāfiskajiem indeksiem. Bet, balstoties uz šo informāciju un tās izkliedi ietverošajos 155 urbumos (LVĢMC, bez dat.), nav iespējama sīkāka šo nogulumu stratifikācija un tie modelī atspoguļoti vienā slānī.

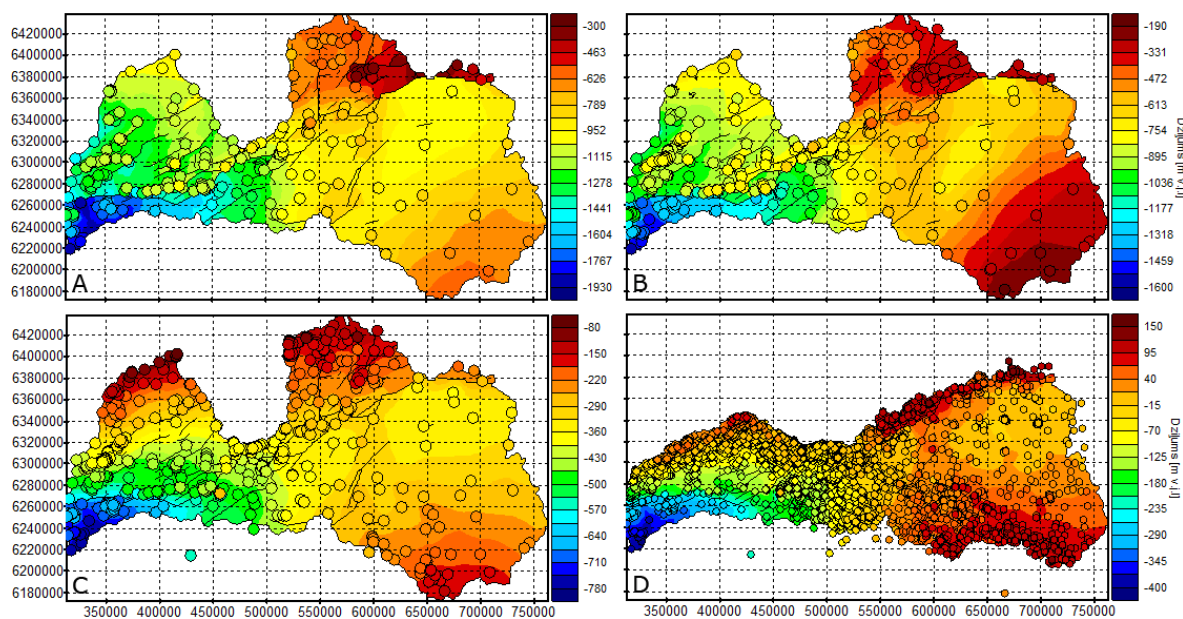
Kvartāra slāņkopa litoloģiski ir visdaudzveidīgākā un sarežģītākā. Šo nogulumu sagulums ir ievērojami heterogēns, un tas neatbilst tradicionālam sedimentogēnu nogulumu sadalījumam. Ņemot vērā komplicēto ģeoloģisko uzbūvi, kvartāra slāņkopas modeļa izveide ir atsevišķs uzdevums, kas šajā pētījumā netika veikts. Šī slāņkopa pētījuma ietvaros apskatīta un ģeometriskajā modelī iekļauta kā vienots slānis (5.4. tabula).

6. IZMANTOTO DATU VISPĀRĒJS IZVĒRTĒJUMS

6.1. Kartogrāfiskā materiāla izvērtējums

Pētījumā izmantotais kartogrāfiskais materiāls savā starpā atšķiras gan pēc tā tipa, gan pēc mēroga, kā arī pēc informācijas detalizācijas pakāpes, kas rada sarežģījumus, tos savstarpēji savietojot. Izmatotās struktūrkartes, kas publicētas izdevumā „Latvijas tektonika” (Brangulis un Konšins, 2002), ir sagatavotas vienotā mērogā un ir savstarpēji izmantojamas. Tomēr to detalizācija atšķiras, kas ir izskaidrojams ar pieejamā faktiskā materiāla diferenciāciju vertikālajā griezumā. Pamatklintāja un ordovika virsmu raksturs atainots ar 100 m soļa izolīnijām, devona Pērnavas ar 25 m, bet Amatas svītas reljefs – ar 10 m izolīniju soli.

Šajos materiālos, pēc teritorijas uzbūves atspoguļojuma detalizācijas, novērojama krasa diferenciācija starp teritorijas R un A daļām. Šo vertikālās un laterālās detalizācijas diferenciācija samazinās līdz ar dziļuma samazināšanos, īpaši aktuāla ir pamatklintāja un ordovika virsmu karšu informācijā. Devona Pērnavas un Amatas svītu virsmu struktūrkartēs datu trūkuma problēma nav tik būtiska.



6.1. attēls. Izveidotie struktūrvirsmu reljefa modeļi, papildināti ar urbumu informāciju

(sagatavojis autors). A – pamatklintāja virsma; B – ordovika virsma; C – D₂pr virsma; D – D₃am virsma.

Punkti uz modeļu virsmām atbilst urbumu punktiem, kur augstuma vērtības atspoguļotas vienā krāsu skalā ar slāņa virsmu.

Veicot struktūrkaršu reljefa informācijas salīdzinājumu ar urbumu informāciju, iestrādājot tās modelī, tika konstatēts, ka urbumu sakritība ar virsmu ir laba, jo īpaši pamatklintāja un ordovika virsmām (6.1. att. – A un B). Tas apstiprina to, ka lielākā daļa šajā pētījumā izmantoto urbumu ir iekļauta faktiskā materiāla kopā, kas izmantots šo struktūrkaršu izstrādei. Augstāk iegulošo virsmu struktūrkartēm, t.i., devona Pērnavas un Amatas svītu

virsmām (6.1. att. – C un D), sakritība ar urbumu informāciju samazinās, kur daļa urbumu labi sakrīt ar karšu reljefa informāciju, bet daļa nesakrīt. Šāda nesakritība var būt skaidrojama ar karšu izveidei lietotās datu kopas nepilnību – šajā datu kopā neietilpst tie urbumi, kas izveidoti pēc karšu materiālu sagatavošanas, kā arī izvēlēta vertikālā diskretizācija ir neatbilstoša šo materiālu korektai savietojamībai.

Informācija par lūzumiem šajās kartēs ir atspoguļota līniju veidā, sniedzot informāciju tikai par to telpisko izplatību, garumu un orientāciju. Lūzumi, kas ir izsekojami vairākos struktūrstāvos, tostarp pamatklintāja virsmā, kartēs ir atspoguļoti ar savstarpēju nobīdi, t.i., līnijas virsmās neprecīzi dublē viena otru. Daļa lūzumu līniju nav pamatotas ar pārvietojumiem gar tiem, kā arī konstatētas iespējamās nedokumentētās lūzumu zonas, kas nav iestrādātas kartogrāfiskajos materiālos. Kartēs atspoguļotais pārvietojums gar lūzumu līnijām tiek apstiprināts arī urbumos, kas izvietoti gar lūzumiem. Pamatklintāja un ordovika virsmās šādu zonu nav daudz, un urbumu neklātajās teritorijās virsmas interpretācija galvenokārt veikta, balstoties uz seismiskās izpētes rezultātiem, kas iestrādāti kartēs izolīniju formā.

Latvijas pamatiežu zemkvartāra nogulumu izplatības karte mērogā 1:200 000 sniedz detalizētu informāciju par nogulumu horizontālo izplatību. Šī informācija sniedz ļoti labu priekšstatu par slāņkopu horizontālo diferenciāciju, bet satur ļoti minimālu informāciju par nogulumu vertikālo sadalījumu. Uz šiem materiāliem balstīta nogulumu izplatības apgabalu iestrāde modelī D₂nr – J slāņkopai.

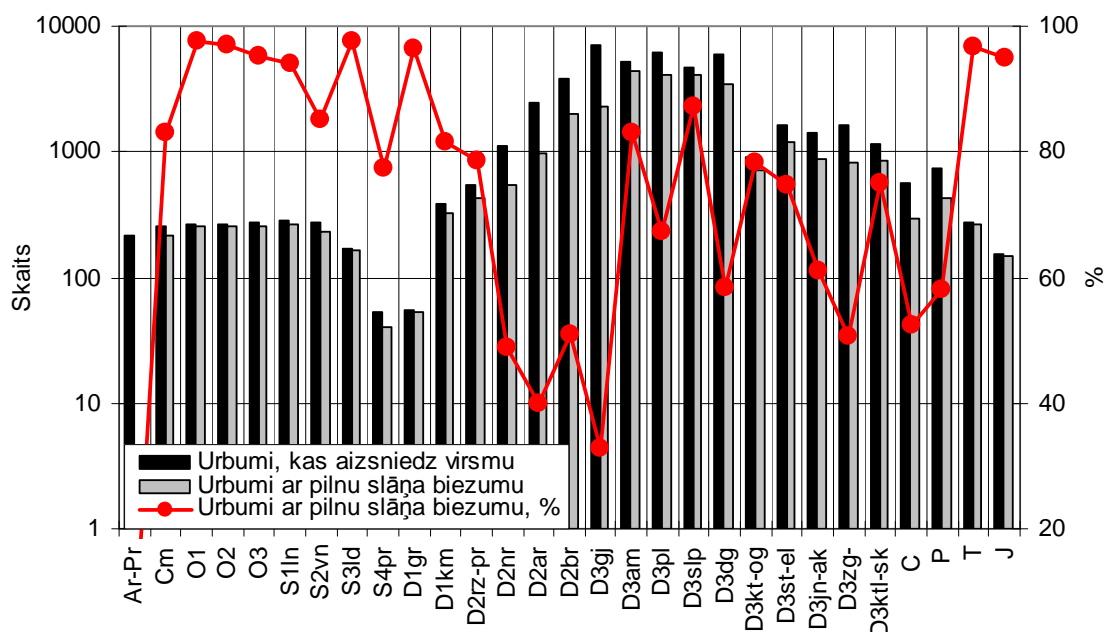
Savietojot šo materiālu ar urbumu informāciju, konstatēta urbumu izkliede ārpus kartē atspoguļotajām teritorijām. Pamatojoties uz to, izplatības apgabalu robežām veikta pārvērtēšana pēc piederošajiem urbumiem, kas ir aktuāli šo izplatības apgabalu iestrādei modelī. Šo robežu korekcija veikta stratigrāfiskajām vienībām, kurām modeļa izstrādē konstatēta nesaderība, izplatības informāciju papildinot pēc urbumu koordinātēm, kuri neiekļaujas izplatības apgabalā. Šīs problemātikas piemēri apskatīti 7.1. nodaļā.

No dažādiem publicētajiem materiāliem izmantotās kartoshēmas ir atšķirīga mēroga (Brangulis un Konšins, 2002; Гайлите и др., 1987) un pētījumā izmantotas informatīviem mērķiem, kas papildina stratigrāfiskajām vienībām piederošo urbumu informāciju, dažādu stratigrāfisko vienību nogulumu izplatības apgabalu apzināšanai, piemēram, Kaledonijas struktūrstāva nogulumu izplatības shēmas. Šādi materiāli nav tieši izmantojami modeļa būvēšanai, jo nesatur korekti atspoguļojamu telpisko informāciju un nav ģeoreferencējami, bet apvienojumā ar urbumu informāciju atvieglo izplatības apgabalu iestrādi modelī.

6.2. Urbumu informācijas izvērtējums

Urbumu informācija pētījuma realizācijā definēta ar vislielāko prioritāti. Tā sniedz visplašāko informāciju par nogulumu izplatības un saguluma apstākļiem, to vertikālo sadalījumu. Šī informācija ir pietiekami detalizēta, un tā sniedz datus par slāņu stratigrāfisko iegulumu, virsmas un slāņu biezuma sadalījumu 0,2 m līdz 10 m izšķirtspējā (3.1. tabula).

Nereti urbumu vertikālā griezuma aprakstos iztrūkst kāda slāņa biezuma daļa, kā arī slāni raksturojošo urbumu skaits ievērojami variē slāņkopu ietvaros. Veicot urbumu kopas statistisko analīzi pēc modeļa stratifikācijas ar mērķi nodalīt datu kopu slāņu biezumu interpolācijai, iegūtas divas urbumu datu kopas katram modeļa slānim – urbumu kopa, kas tikai aizsniedz slāņa virsmu, un urbumu kopa, kas reprezentē slāņa pilno biezumu (6.2. att.).



6.2. attēls. Urbumu skaita sadalījums un procentuālā attiecība pēc modeļa stratifikācijas

(sagatavojis autors, pēc LVĢMC, bez dat.). Attēlā parādīta urbumu skaita, kas aizsniedz slāni, un urbumu skaita, kas raksturo pilnu slāņa biezumu, skaitliska un procentuāla attiecība attiecībā pret slāni.

Urbumu kopas sadalījumā pēc modeļa stratifikācijas novērojamas vairākas tendences, kur urbumu apjoms slāņos variē nogulumu vertikālās un horizontālās diferenciācijas dēļ. Bet to urbumu procentuālā attiecība, kas raksturo pilnu slāņa biezumu pret visiem urbumiem, kas ir slānī, ievērojami variē visa ģeoloģiskā griezuma diapazonā no 32 % D₃gj slānī, (no 7098 urbumiem pilnu slāņa biezumu raksturo tikai 2323) līdz 98 % S₃ld un O₁ slāņos, kur visu urbumu skaits ir 261 un 171, bet urbumu ar pilno slāņa biezumu – 258 un 167.

Attiecībā uz dziļākajiem slāņiem, Cm līdz D₂rz-pr slāņkopai, no slāņiem piederošo urbumu skaita pilnu slāņa biezumu raksturojošo urbumu skaits svārstās nedaudz, aptuveni 80 – 100 %, kas izmantojami modeļa slāņu ģenerācijā. Līdzīgi ir arī augšējiem modeļa slāņiem, t.i., T un J slāņkopām, kur pilnu slāņa biezumu raksturojošo urbumu skaits ir ap 95 % no

visiem urbumiem. Savukārt vidusdevona, augšdevona, C un P slāņkopās raksturīga ievērojama pilno urbumu skaita variācija pret visiem slāni aizsniegušajiem urbumiem diapazonā no 32 līdz 88 %, vidēji 62 %.

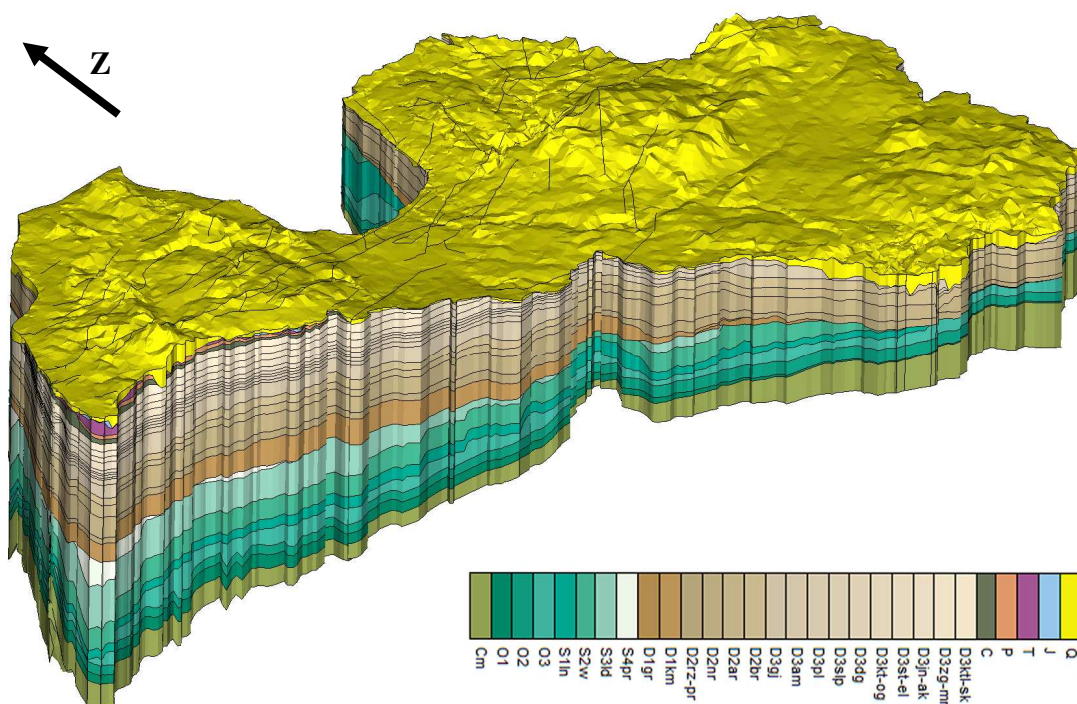
Proporcionāli pret urbumu skaitu uz slāņa izplatības apgabalu ievērojamākā diference novērojama vidusdevona un augšdevona slāņkopās. Šāda diferenciācija sniedz ierobežotu informāciju par katra slāņa augšu un apakšu, ievērojami apgrūtinot šo slāņkopu biezumu rekonstrukciju, iestrādi modelī un salīdzinājumu ar virsmas reljefu no urbumiem.

Visnepilnīgākā ģeoloģiskā informācija konstatēta urbumos, kas šķērso D_{2nr}, D_{2ar}, D_{2br}, D_{3jg}, D_{3dg}, D_{3zg}-mr, C un P slāņus, kur no visiem slāni sasniegušajiem urbumiem pilns slāņa biezums konstatēts tikai 30 – 60 %. Savukārt īpaši kvalitatīvi slāņkopu biezuma dati pret visu urbumu skaitu ir urbumiem, kas šķērso Cm, ordovika, S_{1ln}, S_{2vn}, S_{3ld}, apakšdevona, D_{3am} un D_{3slp} slāņkopas, kur pilns slāņa biezums konstatēts 80 līdz 98 % (6.2. att.).

7. 3D ĢEOLOĢISKAIS MODELIS LATVIJAS TERITORIJAI

Pētījumā algoritmizēti izveidots noslēgtu tilpumu 3D ģeoloģiskais režģis Latvijas teritorijai, kurā atspoguļota nogulumiežu segas ģeoloģiskā uzbūve ar tās galvenajiem struktūrelementiem (7.1. att.). Modelis sastāv no 30 slāņiem, kas izveidoti pēc izstrādātās modeļa stratifikācijas. Kopējo 3D modeļa ģeoloģisko struktūru veido 264535 punkti, ar horizontālo režģa punktu izšķirtspēju 1 – 4 km un vertikālo 10 – 300 m.

Reģionālo un lokālo struktūru implementācija modelī veikta, balstoties tikai uz faktiskā materiāla kopu, kas tika iegūta no urbumu un kartogrāfiskā materiāla, bet tektoniskās rajonēšanas shēmas netika izmantotas. Izveidotais modelis ļauj izvērtēt agrākos pētījumos interpretēto ģeoloģiskās uzbūves informāciju, uzlabot priekšstatus par slāņkopu laterālo izplatību, izvērtēt to biezuma un augstuma vērtību variācijas un zināmo informāciju par tektonisko lūzumu izkliedi un iežu bloku pārvietojumu gar tiem.



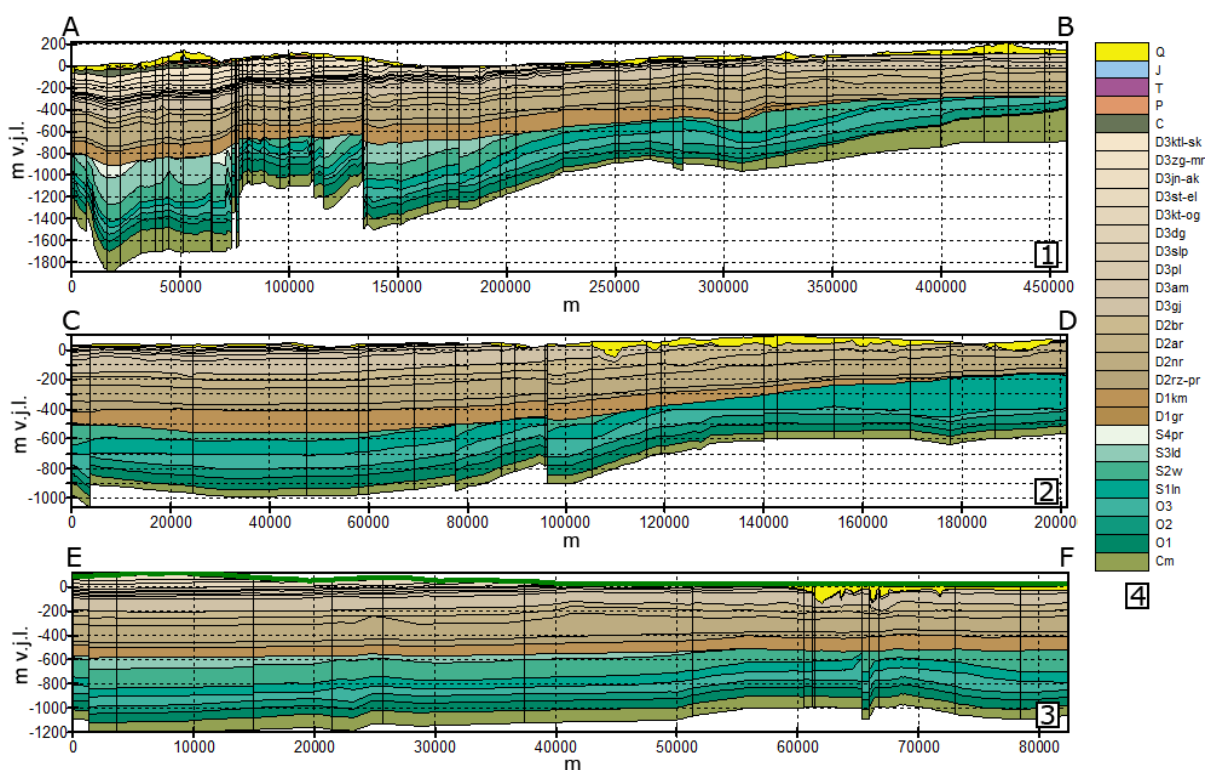
7.1. attēls. Latvijas teritorijas 3D ģeoloģiskā modeļa kopskats ZA virzienā (sagatavojis autors).

Vertikālais pārspīlējums 70:1.

Izveidotais modelis atspoguļo zināmo Latvijas teritorijas ģeoloģisko uzbūvi 3D, kurā var izšķirt starpreģionālās, reģionālās un subreģionālās struktūras (7.2. att.), iezīmējot arī lokālas struktūras, ja pieejamā urbumu informācija ir pietiekoša (7.3. att.).

Modeļa ģeoloģiskajā struktūrā ir skaidri izšķiramas Kaledonijas un Hercīnijas struktūrkompleksu reģionālās un subreģionālās tektoniskās struktūras, kur gar lūzumu līnijām iezīmējas arī lokālās struktūras (7.2. att.). 7.2. attēlā (1) attēlots griezumā pa profila līniju Bernāti – Šķaune, kas šķērso visu Latvijas teritoriju RA virzienā. Šajā griezumā Kaledonijas

struktūrkompleksa nogulumos ir skaidri izdalāmas tādas reģionālās tektoniskās struktūras kā Gdaņskas – Kursas depresija, Viduslatvijas monoklināle, Gulbenes depresijas D daļa un Daugavpils monoklināle, kā arī atsevišķi iežu bloku pacēlumi. No šīm struktūrām izteikti iezīmējas Gdaņskas – Kursas depresija (profila līnijas 0 – 75 km), kur tālāk labi atspoguļojas Saldus – Slokas – Inčukalna pacēlums. Viduslatvijas monoklināli var izdalīt griezuma līnijā, aptuveni 135 – 275 km. To no Daugavpils monoklināles var nodalīt ar vāji izteiktu Gulbenes depresijas D daļu. Hercīnijas struktūrkompleksa slāņos šis griezumšķērso Latvijas – Lietuvas depresiju un Latvijas sedlienes zonu, kur var izdalīt Bārtas ielieci, iezīmēt Saldus un Slokas vaļņu D laterālās daļas. Šī griezuma R daļā labi atspoguļoti slāņu krokojumi, kas atbilst Subates – Kokneses un Mežāres – Aglonas vaļņiem.

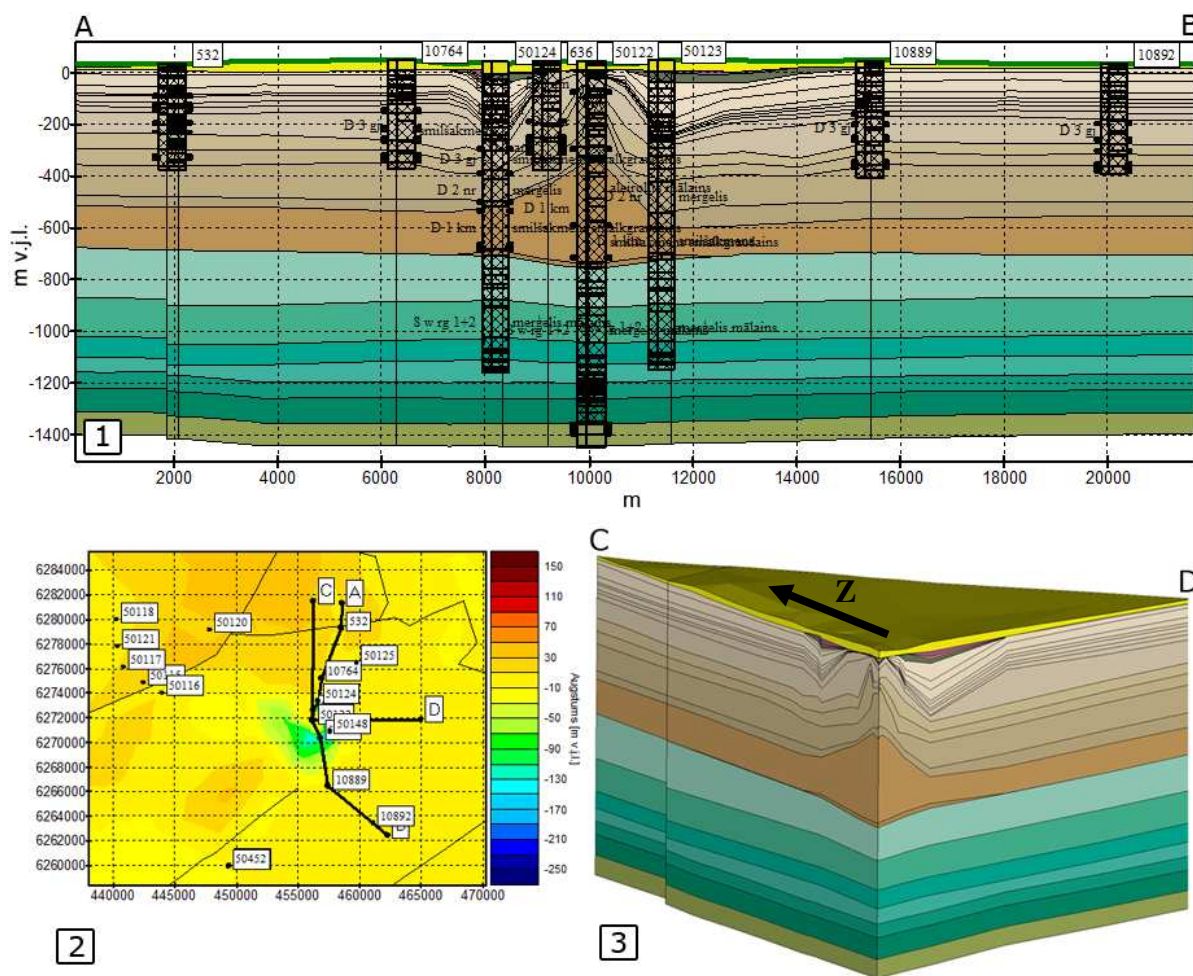


7.2. attēls. Reģionāla mēroga modeļa griezumš (sagatavojis autors). 1 – griezumš pa profila līniju A – B (vertikālā mēroga pārspīlējums 50:1; 2 – griezumš pa profila līniju C – D (vertikālā mēroga pārspīlējums 30:1); 3 – griezumš pa profila līniju E – F (vertikālā mēroga pārspīlējums 50:1); 4 – modeļa griezuma stratifikācija.

Griezumš līniju novietojums attēlots 1. pielikumā.

C – D griezumš (7.2. att. – 2) šķērso Latvijas teritorijas Vidzemes R daļu ZD virzienā, kur griezumš Kaledonijas struktūrstāvam piederošajos slāņos var skaidri izšķirt Inčukalna pacēluma R zonu (griezuma 7 – 10 km), kas atdala Viduslatvijas monoklināli un Limbažu kāples R daļu. Šajā griezumš Hercīnijas kompleksa slāņos var izsekot pakāpenisku pāreju no Latvijas – Lietuvas depresijas Igaunijas – Latvijas monoklinālē. Griezumš šķērso Inčukalna vaļņa R daļu, kas atspoguļojas D_{2nr} un D_{2ar} slāņos.

Griezums E – F (7.2. att. – 3) pa profila līniju Zante – Rīga atspoguļo Latvijas ģeoloģisko uzbūvi gar Rīgas Jūras līci RA virzienā. Šajā griezumā no 50. līdz 80. km iezīmējas lokālpacēlums, ko šķeļ atsevišķi lūzumi un kas pēc Kaledonijas struktūrkompleksa tektoniskās kartes atbilst Slokas – Inčukalna pacēluma centrālās zonas Z daļai (Brangulis un Konšins, 2002). Hercīnijas struktūrkompleksam atbilstošajā slāņkopā starp 15. un 30. km atzīmi vidusdevona slāņkopā var izsekot lokālpacēlumu, kas pēc Hercīnijas struktūrkompleksa tektoniskās kartes atbilst Slokas vaļņa Z daļai.



7.3. attēls. Dobeles astroblēmas atspoguļojums modeļa struktūrā (sagatavojis autors). 1 - Modeļa griezumā pa profila līniju A – B caur Dobeles astroblēmu, vertikālā mēroga pārspīlējums 5:1; 2 – D₃jn-ak modeļa slāņa virsma un profila līniju novietojums; 3 – Dobeles astroblēmas 3D atspoguļojums modeļa struktūrā pa profila līniju C – D, vertikālā mēroga pārspīlējums 5:1. Griezuma leģenda 7.2. attēlā – 4.

Tikai uz urbumu un struktūrkāršu informāciju pamatotas, modeļa struktūrā ļoti labi atspoguļojas arī lokālas, komplicētas ģeoloģiskās struktūras, no kurām kā labāko piemēru var minēt Dobeles astroblēmu (7.3. att.). Devona slāņkopas apakšējo daļu līdz D₂rz-pr slānim tuvākajā modeļa apgabalā apstiprina tikai trīs urbumi – 50124., 50122. un 50123. Sākot no D₂nr slāņa, struktūras uzbūvi raksturojošo urbumu skaits pieaug, līdz astoņiem urbumiem, kas

atspoguļoti modeļa griezumā (7.3. att. – 1). Augstāk iegulošos slāņus apstiprina vairāki urbumi, kopskaitā ap 20, bet tie struktūras griezumā nav atspoguļoti.

Dobeles astroblēmas struktūru pietiekami raksturo urbumu informācija ZR griezumā, bet DA virzienā pieejamās urbumu informācijas apjoms ir neliels (7.3. att. – 2). Tomēr, aplūkojot modeļa struktūru 3D (7.3. att. – 3), ir apjaušamas struktūras galvenās uzbūves īpatnības. Tādējādi, pat ierobežota apjoma informācija ir pietiekama, lai ar izmantotajiem modelēšanas rīkiem modeļa struktūrā iestrādātu šīs ģeoloģiskās struktūras galvenās ģeometriskās iezīmes un ļautu spriest par struktūras ģeoloģisko uzbūvi un veidošanās procesiem. Tomēr jāatzīmē, ka šāda mēroga struktūras ir jāapskata lielākā detalizācijā, papildus pievēršot uzmanību detalizētākai faktiskā materiāla interpretācijai.

7.1. Slāņkopu laterālās izplatības implementācija modelī

Ordovika līdz juras nogulumu slāņkopās ir izsekojami ierobežoti nogulumu laterālās izplatības apgabali. Modeļa izveides rezultātā šiem slāņiem tika atrisinātas izplatības apgabalu nesaistes problēmas, kas radušās, iestrādājot izplatības apgabalu robežas no agrāk publicētajiem materiāliem. Apskatot nogulumu izplatības apgabalus 3D slāņos, šajā pētījumā konstatēts, ka izplatības apgabalu problemātika iedalāma divās kategorijās:

- iepriekš sagatavotajos materiālos ir brīvi vilktas izplatības apgabalu robežas teritorijās bez urbumu informācijas;
- izplatības apgabalu neatbilstība aktuālajai urbumu informācijai.

Pirmās kategorijas problemātika novērota dziļāk iegulošajai ordovika – silūra slāņkopai, kas radusies, pārnesot izplatības apgabalu robežas no kartogrāfiskā materiāla. Šo slāņkopu raksturo neliels urbumu daudzums, kas ordovika silūra slāņkopā kopā ir 583 urbumi. Tādējādi bez slāņu telpiskas rekonstrukcijas agrākos pētījumos bija ievērojami sarežģīti brīvi novilkt stingru izplatības apgabalu robežu, neradot nesaisti ar citu slāņkopu nogulumiem.

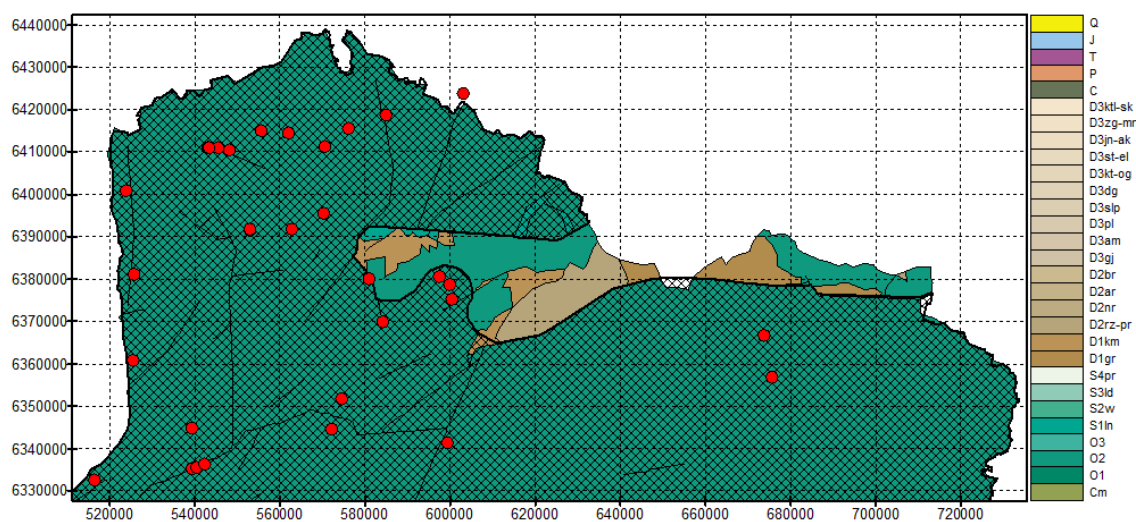
Otrās kategorijas problemātika vairāk raksturīga devona līdz juras nogulumu slāņkopai. Pieejamais faktiskais materiāls, kas raksturo šos nogulumus, ir ievērojami apjomīgāks nekā dziļāk iegulošajai slāņkopai, bet iepriekš sagatavoto nogulumu izplatības raksturojošo materiālu izstrādei nav izmantota visa šajā pētījumā izmantotā urbumu informācija, kas pēdējos gados ir ievērojami papildināta.

Izplatības apgabalu problemātikas novēršanai modeļa struktūrā tika ieviesti divi slāņi: viens nesaistes slānis starp ordovika – silūra un devona slāņiem, otrs – starp devona – juras nogulumu slāņkopu un kvartāra slāni. Pēc šo slāņu biezuma un izplatības variācijām tika uzskatāmi novērtētas problemātiskās vietas un izstrādāti risinājumi to novēršanai.

7.1.1. Ordovika – silūra slāņkopu laterālā izplatība

Ordovika nogulumu visā Latvijas teritorijā pārstāvēti samērā labi, tiek izsekotas visas trīs nodaļas, izņemot Latvijas ZA, Valmieras – Lokno vaļņa teritorija, kur ordovika griezuma augšējā daļa ir erodēta. Vektorizēto O₂ un O₃ nogulumu izplatības apgabalu kontūru iestrāde modelī radīja nesaisti starp O₂, O₃ un silūra slāņkopu no vienas puses un devona nogulumu apakšējo robežu no otras. Ņemot vērā to, ka šajās teritorijās nav urbumu, kas apstiprinātu šo slāņu esamību, O₂, O₃ izplatības apgabali tika ierobežoti pēc pārsedzošo nogulumu apakšējās robežas augstuma atzīmēm.

7.4. attēlā atainota modelī realizētā O₂ slāņa izplatība, vektorizētais nogulumu izplatības areāls (Brangulis un Konšins, 2002) un slāni raksturojošo urbumu izvietojums. Modelī šo nogulumu izplatības areāls ir modificēts, balstoties uz izgatavoto devona slāņkopas apakšējo robežu, kur O₂ slāņa laterālās robežas izvilkta pa līniju, gar kuru krustojas Devona apakšējā robeža ar slāni, kas izveidots, interpolējot O₂ nogulumu biezumu pa visu Latvijas teritoriju.

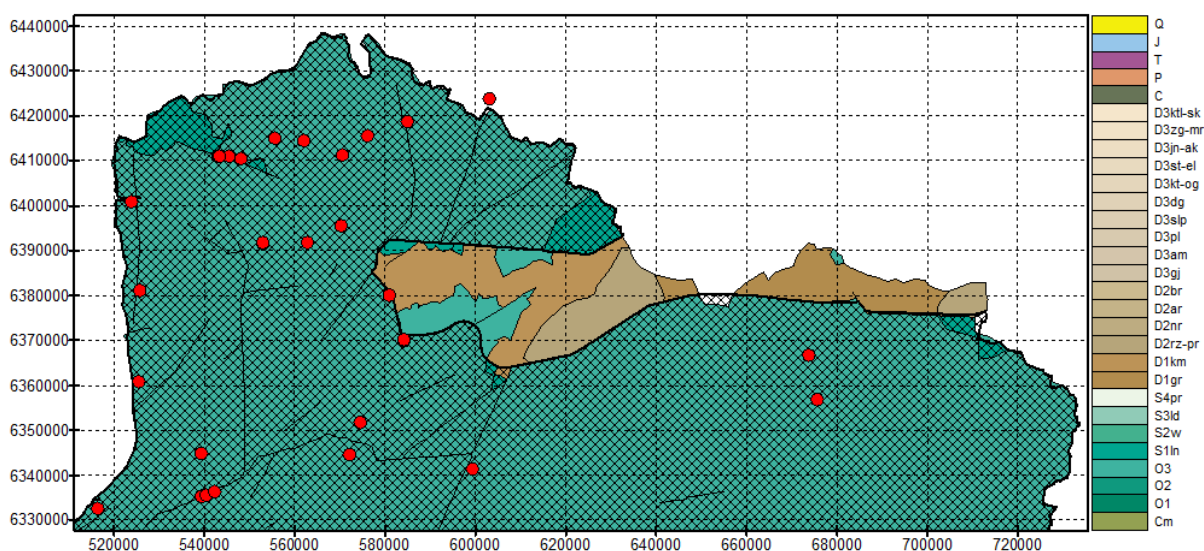


7.4.attēls. Modelī atspoguļotais O₂ nogulumu laterālās izplatības apgabals (sagatavojis autors).

Rūtotais krāsojums – vektorizētais nogulumu izplatības areāls (pēc Brangulis un Konšins, 2002), sarkanas krāsas punkti – urbumi, kur konstatēti O₂ nogulumu.

Augšējā ordovika izplatības apgabala iestrādei modeļa struktūrā izmantots līdzīgs risinājums kā O₂ slāņa iestrādē (7.5. att.). Šo abu izplatības apgabalu atšķirības ir salīdzinoši nelielas, un galvenās robežas, kas veido tektonisko lūzumu plaknes, abās virsmās ir identiskas. Atšķirības novērojamas tikai zonā starp lūzumiem, kas ir vērsti R-A virzienā, Valmieras – Lokno un Limbažu kāples robežzonā, kur devona slāņkopas diskordanti uzguļ gan ordovika, gan silūra slāņkopām, ierobežojot to izplatības robežas. Ordovika virsmā konstatētas arī vairākas vietas, kur Silūra apakša uzguļ O₂ slānim. Šajās teritorijās nav

pieejama urbumu informācija ne ordovika, ne silūra nogulumos un virsmu raksturs balstīts tikai uz struktūrkāršu reljefa informāciju un nogulumu biezumu interpolāciju.

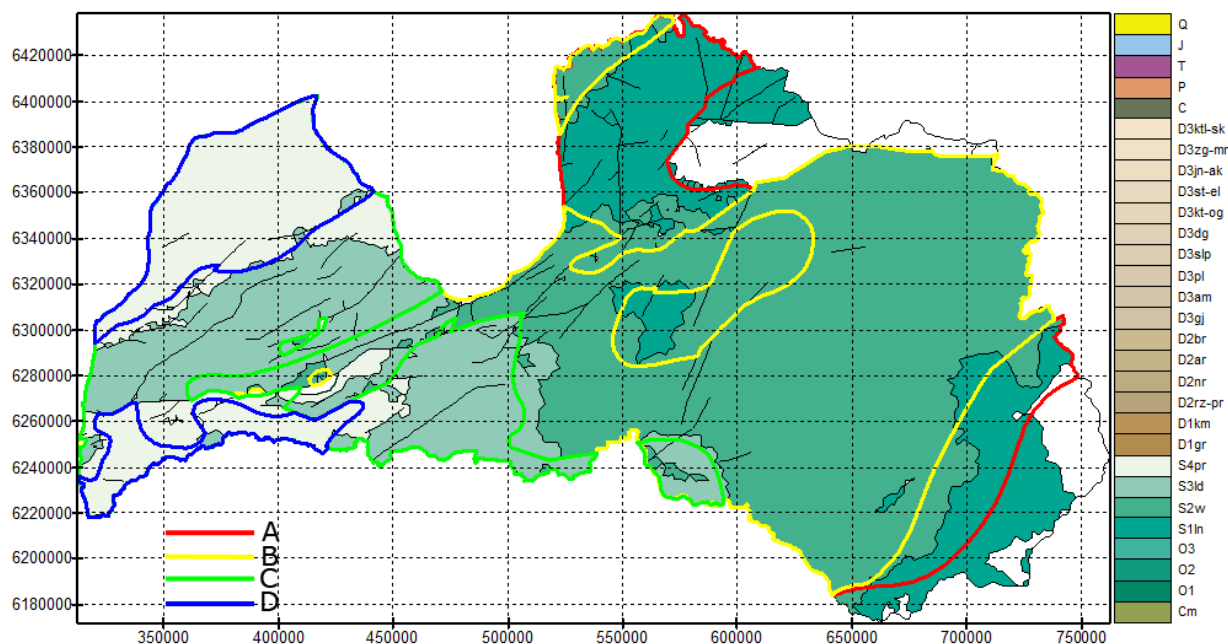


7.5. attēls. Modelī atspoguļotais O₃ nogulumu laterālās izplatības apgabals (sagatavojis autors).

Rūtotais ēnojums – vektorizētais nogulumu izplatības areāls (pēc Brangulis un Konšins), 2002, sarkanās krāsas punkti – urbumi, kuros konstatēti O₃ nogulumi.

Silūra nogulumi Latvijas teritorijā pārstāvēti ar visām četrām nodaļām. Silūra nogulumiem lielākajā Latvijas teritorijas daļā, tāpat kā O₃ slāņkopas augšdaļai Latvijas ZA teritorijā, devona nogulumi uzguļ ar stratigrāfisko un leņķisko diskordanci, kas ir ģeometriski iestrādāta modelī. Modeļa rezultāti apstiprina, ka pakāpeniska stratigrāfiskā pāreja starp silūra un devona slāņkopām novērojama tikai Kurzemes Z un D.

Modelī iestrādāto silūra nogulumu slāņu izplatības robežas ievērojami atšķiras no iepriekš publicētajiem materiāliem, kur veikta šo nogulumu laterālās izplatības interpretācija (Brangulis un Konšins, 2002; Гайлите и др., 1987). 7.6. attēlā ir parādīti šo slāņu izplatības apgabali, kas interpretēti ne tikai pēc iepriekš publicēto materiālu un urbumu informācijas, bet pamatoti arī ar slāņu biezuma variācijām. Tāpat šajā attēlā ir parādītas vektorizētās izplatības apgabalu robežas (Brangulis un Konšins, 2002), tādejādi ļaujot novērtēt atšķirības starp šīm interpretācijām. Iestrādājot modelī izplatības apgabalus pēc agrākos pētījumos sagatavotiem materiāliem, starp silūra un devona slāņkopām tika konstatēta ievērojama nesaiste, dažviet līdz pat 100 un vairāk metriem, kas ievērojami samazināta, koriģējot silūra augšdaļas nogulumu izplatības apgabalus (7.7. att.). Šīs nesaistes mazināšana ar silūra nogulumiem pamatojama ar to, ka devona apakšējā robeža atbilst reģionālai erozijas virsmai, kur lielākajā daļā Latvijas teritorijas devona nogulumi ar stratigrāfisku un nelielu leņķisku diskordanci uzguļ silūra slāņkopai. Veicot urbumu informācijas analīzi, modeļa struktūrā nav atrasti apgabali ar lielu nesaisti, ģeoloģiski korekti būtu izlīdzināma uz devona slāņkopas rēķina.



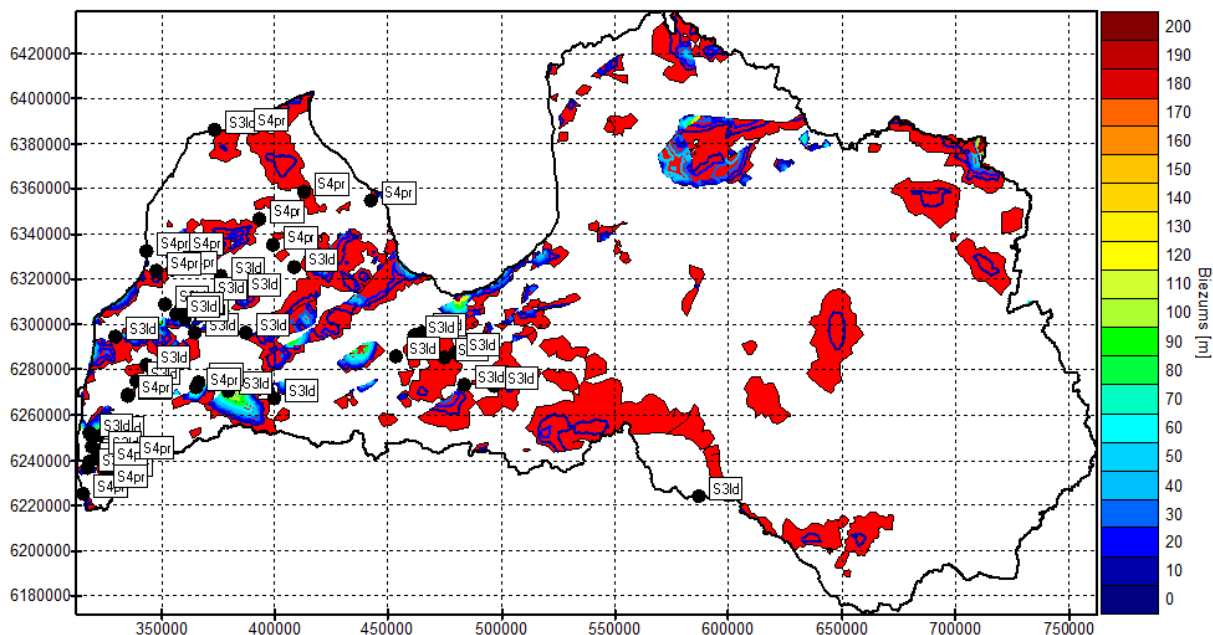
7.6. attēls. Modeļa struktūrā atspoguļoto silūra nogulumu izplatības apgabali un to salīdzinājums ar kartogrāfisko materiālu (sagatavojis autors). A – S₁ln, B – S₂vn, C – S₃ld, D – S₄pr slāņu vektorizētās izplatības apgabalu ārējās robežas (pēc Brangulis un Konšins, 2002). Ar krasu atspoguļoti silūra nogulumu izplatības apgabali modeļa struktūrā.

S₁ln slānim galvenās korekcijas veiktas Latvijas DA daļā, kur modeļa izplatības apgabala robeža pret vektorizēto robežu pārvirzīta A virzienā, izkļīlējot slāni devona slāņkopā. Valmieras – Lokno vaļņa teritorijā uz Z no Valmieras lūzuma veiktas nelielas korekcijas, izplatības robežu pārvirzot līdz šim lūzumam. Latvijas teritorijas A daļā S₂vn slāņa izplatības iestrādei pielietota līdzīga pieeja, tikai mazākos apmēros, jo, pateicoties S₁ln korekcijām, pēc S₂vn biezumu interpolācijas šī nesaiste novērsta automātiski. Vidzemes vidienē konstatēta nesaiste starp silūra un devona nogulumiem S₂vn slānim. Šajā teritorijā veikta S₂vn slāņa izplatības apgabala korekcija, kur iepriekšējās interpretācijās definētais ierobežotais laukums bez Venlokas nogulumiem aizpildīts ar tiem un pielīdzināts devona slāņkopas apakšai, iegūstot modelī atspoguļoto slāņa izplatību (7.6. att.).

S₃ld un S₄pr slāņu virsmu rekonstrukcija bija ievērojami komplicētāka, jo šo slāņu izplatības apgabali skar teritorijas, kas ir saņemtas ar lūzumu zonām, un tas daudzviet ievērojami palielināja nesaisti starp silūra un devona slāņkopām.

Veicot urbumu stratigrāfisko vienību biezumu analīzi, tika modificētas šo slāņu izplatības robežas, tās turpinot līdz lūzumu līnijām, tādējādi iestrādājot ģeoloģiski korektu slāņu sagulumu. Tas tika realizēts tikai teritorijās, kurās nav urbumu informācijas. Papildus šiem slāņiem tika veikta biezumu rekonstrukcija teritorijās, kur tiem tieši uzguļ devona nogulumi. Šīs vietas atspoguļojas urbumu griezumos ar samazinātu biezumu. Šādus biezuma

datus savstarpēji interpolējot, tiek iegūta anomāla biezumu variācija starp urbumiem, kas novērsta, piešķirot šiem urbumiem biezuma vērtības, kas pārņemtas no tuvākā urbuma, kurā konstatēts netraucēts slāņa biezums.



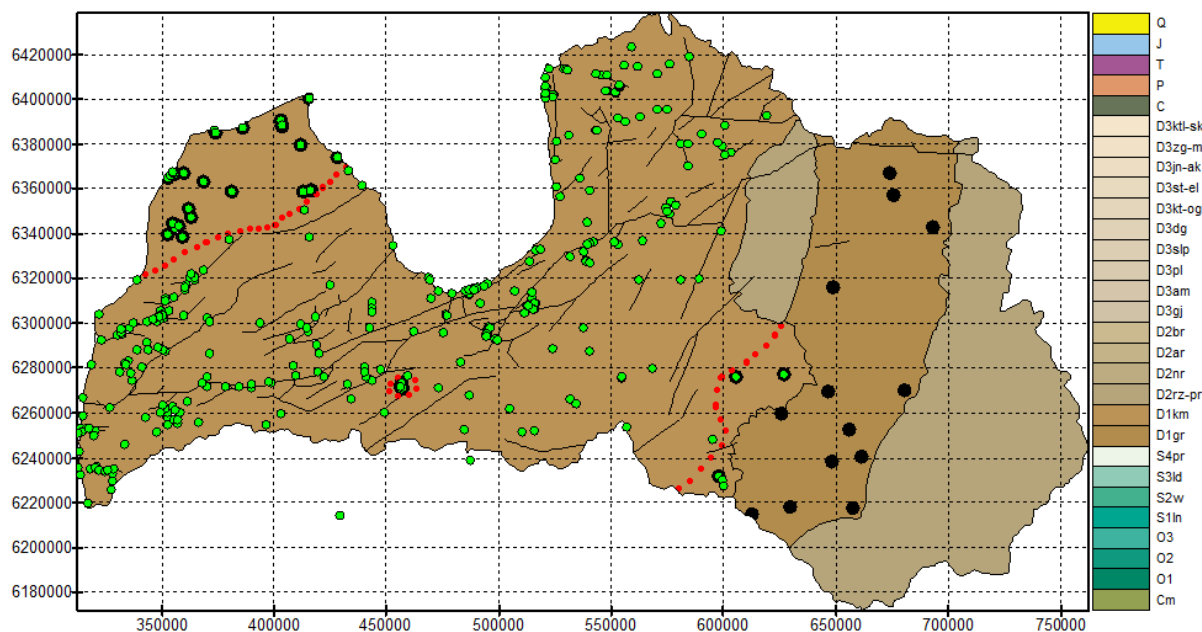
7.7. attēls. Nesaistes slānis starp silūra un ordovika slāņkopām ar nesaistes biezuma vērtību izolīnijām (sagatavojis autors). Ar punktiem attēloti manuāli pievienotie biezuma punkti S_{3ld} un S_{4pr} slāņkopām. Neaizkrāsotajos laukumos nesaistes nav.

Pēc nogulumu izplatības apgabalu rekonstrukcijas ir konstatētas atsevišķas teritorijas, kurās nav pieejama urbumu informācija, bet ir konstatēta liela nesaiste starp silūra un devona slāņiem. Nesaistes amplitūda variēja no 10 līdz pat 200 metriem. Šajās teritorijās arī tika veikta manuāla biezumu interpretācija, izvietojot papildus punktus, kuros slāņa biezums definēts no tuvākā urbuma (7.7. att.). Kopumā modeļa struktūrā tika iestrādāti 34 papildu punkti S_{3ld} un 22 punkti S_{4pr} slānim. Šādi bija iespējams samazināt nesaistes slāņa biezumu no 0 līdz 10 m, kas pieņemts kā labs rezultāts. Šis nesaistes slānis izņemts no modeļa struktūras, dziļāk ieguļošo slāņu augstuma vērtības pārdefinējot uz devona slāņkopas apakšējās robežas augstuma vērtībām.

Pēc šīs interpretācijas atsevišķās teritorijās (7.7. att.) vēl saglabājas ievērojami nesaistes biezumi. Problemātiskās vietas nav saistītas ar slāņu izplatības un biezumu problemātiku, bet gan ar iežu bloku pārvietojuma amplitūdu un tās mainību gar lūzumiem, iespējamo lūzumu iztrūkumu un citu ar lūzumiem saistītu problemātiku, kas apskatīta 7.2. nodaļā.

7.1.2. Devona – juras slāņkopu laterālā izplatība

Devona – juras slāņkopu modelī ir reprezentēta ar 20 slāņiem, no kuriem tikai divi – D_{2rz-pr} un D_{2nr} – izplatība aptver visu Latvijas teritoriju. Sākot no D_{2ar} , pārējie slāņi ar dažādu izplatības apjomu atsedzas zemkvartāra virsmā, neskaitot DR daļu, kur tos pārsedz karbona – juras slāņkopas nogulumu. Zināmie nogulumu izplatības apgabali modeļa struktūrā ir koriģēti, lai atbilstu modeļa ģenerācijā izmantoto urbumu datiem (7.9. att.).



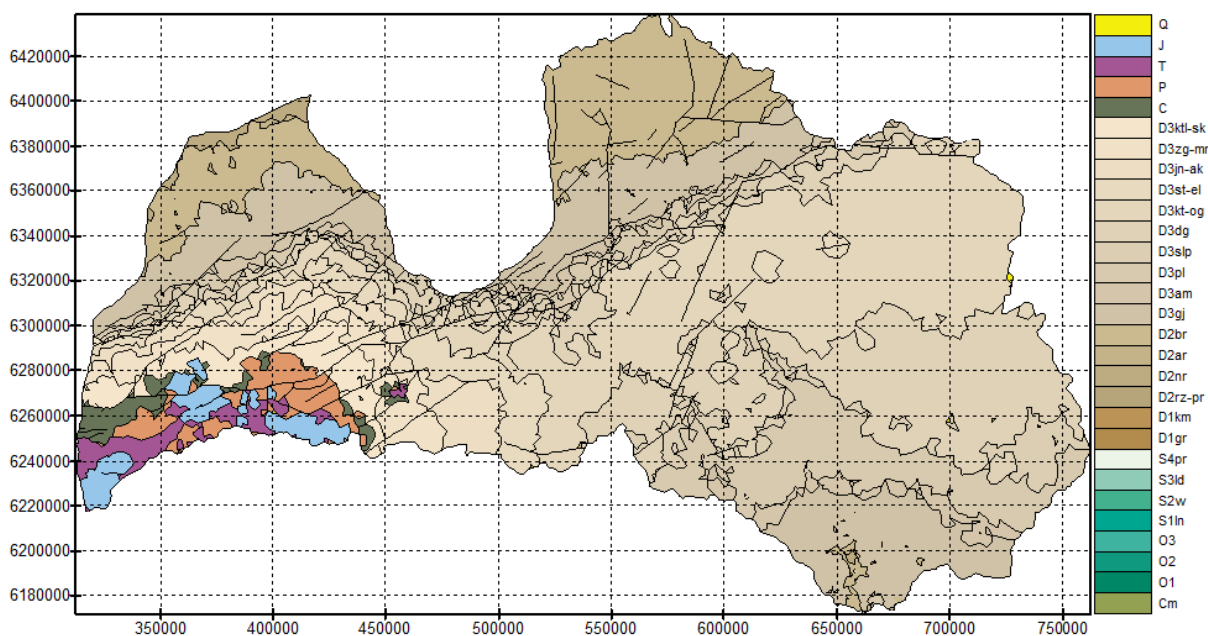
7.8. attēls. D_{1gr} , D_{1km} , D_{2rz-pr} slāņu izplatības apgabalu atspoguļojums modeļa struktūrā ar urbumu informācijas papildinājumu (sagatavojis autors). Punkti melnā krāsā – D_{1gr} apstiprinošie urbumi; punkti zaļā krāsā – D_{1km} apstiprinošie urbumi; sarkanā pārtrauktā līnija – D_{1gr} izplatības apgabala robežas zem D_{1km} slāņa.

Silūra un devona robeža modelī ir atspoguļota ar D_{1gr} , D_{1km} un D_{2rz-pr} slāņiem, kas dažādā apjomā uzguļ silūra augšējiem slāņiem. D_{1gr} un D_{1km} nogulumu ierobežoto izplatības areālu dēļ, tos raksturojošo urbumu skaits ir visai neliels. D_{1gr} slāni aizsniedz 55 urbumi, bet D_{1km} slāni – 395 urbumi, kas apgrūtina šo nogulumu izplatības robežu precīzu definēšanu. D_{1gr} slāņa iestrāde modelī balstīta uz Kaledonijas struktūrkompleksa ģeoloģiskajā kartē (Brangulis un Konšins, 2002) atspoguļoto izplatību, kas papildināta ar urbumu informāciju. D_{1km} slāņa izplatības apgabala iestrāde balstīta uz urbumu informāciju, kur šo nogulumu robeža vilkta starp urbumiem, kuros konstatēts šis slānis, un urbumiem, kuros konstatēts tikai D_{2rz-pr} slānis. Salīdzinot ar agrāk izdotajos materiālos interpretēto D_{1gr} un D_{1km} slāņkopu laterālās izplatības apgabaliem, iestrādei modelī ir veikti daži to papildinājumi (7.8. att.), t.i., nedaudz koriģētas abu slāņu izplatības apgabalu robežas starp urbumu punktiem.

Sākot no D_{2ar} nogulumiem, vidusdevona, augšdevona un karbona – juras slāņkopām atbilstošo slāņu iestrāde modelī lielā mērā balstīta uz Latvijas ģeoloģiskajā kartē (LVGD

Pirmskvartāra) atspoguļotajiem stratigrāfisko vienību nogulumu izplatības areāliem. Papildus veiktas korekcijas pēc urbumu informācijas tajās teritorijās, kur konstatēti urbumi ārpus izplatības apgabalu robežām. Šo slāņkopu iestrādei modelī korekcijas veiktas vairākiem augšdevona un visiem karbona – juras slāņkopām atbilstošajiem slāņiem. Tādejādi modeļa struktūras izveidei koriģēti izplatības apgabali D₃gj, D₃slp, D₃zg-mr, D₃ktl-sk un C, P, T un J slāņiem. 7.9. attēlā atspoguļota modelī izveidotā zemkvartāra slāņu izplatības shēma, kurā redzami arī modificētie izplatības apgabali (7.9. att.).

Izplatība D₃gj slānim nedaudz koriģēta gar gandrīz visu Z robežu. Tā pavirzīta uz Z par 0 – 5 km tā, lai modificētajā izplatības apgabalā iekļautos visi urbumi, kuros konstatēts šis slānis. Reģioni, kuros veiktas lielākas izmaiņas, ir Vidzemes R daļā pie Limbažiem un Kurzemē pie Ugāles.



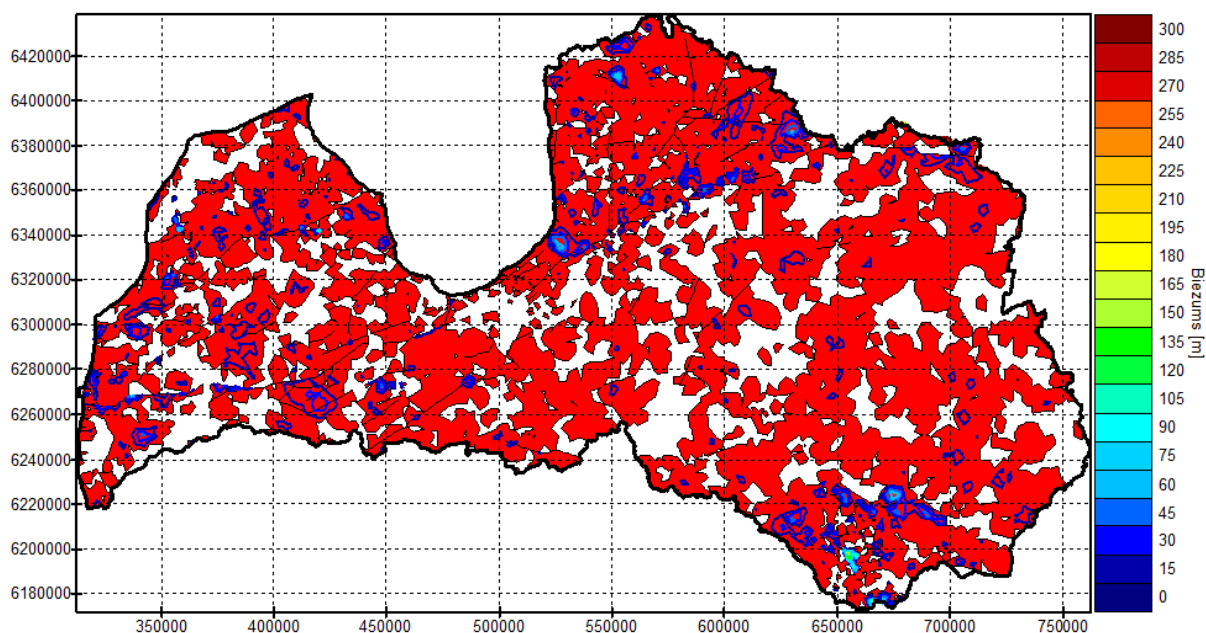
7.9. attēls. Pirmskvartāra nogulumiežu segas laterālās izplatības apgabalu atspoguļojums modeļa struktūrā (sagatavojis autors).

D₃slp slāņa izplatības robežas mainītas gar visu tā izplatības Z robežu, kā arī vietām Latvijas A daļā. Iestrādei modelī slāņa Z robeža vietām pavirzīta ne vairāk kā par 3 – 4 km uz Z, vietām saglabāta no Latvijas ģeoloģiskās kartes vektorizētās izplatības līnijas. Šīs robežas korekcijas nav pārlieku nozīmīgas, jo tikai nedaudzos modeļa apgabalos tiek atspoguļotas režģa izšķirtspējā. Lielākas izmaiņas veiktas Latvijas A daļā, pašos teritorijas DA izplatības robežu koriģējot pat līdz 20 – 25 km, novirzot to D virzienā. Tas veikts pamatojoties uz aptuveni 200 urbumu novietojumu ārpus Latvijas ģeoloģiskajā kartē definētā izplatības apgabala.

D₃zg-mr un D₃ktl-sk modeļa slāņos apvienotas vairākas stratigrāfiskās vienības. Modelī šīm slāņkopām atbilstošo slāņu izplatības apgabali balstās uz dziļāk iegulošās slāņi

ietvertās stratigrāfiskās vienības izplatības apgabalu robežām – augšdevona Mūru un Kelteru svītu izplatību, kas izplatītas tikai pašā Latvijas teritorijas DR daļā. Šī devona slāņkopas daļa pēc uzbūves un izplatības variācijām ir komplicētāka, jo vektorizēto izplatības apgabalu variācijas ir ievērojami detalizētākas par režģa izšķirtspēju un robežu variāciju ir grūti atspoguļot dotajā modeļa izšķirtspējā. Režģa trijstūru malu garumi ir 1 – 4 km, bet augstāk uzgulošo stratigrāfisko vienību nogulumu izplatības apgabalu ārējās robežas savstarpēji atšķiras tikai par 1 – 10 km. Salīdzinot Latvijas ģeoloģiskajā kartē atspoguļotos izplatības poligonus ar pieejamo urbumu informāciju, tika konstatēta nesaiste, pēc kuras šo slāņu izplatības robežas ir koriģētas režģa izšķirtspējas robežās, iekļaujot apgabalu robežās visus urbumus, kuros ir raksturoti šie slāņi, tā uzlabojot zināmās slāņu laterālās izplatības robežas.

Karbons – juras slāņkopa Latvijas teritorijā ir pārstāvēta fragmentāri, tikai nelielos laukumos DR daļā, kā arī Baltijas jūras akvatorijā. Šī slāņkopa ir pārstāvēta ar mazu urbumu skaitu (5.4. tabula), kas daudzviet neietilpa Latvijas ģeoloģiskajā kartē atspoguļotajos izplatības apgabalos. Lai nezaudētu urbumu informāciju biežumu interpolācijā, šo nogulumu izplatība tika koriģēta, iekļaujot visu pieejamo urbumu punktus.



7.10. attēls. Nesaistes slānis starp pamatiežu slāņkopu un kvartāra slāni, papildināts ar nesaistes biezuma vērtību izohipsām (sagatavojis autors). Sarkanā krāsā attēlotas teritorijas, kur konstatēta nesaiste; neaizkrāsotajos laukumos nesaistes nav.

Devona un karbons – juras slāņkopai piederošajos slāņos nav atspoguļotas raksturīgās aprakto ieleju veidotās reljefa formas un izplatības apgabalu konfigurācijas izmaiņas. Šajā pētījumā nav apskatītas zemkvartāra virsmā sastopamās apraktās ielejas, izņemot atsevišķos urbumos konstatētās.

Iestrādājot modelī veikto nogulumu izplatības apgabalu interpretāciju, starp kvartāra apakšējo robežu un devona – juras slāņkopu konstatētā nesaiste lielākajā modeļa teritorijas daļā ir 0 – 1 m robežās, atsevišķos apgabalos pieaugot līdz 30 metriem un dažos punktos līdz aptuveni 100 m (7.10. att.). Modeļa ģenerācijā tika pieņemts, ka 0 – 1 m nesaiste ir pieņemamā diapazonā un slāņu virsmu augstuma atzīmes pielīdzinātas modeļa Q slāņa apakšējai virsmai. Nesaiste starp šiem slāņiem diapazonā līdz 30 metriem pamatota ar subkvartāra virsmas kvalitāti, kuras izveidē nav ņemti vērā visi urbumi. Savukārt nesaistes vērtības līdz 100 m konstatētas apzināto aprakto ieleju teritorijās, kā arī teritorijās, kur urbumu informācija netieši norāda uz iespējamajām apraktajām ielejām. Tomēr tādēļ, ka modeļa struktūrā nav iekļautas aprakto ieleju struktūras, šī nesaiste tika izlīdzināta, pārņemot Q slāņa apakšējās robežas augstuma vērtības dziļāk ieguļošajiem slāņiem.

7.2. Lūzumi modeļa struktūrā

Modeļa ģeoloģiskajā struktūrā pēc publicētajām pamatklintāja, ordovika, devona Pērnavas un Amatas virsmu struktūrkartēm (Brangulis un Konšins, 2002) ir iestrādāti zināmie tektoniskie lūzumi pamatklintāja virsmā. Pēc izstrādātas metodikas, iežu bloku vertikālā pārvietojuma informācija no šīm struktūrkartēm ir implementēta modeļa struktūrā. Ar slāņu biezumu interpolāciju veiktā slāņu virsmu ģenerācija ļāva iestrādāt modeļa struktūrā iežu bloku pārvietojumu gar lūzumu līnijām arī tām ģeoloģiskajām virsmām, kam nav izstrādātas virsmu struktūrkartes ar šādu informāciju. Savukārt tas ļāvis veikt iepriekš publicēto struktūrkaršu lūzumu izvērtējumu, konstatēt problemātiskās vietas un noteikt modeļa struktūras apgabalus, kuros var definēt iespējamus nedokumentētos tektoniskos lūzumus.

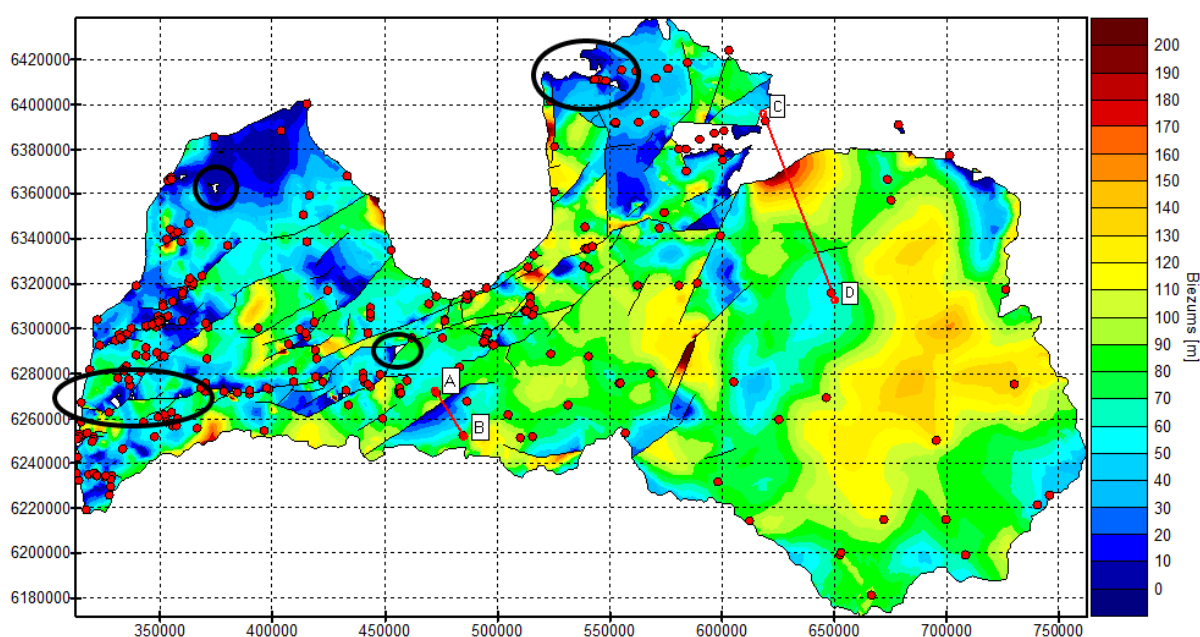
Dati par lūzumiem Latvijas R daļā ir pietiekami detalizēti, bet D daļā nepietiekamās ģeoloģiskās izpētes dēļ tektoniskā uzbūve ir vāji izpētīta, un pieejamā informācija ir nepietiekama korektam tektoniskās uzbūves atspoguļojumam ģeometriskajā modelī. Neskatoties uz veiksmīgo lūzumu iestrādi modeļa struktūrā, ir konstatētas vairākas problemātiskas zonas, par ko liecina nesaiste starp slāņu virsmām. Problemātiskās vietas konstatētas modeļa apgabalos, kurus raksturo ierobežots urbumu daudzums, tādēļ pārvietojuma datu iestrāde balstās uz reljefa informāciju no struktūrkartēm, kuru detalizācija ir atšķirīga gan vertikālā, gan laterālā mērogā.

7.2.1. Lūzumi pamatklintāja – silūra slāņkopās

Pēc modeļa izveides konstatēts, ka pamatklintāja – silūra slāņkopā modeļa struktūrā iestrādātie lūzumi pamatā ir korekti iestrādāti un pamatklintāja un ordovika struktūrkartēs atspoguļotā pārvietojuma informācija lielākoties ir korekta. Tomēr šajā pētījumā

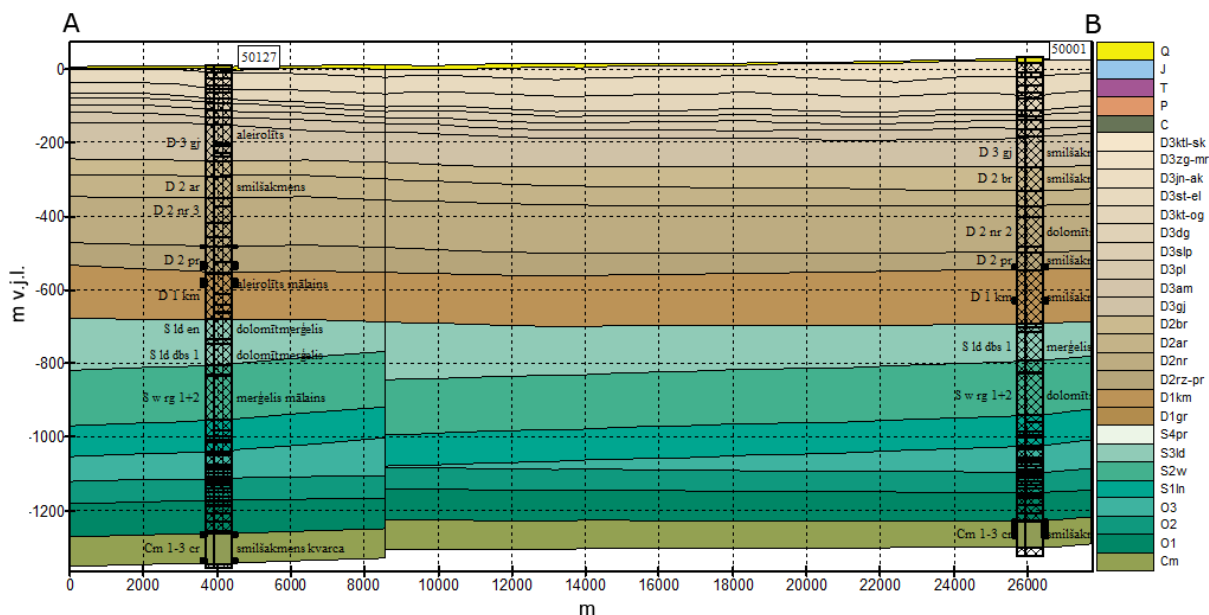
pamatklintāja – silūra slāņkopai ir konstatētas vairākas ar tektoniskajiem lūzumiem saistītas problēmas, kur struktūrkaršu izolīniju informācija bija pretrunā ar urbumu informāciju. Papildus ir konstatēti vairāki problemātiskie modeļa apgabali, kur pieejamā ģeoloģiskā informācija ir nepietiekama un, iespējams, nepilnīgi interpretēta iepriekšējos pētījumos, lai šo teritoriju problemātiku būtu iespējams korekti atrisināt modeļa izveidē.

Cm, O₁ un O₂ slāņiem pārvietojuma vērtības gar lūzumiem iegūtas, veicot šo slāņu biezuma vērtību interpolāciju un tās secīgi pieskaitot izveidotajai pamatklintāja virsmai. Tādejādi šai slāņkopai piešķirtas zināmas pārvietojuma vērtības gar lūzumu līnijām no pamatklintāja virsmas. Augstāk uzgulošais O₃ slānis ir izveidots, pamatojoties uz publicēto ordovika virsmas struktūrkarti. Lūzumu skaits šajās struktūrkartēs atšķiras, kur ordovika virsmā ir izsekojams mazāks skaits zināmo lūzumu.



7.11. attēls. O₃ slāņa biezuma variācijas modeļa struktūrā (sagatavojis autors). Ar melnu līniju apvilktas teritorijas, kurās ordovika virsmā atsedzas O₂ slānis. Sarkanās līnijas parāda profila novietojumu, kas atspoguļoti 7.12. un 7.13. attēlos.

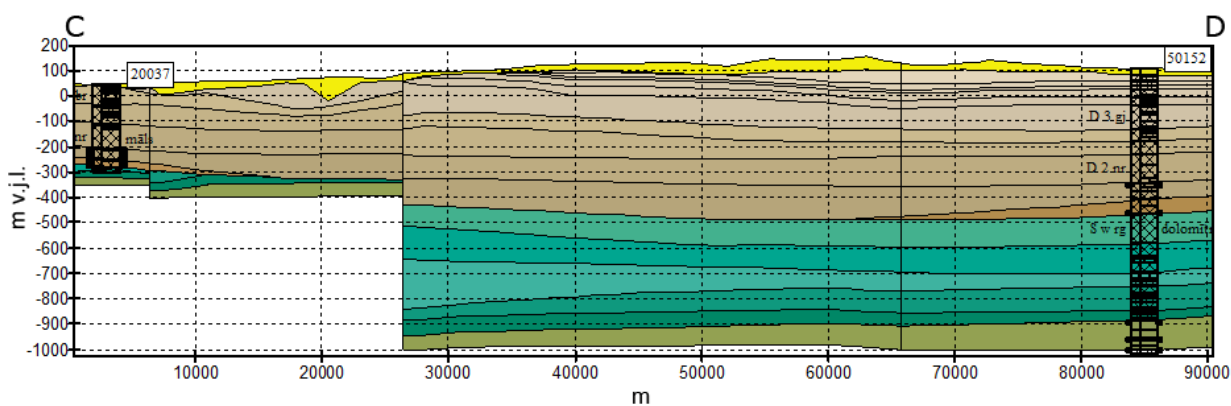
Pēc O₃ slāņa iestrādes modelī daudzviet šajā virsmā konstatētas nepamatotas biezuma izmaiņas gar lūzumu līnijām, kā arī atsevišķās vietās konstatēts, ka ordovika slāņkopas virsmā atsedzas O₂ slānis (7.11. att.). O₃ slāņa biezuma izmaiņas ir labs marķieris ar lūzumu informāciju saistīto vietu noteikšanai, kur anomālās biezuma izmaiņas liecina par ievērojamu O₃ virsmas augstuma atzīmju svārstību pret dziļāk iegulošajiem slāņiem, kā arī par nekorekto pārvietojuma vērtību interpretāciju gar lūzuma līnijām pamatklintāja vai ordovika virsmā. Problemātiskās vietas lielākoties konstatējamas tieši gar tiem lūzumiem, kur iežu bloku pārvietojuma amplitūda nav pamatota ar urbumiem.



7.12. attēls. Modeļa griezumus pa profila līniju A – B pār Jelgavas lūzumu (sagatavojis autors).

Griezuma vertikālais pārspīlējums 10:1. Profila līnijas novietojums parādīts 7.11. attēlā.

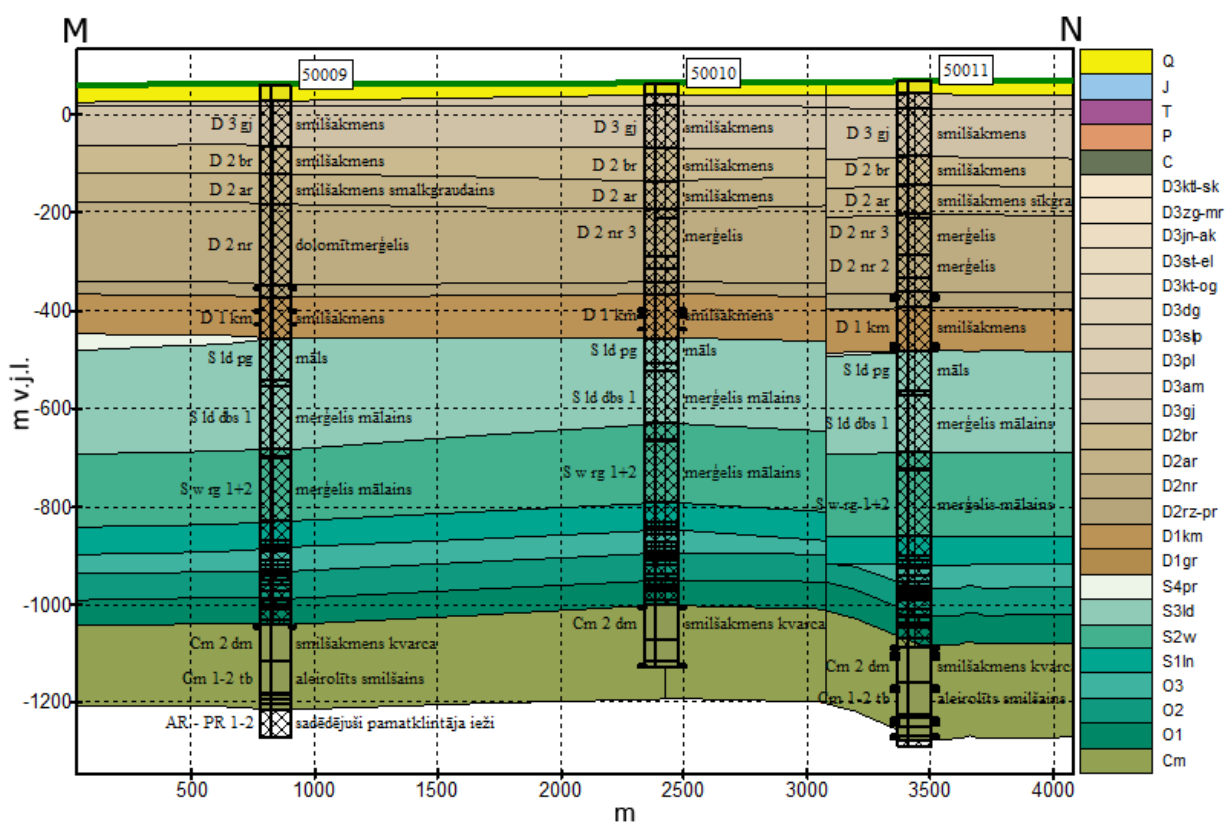
Piemērs šādai nesaistei starp pārvietojuma amplitūdām pamatklintāja un ordovika virsmām parādīts 7.12. un 7.13. attēlos. Griezums A – B (7.12. att.), kura kopgarums ir 26 km, šķērso Jelgavas lūzumu un ataino nesaisti pārvietojuma amplitūdās starp pamatklintāja un O₃ virsmu. Kā redzams šajos attēlos, O₃ slāņa biezums starp 50001. urbumu un lūzumu ievērojami samazinās no 73 m urbumā līdz 0 m lūzuma labajā pusē. Savukārt 50127. urbumā konstatētais O₃ slāņa biezums ir praktiski identisks 50001. urbumam, bet pakāpeniski pieaug līdz lūzuma līnijai, sasniedzot nedaudz vairāk kā 100 m. Tajā pašā laikā pārvietojuma vērtības pamatklintāja virsmā no šiem urbumiem tiek lineāri interpolētas līdz lūzuma līnijām, Cm, O₁ un O₂ slāņiem urbumu griezumos saglabājot konstantu biezumu abās lūzuma pusēs.



7.13. attēls. Modeļa griezumus pa profila līniju C – D pār Smiltenes – Apes lūzuma R daļu (sagatavojis autors). Griezuma vertikālais pārspīlējums 20:1. Profila līnijas novietojums parādīts 7.11. attēlā. Griezuma leģenda 7.14. attēlā.

Modeļa griezumam pa profila līniju C – D šķērso Smiltenes – Apes lūzumu, gar kuru novērojamas lielākās pārvietojuma vērtības Kaledonijas struktūrkompleksa iežos (7.13. att.). Šī griezuma sākumpunkts atrodas Valmieras – Lokno vaļņa R daļā, bet beigu punkts Gulbenes depresijas ZR daļā. Šī griezuma garums ir aptuveni deviņi kilometri un tas izvilktas modeļa struktūrā zonā, kur novērots vislielākais O₃ slāņa biezums – 200 m. Šajā teritorijā ģeometriskos uzbūvi nepamato urbumu informācija, kas varētu apstiprināt pārvietojuma amplitūdu.

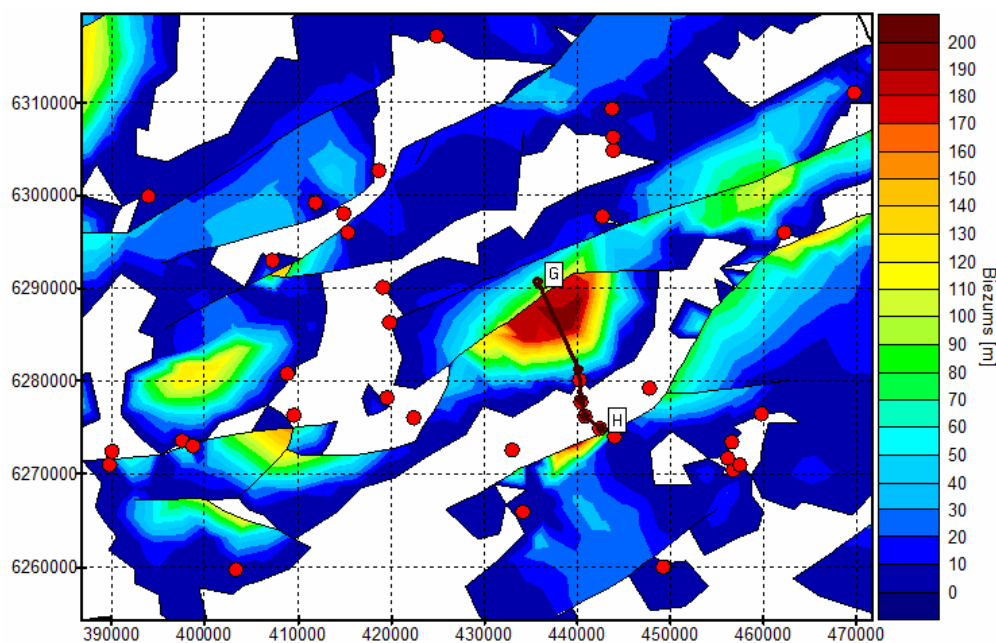
Tādejādi šie slāņi šajā modeļa apgabalā ir iestrādāti, pamatojoties tikai uz kartogrāfiskajā materiālā interpretēto reljefa informāciju, kur gan pamatklintāja, gan ordovika virsmas atspoguļotas ar necīgu informācijas daudzumu. Pēc Cm, O₁ un O₂ slāņu lineāras interpolācijas redzams, ka O₃ slānim veidojas nepamatoti liels biezums, kas 10 reizi pārsniedz tuvākajā 50152. urbumā aprakstīto O₃ biezumu, kas ir aptuveni 20 m.



7.14. attēls. Modeļa griezumam pa profila līniju M – N pār Usmas lūzuma R daļu (sagatavojis autors). Griezuma vertikālais pārspīlējums 0,5:1. Profila līnijas novietojums attēlots 1. pielikumā.

7.14. attēlā parādīts modeļa griezumam pa profila līniju M - N, kas šķērso Usmas lūzumu tā D daļā. Šo lūzumu un pārvietojuma amplitūdu gar to apstiprina vairāki urbumi, kas tam novietoti abās pusēs - 50010. urbums ar Cm slāņa absolūto atzīmi -1000 m un 50010. urbums ar Cm atzīmi -1080 m, veidojot kopējo pārvietojuma vērtību Cm slānim 80 m. Ordovika virsmā struktūrkartē ir korekti interpretēts bloku pārvietojums gar šo lūzumu, taču

pamatklintāja virsmā, pamatojoties uz urbumu informāciju, tas nav atspoguļots korekti. To apstiprina nepamatotu O₃ slāņa biezuma samazinājums līdz 0 m, lai gan šajos trijos tuvu esošajos urbumos – 50009, 50010. un 50011., – O₁, O₂ un O₃ slāņu biezumi ir vienādi vai ļoti līdzīgi. Gar šo lūzumu būtu nepieciešams veikt pārvietojumu vērtību korekciju pamatklintāja virsmā zemākajam iežu blokam Cm, O₁ un O₂ slāņos. Augstāk iegulošajam iežu blokam lūzuma kreisajā pusē interpretācija līdz lūzuma līnijai ir korekta.

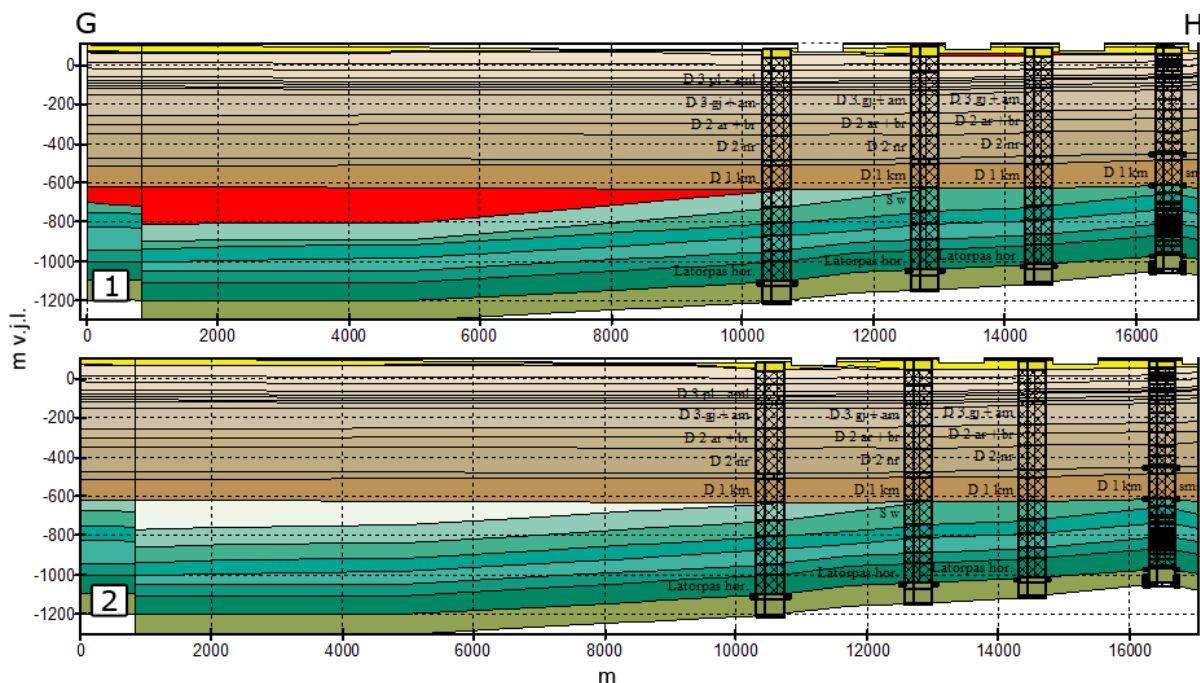


7.15. attēls. Nesaistes biezuma vērtības starp silūra un devona slāņkopām (sagatavojis autors). Ar sarkanajiem punktiem parādīti urbumu punkti, kuros konstatēti S₁ln, S₂vn, S₃ld un S₄pr slāņi. Neaizkrāsotajos laukumos nesaistes nav. G – H profila līnija atbilst modeļa griezumam, kas attēlots 7.16. attēlā.

Silūra slāņkopai atbilstošo modeļa slāņu virsmas ģenerētas pēc šo slāņu biezuma interpolācijas, iegūtās slāņu biezuma datnes secīgi pieskaitot O₃ virsmai. No augšas šī slāņkopa ierobežota ar devona slāņkopas apakšējo robežu. Tādējādi iežu bloku pārvietojuma vērtības silūra slāņiem ir pārņemtas no O₃ slāņa, bet vietās, kur silūra slāņi atsedzas tieši zem devona slāņkopas, šo slāņu virsmās pārvietojuma vērtības piešķirtas pēc devona slāņkopas vērtībām modeļa apgabalos, kuros devona slāņkopā ir lūzumi. Tā ir iegūta ģeoloģiski korekta silūra slāņkopas ģeometriskā uzbūve.

Tomēr daudzviet pēc iepriekš aprakstītas silūra slāņu izplatības apgabalu korekcijas starp silūra un ordovika slāņiem vēl bija vērojama nesaiste, kas variē 0 – 200 m diapazonā. Nesaistes vērtības izteikti izpaužas tieši gar lūzumu līnijām un atsevišķos blokos starp lūzumiem. Tas spilgtāk izteikts Latvijas D daļā, kur lūzumu skaits ir ievērojami lielāks nekā A daļā.

7.15. attēlā parādīts 7.7. attēla tuvinājums modeļa apgabalam, kur konstatēta vislielākā nesaistes vērtība starp šīm slāņkopām. Šo anomālo nesaistes vērtību cēlonis ir biezumu interpolācija starp urbumiem S_{2vn} , S_{3ld} un S_{4pr} slāņos, kur daudzviet, slānim ieguļot uzreiz zem apakšdevona nogulumiem, konstatēts samazināts biezums, kas nekorekti tiek interpolēts starp urbumiem ar pilnu slāņa biezumu.



7.16. attēls. Griezums pa profila līniju G – H starp Dobeles – Babītes un Slokas – Carnikavas lūzumiem (sagatavojis autors). 1 – modeļa griezumā, kas atspoguļo nesaisti starp silūra un devona slāņkopām (aizpildīta sarkanā krāsā), 2 – griezumā pēc S_{2vn} , S_{3ld} un S_{4pr} slāņu biezuma interpretācijas gar lūzuma līniju. Vertikālā mēroga pārspīlējums 5:1. Profila novietojums parādīts 7.15. attēlā. Griezuma leģenda 7.14. attēlā.

Šāda rakstura problēmas ir atrisinātas, gar lūzumu līnijām papildinot slāņu biezumu punktus ar vērtībām, kas atbilst tuvākajam urbumam ar pilno slāņa biezumu. 7.16. attēlā modeļa griezumā pa profila līniju G – H parādīts modeļa griezumā zonā ar lielāko nesaisti starp silūra un devona slāņkopām. Šajā zonā nav pieejams pamatojums urbumu griezumos, kas veicina S_{1ln} , S_{2vn} un S_{3ld} slāņu biezumu nekorektu interpretāciju. Pēc šādiem datiem iegūstot slāņu virsmu vērtības, tiek iegūta ģeoloģiski nepamatota ģeometriskā uzbūve (7.16. att. – 1). Lai atrisinātu šo un līdzīgu rakstura problēmas modeļa struktūrā, gar lūzumu ir veikta slāņu S_{2vn} un S_{3ld} biezuma vērtību korekcija, mainot tās uz vērtībām no tuvākā urbuma, tādējādi samazinot nesaistes vērtību par aptuveni 50 m. Savukārt pēc iepriekšējā nodaļā aprakstītās S_{4pr} slāņa laterālās izplatības apgabala koriģēšanas nesaiste starp S_{3ld} slāni un devona slāņkopu likvidēta, aizpildot nesaisti starp slāņiem ar S_{4pr} slāni (7.16. att. – 2).

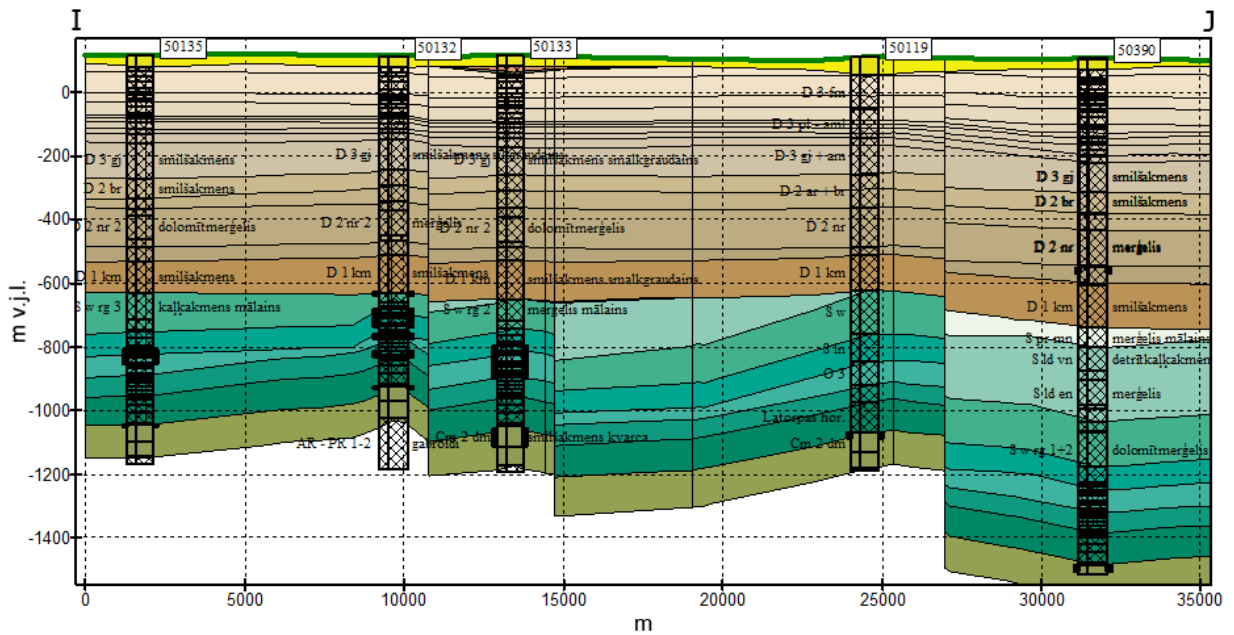
7.2.2. Lūzumi devona slāņkopā

Devona slāņkopā lūzumi un iežu bloku pārvietojuma vērtības gar tiem modeļa struktūrā ir pamatotas ar divu struktūrkāršu informāciju – vidusdevona Pērnavas svītas, kas modelī atbilst D_{2rz} -pr slānim, un augšdevona Amatas svītas, kas atbilst D_{3am} modeļa slānim. Pēc iepriekš aprakstītās metodikas D_{2rz} -pr slānī iestrādātās iežu bloku pārvietojuma amplitūda pārnesta visiem modeļa slāņiem no D_{2nr} līdz D_{3gj} ieskaitot. Savukārt D_{3am} slānī iestrādātās pārvietojuma vērtības pārnestas uz visiem augstāk iegulošajiem slāņiem, ieskaitot C slāni.

Šajās virsmās ir ievērojami mazāk konstatēto tektonisko lūzumu nekā dziļāk iegulošajos slāņos, un tie visi tiek klasificēti kā iespējamie lūzumi. Iepriekšējos pētījumos jaunveidoti lūzumi šajā slāņkopā nav konstatēti (Brangulis un Konšins, 2002). Tomēr atsevišķos modeļa apgabalos pēc modeļa rezultātiem iespējams iezīmēt zonas, kurās būtu iespējams definēt varbūtējas lūzumu līnijas, kas būtu jāapskata turpmākajos pētījumos kā atsevišķs uzdevums.

Zināmos iespējamos lūzumus šajā slāņkopā labi pamato urbumu informācija, jo, salīdzinot ar $C_m - S_{4pr}$ slāņkopu, devona nogulumu slāņkopas ģeoloģiskā uzbūve ir ievērojami labāk pamatota ar urbumiem (6.2. att.). Salīdzinot biezuma izmaiņas gar lūzumu līnijām, šajā slāņkopā praktiski nav konstatēti problēmapgabali ar iežu bloku pārvietojuma vērtībām, kā tas ir konstatēts kembrija – silūra slāņkopās. Šajā slāņkopā novērotās lielākās pārvietojuma vērtības ir aptuveni 75 m gar Liepājas – Saldus lūzumu Kurzemes D daļā, bet vidējā pārvietojuma amplitūda gar visiem izsekojamajiem lūzumiem svārstās 30 m robežās. Pārvietojumu sadalījums modeļa griezumā ir vienmērīgs, kas pamazām dzēšas samazinoties slāņu dziļumam, neskaitot atsevišķus lūzumus, kas ir izsekojami D_{2rz} -pr līdz D_{3gj} slānim, bet vairs nav apstiprināti $D_{3gj} - C$ slāņos.

D_{1gr} līdz D_{2rz} -pr modeļa slāņos ir iestrādāti Pērnavas svītas virsmā atspoguļotie lūzumi un to pārvietojuma vērtības. Tas veikts, no D_{2rz} -pr slāņa virsmas augstuma vērtībām atņemot D_{1gr} , D_{1km} , D_{2rz} -pr slāņu biezumus. D_{1gr} un D_{1km} slāņu pārvietojuma vērtības gar lūzumiem iegūtas, iepriekš izveidotajai devona slāņkopas apakšējai summējot klāt šo slāņu biezumus. D_{2nr} līdz D_{3gj} slāņiem ir iestrādātas pārvietojuma vērtības pēc D_{2rz} -pr slāņa, secīgi summējot klāt interpolētās slāņu biezuma vērtības. Bet $D_{3am} - J$ slāņu pārvietojuma atzīmes iegūtas, D_{3am} slānim summējot klāt katra slāņa biezuma atzīmes, tādejādi pārņemot D_{3am} slānī atspoguļotās pārvietojuma vērtības gar zināmajiem lūzumiem.



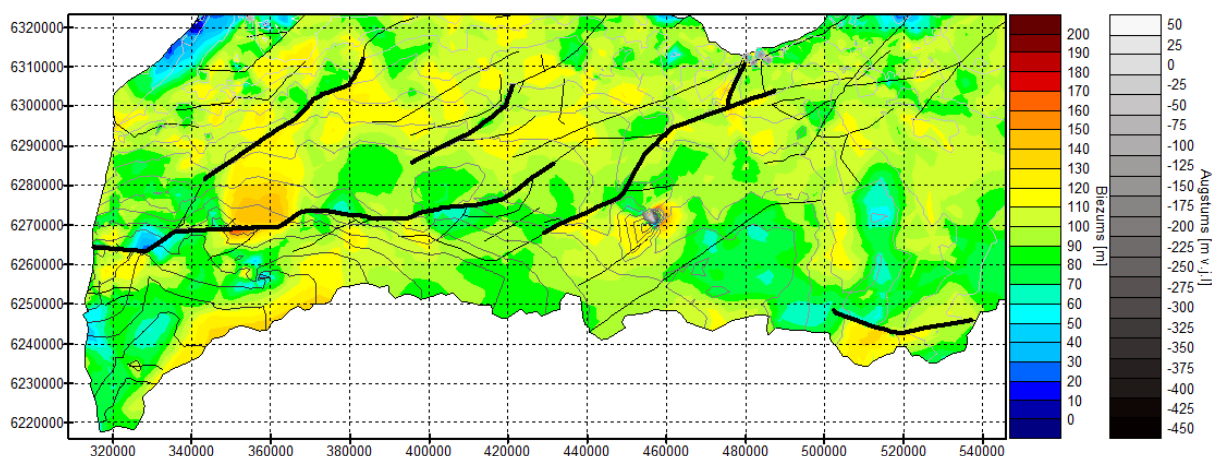
7.17. attēls. Modeļa griezumā pa profila līniju I – J starp Liepājas – Saldus un Dobeles – Babītes lūzumiem (sagatavojis autors). Vertikālā mēroga pārspīlējums 10:1. Profila novietojums attēlots 1. pielikumā. Griezuma leģenda attēlota 7.14. attēlā.

D₁gr slāņa izplatības apgabala robežās nav izsekojami tektoniskie lūzumi, izņemot Smiltenes – Apes lūzumu, kas šķērso D₁gr izplatības apgabala galējo Z apgabalu ar maksimālo pārvietojumu gar šo lūzumu 10 – 15 m. Tomēr šo lūzumu neapstiprina neviens tuvu esošs urbums, kura griezumā ir konstatēti šī slāņa nogulumu (7.8. att.).

Lūzumu struktūras ir izsekojamas sākot no D₁km slāņa, kura izplatība aptver Latvijas teritorijas R daļu un Vidzemes R teritoriju. Šajā slānī ir izsekojami praktiski visi Hercīnijas struktūrstāva lūzumi, izņemot jau pieminēto Smiltenes – Apes lūzumu. Lielāko daļu šajā slānī izsekojamo lūzumu apstiprina vai daļēji apstiprina urbumu informācija, kur urbumos definētās slāņa augstuma atzīmes apstiprina gar lūzumu līnijām iestrādātās augstuma atzīmes. Visi devona slāņkopā konstatētie lūzumi ir izsekojami līdz D₃gj slānim. Augstāk iegulošo slāņu izplatības apgabali pamazām samazinās, ierobežojot lūzumu izplatību, pārvietojumiem gar lūzumiem izzūd dot subkvartāra virsmā. Tomēr slāņu izplatības apgabalu robežās esošie lūzumi ir izsekojami līdz pat devona Famenas stāva nogulumiem. D₁km slānī lūzumus ar lielākajām pārvietojuma vērtībām gar tiem neviens urbums neapstiprina, jo tie neatrodas pietiekami tuvu lūzumiem (7.8. att.).

7.17. attēlā parādīts modeļa griezumā, kurš šķērso divus lūzumus, kur pārvietojuma vērtības gar tiem devona slāņkopas slāņos ir apstiprinātas ar nosacīti tuvu esošiem urbumiem. Salīdzinot ar dziļāk iegulošo slāņkopu, devona slāņkopā iestrādāto lūzumu pārvietojuma vērtības gar tiem ir 20 – 40 m, kamēr šiem pašiem lūzumiem Cm – S₄pr slāņkopās

pārvietojuma vērtības ir 100 – 300 m. D_3 am slāņa virsmā pārvietojuma amplitūda ir samazinājusies līdz aptuveni 15 m.

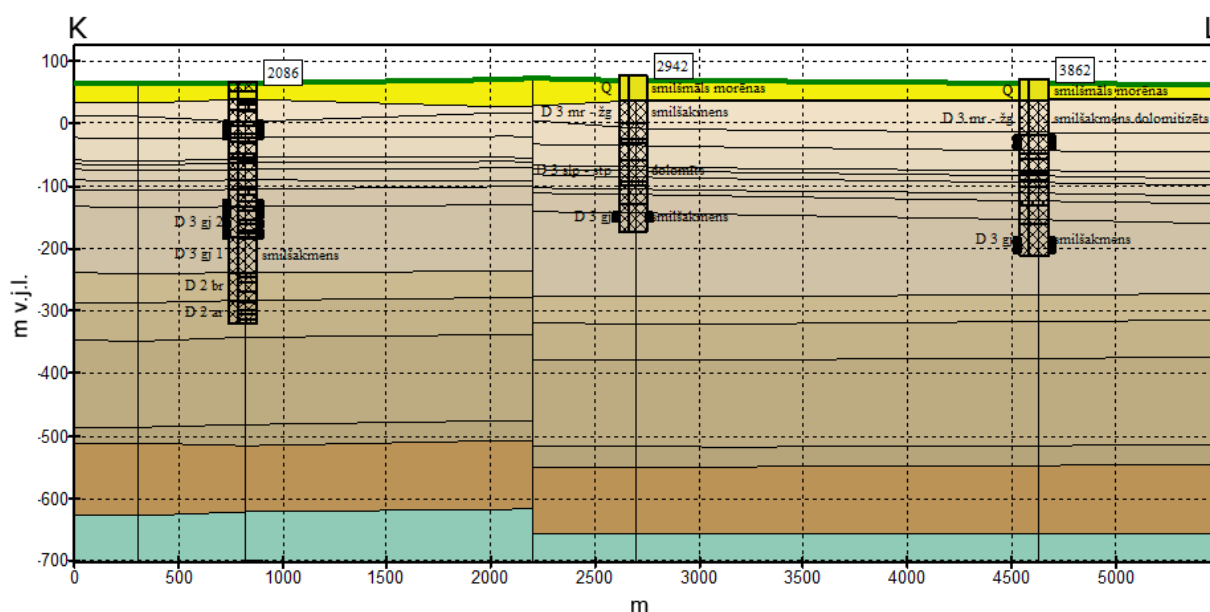


7.18. attēls. D_3 gj slāņa biezuma izmaiņas modeļa DR apgabalā (sagatavojis autors). Attēls papildināts ar D_3 gj slāņa virsmas izolīnijām. Ar melnu krāsu izceltās lūzumu līnijas atbilst devona Pērnavas un Amatas struktūrkartēs iestrādātajiem lūzumiem.

D_2 nr slānī daudzviet ir izsekojamas krasas biezuma vērtību svārstības, kas atspoguļojas arī augstāk iegulošo slāņu augstuma atzīmēs. Šīs izmaiņas apstiprina urbumu informācija. Šādas vietas netieši var norādīt uz iespējamo lūzumu atrašanās vietu. Tomēr šī slāņa virsmu raksturo ievērojami lielāks skaits urbumu nekā pilnu biezumu raksturojošie urbumi, tāpēc ir problemātiski izvērtēt biezuma svārstību iemeslus daudzos modeļa apgabalos. D_2 nr slāņa virsmas rakstura pārmantojums ir izsekojams gan D_2 ar, gan D_2 br slāņos, mainoties tikai gar izplatības apgabalu robežām, atkārtotot gan lūzumu struktūru ģeometriju, gan D_2 nr biezuma izmaiņu radītās slāņa virsmas variācijas.

D_3 gj slānis veidots, pamatojoties uz modeļa ģeometrijas izveidē izmantotajām abām devona struktūrkartēm, kur slāņa apakšējo robežu veido izgatavotā D_2 br slāņa virsma, bet augšējo – D_3 am slāņa apakša, kas iegūta pēc devona Amatas svītas struktūrkartes iestrādes modelī, no tās atņemot interpolētos D_3 am biezumus. Novērtējot biezuma izmaiņas gar zināmo lūzumu līnijām, modeļa rezultātos tikai atsevišķās vietās un nelielos modeļa apgabalos ir konstatētas nepamatotas biezuma izmaiņas gar tām (7.18. att.). Modeļa griezumā pār Durbes lūzuma vidusdaļu (7.19. att.) starp 2086. un 2942 urbumu ir novērojama nepamatota D_3 gj slāņa biezuma atšķirība gar lūzuma plakni. Šajā griezumā attēlotajam 2086. urbumam ir dokumentēts pilns slāņa biezums, bet 2942. un 3862. urbumam vertikālajā griezumā ir informācija tikai par slāņa virsmu. Šāda nepamatota biezumu mainība var būt saistīta tieši ar nepietiekamo informāciju par slāņa biezumu. Nelielā nesaiste starp publicētajām struktūrkartēm (apmēram, 10 – 20 m robežās) var būt skaidrojama arī ar piederošo urbumu skaita, kas ir primārais datu avots šo karšu izgatavošanā, krasu pieaugumu starp Pērnavas un

Amatas svītu struktūrkartēm (6.2. att.). Pārējās vietās pārvietojuma vērtības un biezumu sadalījums gar lūzumiem ir korekts.



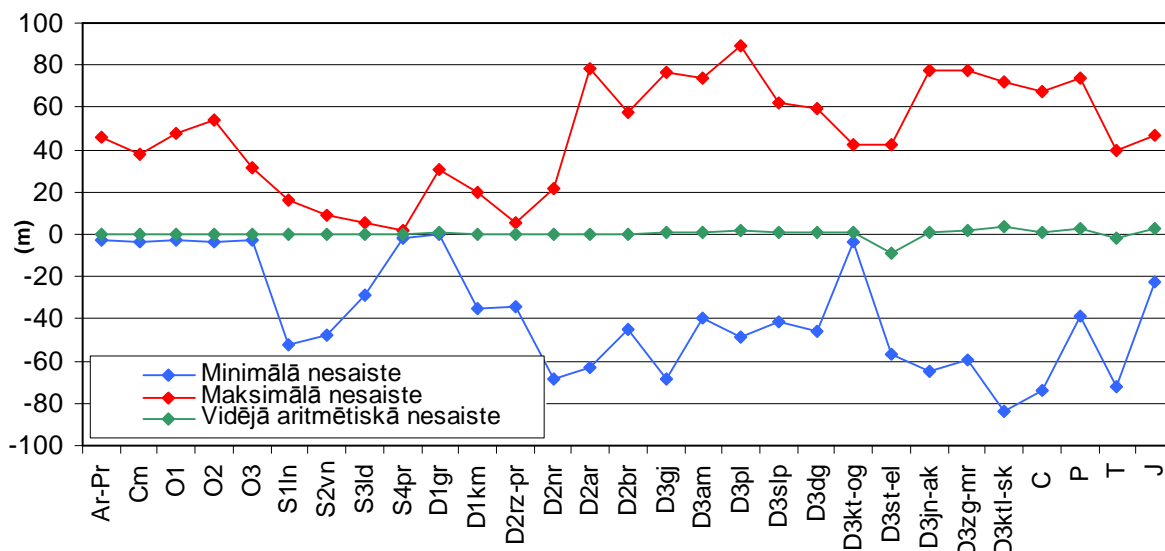
7.19. attēls. Modeļa griezumus pa profila līniju K – L pār Durbes lūzuma vidusdaļu (sagatavojis autors). Vertikālā mēroga pārspīlējums 3:1. Profila novietojums attēlots 1. pielikumā.

Sākot no D₃am slāņa, modeļa struktūrā ir implementēti augšdevona Amatas virsmas struktūrkartē atspoguļotie iespējamie lūzumi, kas dublē visus vidusdevona Pērnavas svītas struktūrkartes lūzumus, tikai ar mazākiem pārvietojumiem gar tiem. Virs D₃am iegulošie slāņi ir ļoti heterogēni ar ievērojami mainīgu laterālo izplatību un biezuma ievērojamu mainību pat salīdzinoši nelielās teritorijās. Slāņu nelielo biezumu un pārvietojuma vērtību gar lūzumu līnijām dēļ šie lūzumi pakāpeniski izlīdzinās subkvartāra virsmā. Šajā slāņkopā urbumu informācija daļēji apstiprina pārvietojuma vērtības gar lūzumu līnijām (7.19. att.), tomēr ievērojamā urbumu daudzuma dēļ, kas raksturo šo slāņkopu, un nelielo pārvietojuma vērtību gar lūzumiem dēļ, ir apgrūtināti iegūt precīzu apstiprinājumu lūzumu esamībai. To apgrūtinā arī modeļa režģa izšķirtspēja, kādēļ ievērojams urbumu skaits atrodas starp režģi veidojošajiem punktiem un modeļa slāņu augstuma atzīmes nesakrīt ar slāņu atzīmēm urbumu griezumos.

Virš devona nogulumiem iegulošajā karbona – juras slāņkopā ir iestrādāti D₃am virsmā esošie lūzumi, no kuriem šajā slāņkopā ir izsekojams tikai Liepājas – Saldus lūzums. Gar šo lūzumu modeļa struktūrā fragmentāri veidojas C izplatības apgabala robeža, bet augstāk iegulošajos P, T un J slāņos šī lūzuma apstiprinājumu liedz ierobežotā slāņu izplatība un nepietiekamā urbumu informācija gar šo lūzumu. Tāpat tektonisko lūzumu noteikšanas problemātiku pastiprina ievērojamā nesaiste starp šo slāņu modeļa virsmas atzīmēm un urbumu informāciju, kas sīkāk apskatīts 7.1.2. nodaļā.

8. MODEĻA ATBILSTĪBA URBUMU DATIEM

Katru modeļa ģeoloģisko virsmu raksturo mainīgs urbumu daudzums - no 55 urbumiem D_{1gr} sērijas virsmā līdz vairāk nekā 7000 urbumu D_{3gj} virsmā. Ņemot vērā ievērojamo urbumu daudzumu, modeļa rezultāti tika salīdzināti ar urbumu datiem, veicot katra slāņa statistisko centrālās tendences un variācijas rādītāju analīzi (Davis, 2002) (8.1. un 8.2. att., 2. pielikums). Papildus veikta nesaistes vērtību atkārtotamības sadalījuma analīze, kas grafiski atspoguļota 8.3., 8.4., 8.5. un 8.6. attēlos.

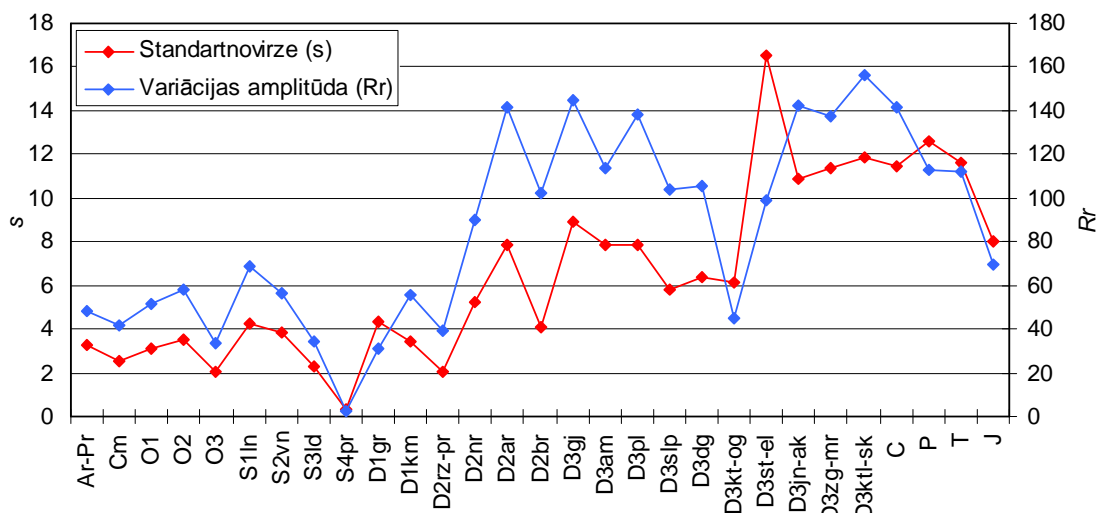


8.1. attēls. Modeļa slāņu virsmu minimālās, maksimālās un vidējās nesaistes vērtības pret urbumu datiem (sagatavojis autors).

Modeļa virsmu vidējā aritmētiskā nesaiste ar slāņu atzīmēm no urbumu datiem ir ievērojami mainīga modeļa griezumā. Modeļa labāka sakritība novērota dziļāk ieguļošajiem slāņiem (8.3. att.). Vidējās aritmētiskās nesaistes svārstības visā modeļa griezumā ir no -0,5 līdz 0,5 m ar vidējo vērtību 0,3 m, minimālo -8,71 m D_{3st-el} slānim un 3,4 m D_{3ktl-sk} slānim. Minimālās nesaistes vērtības norāda uz modeļa ģenerētā slāņa vērtību atrašanos maksimāli virs virsmas atzīmes urbumā, sekojoši maksimālās vērtības – uz modeļa slāņa virsmas atrašanos zemāk par atzīmi urbumā. Kritiskās minimālās vērtības modeļa ietvaros vienam urbumam konstatētas D_{3ktl-sk} slānī – 83,8 m, bet maksimālās vienam urbumam D_{3pl} slānī 89,5 m. Salīdzinot visu urbumu un visu modeļa slāņu virsmas atzīmes, aprēķināta kopējā nesaiste modeļa virsmām pret urbumu informāciju ir 0,3 m. Lielākā nesaiste slāņa ietvaros konstatēta D_{3ktl-sk} slānim, kur vidējā aritmētiskā nesaiste ir -8,71 m, bet mazākā nesaiste (0,0002 m) konstatēta S_{4pr} slānim.

Variācijas amplitūda jeb nesaistes diapazons 13 no 29 modeļa slāņiem ir salīdzinoši liels, pārsniedzot pat ± 100 m. Jo lielāka ir standartnovirzes vērtība, jo mazāk izteikta ir

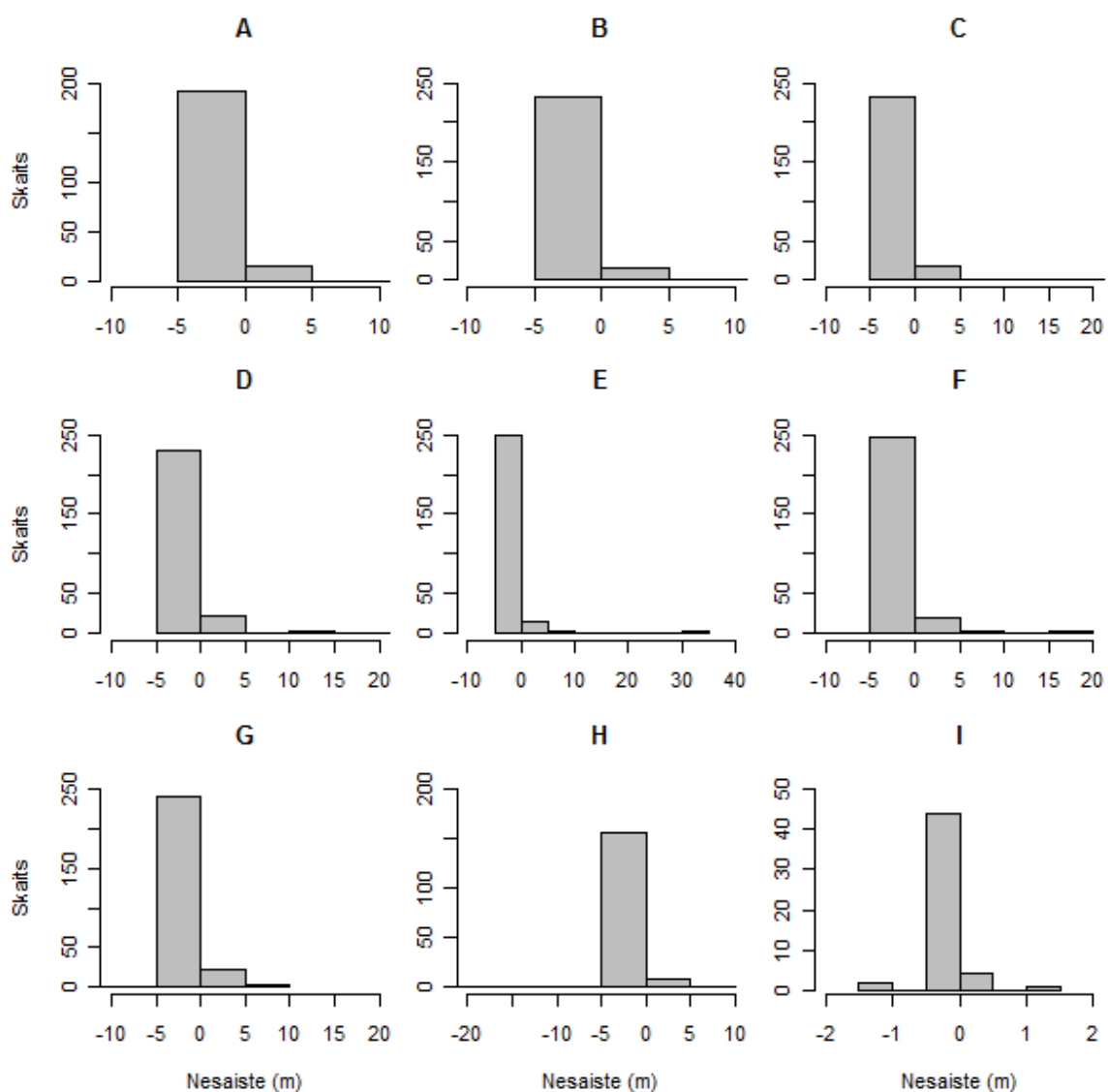
nesaistes vidējā vērtība – novērojama lielāka nesaistes vērtību izkliede. Aprēķinātā standartnovirze ap vidējām vērtībām nav liela, norādot uz to, ka kritiskās nesaistes ir mazāk raksturīgas un lielākā daļa vērtību tomēr variē ap vidējo aritmētisko vērtību (8.1. att.). Mazākā nesaistes vērtību variācijas amplitūda konstatēta S_{4pr} slānim, kas ir 2,86 m.



8.2. attēls. Nesaistes standartnovirzes (s) un variācijas amplitūdas (R_r) vērtību variācija modeļa griezumā (sagatavojis autors).

Aplūkojot standartnovirzes vērtību izmaiņas modeļa slāņu ietvaros (8.2. att.), raksturīgi, ka datu kopu labi raksturojošā vidējā aritmētiskā nesaiste visiem dziļākajiem slāņiem līdz D_{2nr} ir mazāka par 1 m un standartnovirze vidēji ir ±2,8 m un ir mazāka par ±5 m visos slāņos. Virs D_{2nr} augstāk iegulošajiem slāņiem līdz augšdevona slāņkopai raksturīgas labas vidējās vērtības, kas ir mazākas par 1 m, bet standartnovirzes vērtības ir lielākas par ±5 m. No D_{3gj} līdz D_{3kt-og} slāņiem ieskaitot vidējā aritmētiskā nesaiste ir līdz 2 m, bet standartnovirze ir lielāka par ±9 m.

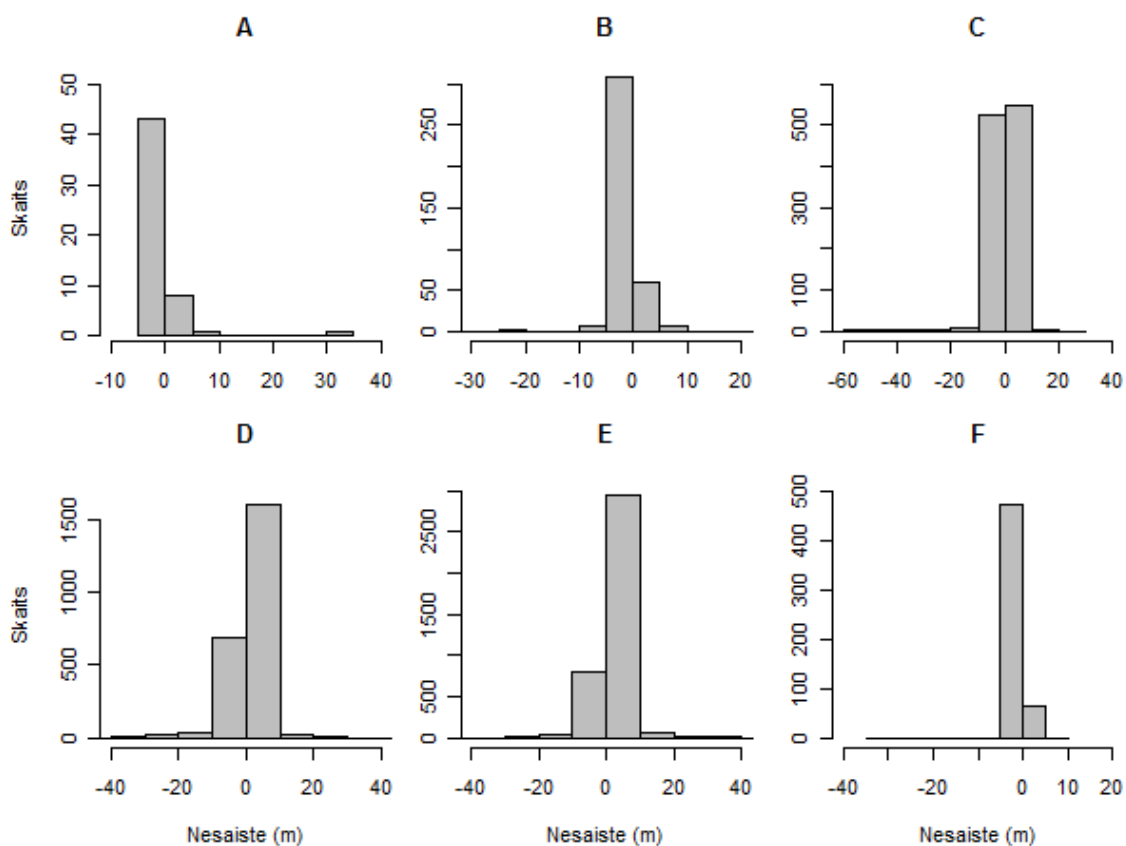
Salīdzinoši slikta sakritība un plaša vērtību variācija raksturīga slāņkopai no D_{3st-el} slāņa, kurai ir raksturīga arī liela variācijas amplitūda, kas sasniedz pat 156 m. No tuvāk Zemes virspusei iegulošajiem slāņiem salīdzinoši maza nesaiste ir J slānim, kur vidējā nesaiste konstatēta 2,76 m un raksturīga arī neliela variācijas amplitūda ar vērtību 69,4 m.



8.3. attēls. Nesaistes vērtību histogrammas pamatklintāja – silūra slāņkopai starp urbumu datiem un modeļa slāņu virsmām (sagatavojis autors). A – Ar-Pr, B – Cm, C – O₁, D – O₂, E – O₃, F – S₁ln, G – S₂vn, H – S₃ld, I – S₄pr modeļa slāņiem atbilstošās histogrammas.

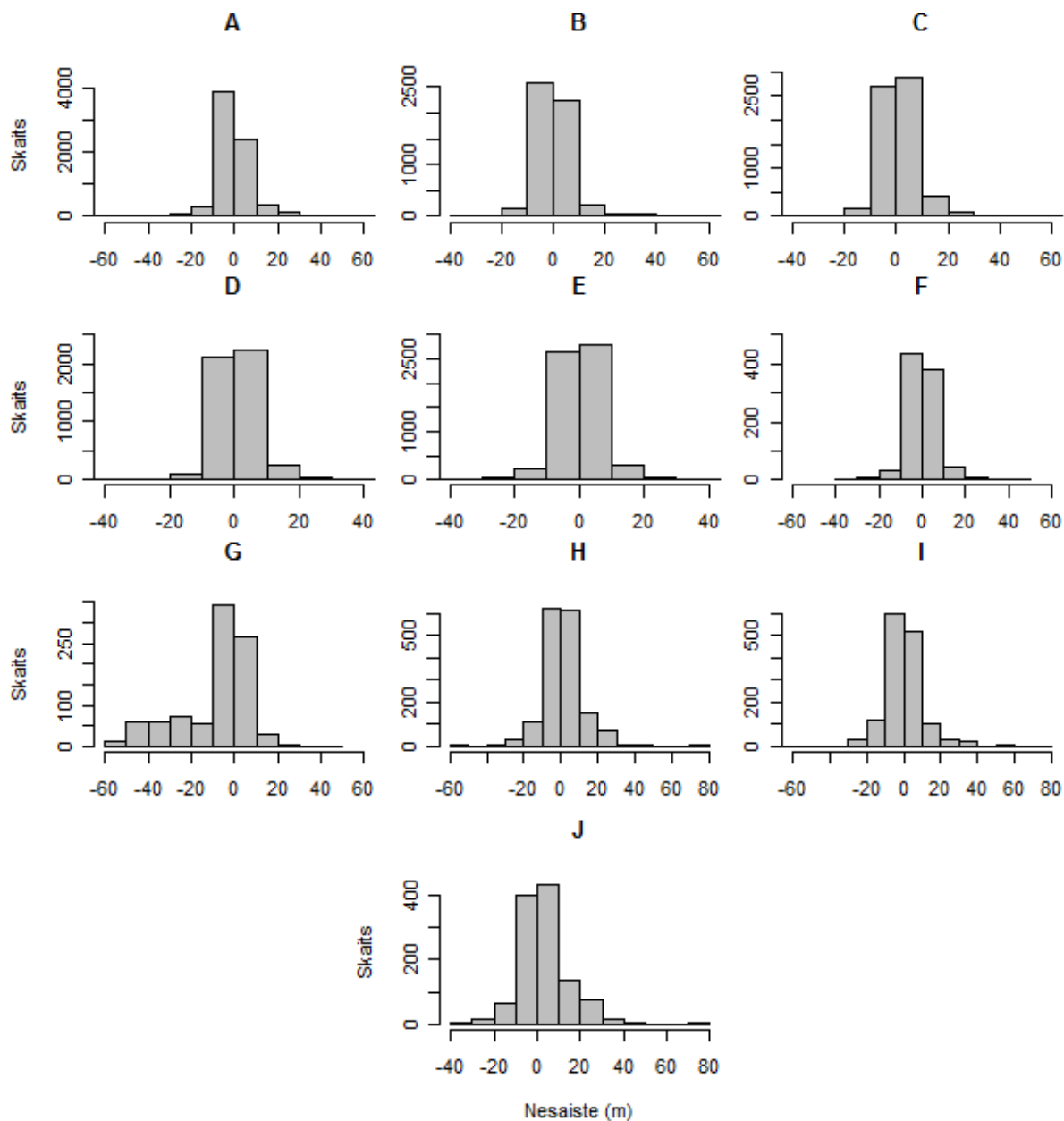
Pamatklintāja – silūra slāņkopai (8.3. att.) dominantās nesaistes vērtības svārstās ± 5 m robežās. Slāņkopas maksimālās nesaistes vērtības slāņiem nepārsniedz 55 m, bet tie ir līdz 10 % no visas datu kopas, saglabājot vidējo aritmētisko vērtību slāņkopas ietvaros ap 0,2 – 0,3 m katram slānim. Var novērot, ka modeļa virsmu novirze no urbumiem šajā slāņkopā ir ar pozitīvu vērtību, t.i., modeļa slānis ir zemāks par urbuma atzīmēm. Samazinoties dziļumam, novērojama lielāka nesaistes izkliede urbumu datu kopā. Nesaistes amplitūda atsevišķiem urbumiem palielinās līdz 50 m. Bet skaitliski nozīmīgākā datu kopa ar skaitliski un vizuāli novērtējamu atkārtojumu biežumu ir ar nesaistes vērtību amplitūdu līdz 20 m. Šādas vērtības varētu būt skaidrojamas ar šo slāņkopu ierobežotajiem izplatības apgabaliem un nelielo šos slāņus raksturojošo urbumu skaitu, iespējams, arī stratigrāfiskā iedalījuma nenoteiktību. Šiem slāņiem nesaistes vērtības tika samazinātas, veicot modeļa korekcijas – šo slāņu virsmas

augstuma atzīmes paceļot uz devona slāņkopas apakšas vērtībām, kur ir ievērojami apjomīgāks urbumu daudzums.



8.4. attēls. Nesaistes vērtību histogrammas starp urbumiem un virsmām apakšdevona un vidusdevona slāņkopām (sagatavojis autors). A – D_{1gr}, B – D_{1km}, C – D_{2rz-pr}, D – D_{2nr}, E – D_{2ar}, F – D_{2br} modeļa slāņiem atbilstošās histogrammas.

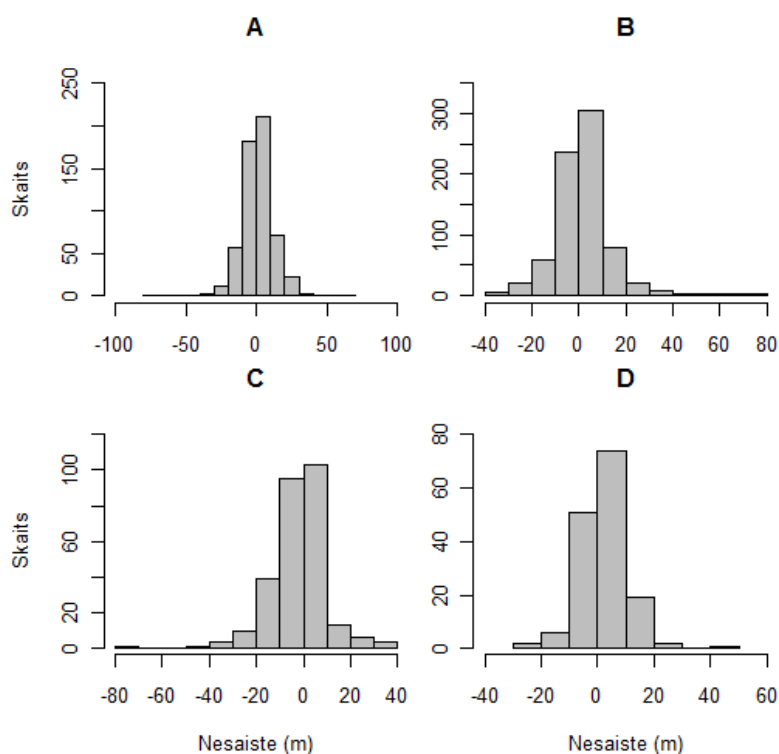
Apakš un vidusdevona slāņkopā dominantās nesaistes vērtības (8.4. att.) saglabājas ± 5 m robežās, kur D_{1gr} un D_{2rz-pr} slāņiem lielāku nesaistes vērtību kopa nenozīmīgi ietekmē kopējo datu kopu, lai gan abu slāņu izveidē izmantots ievērojami atšķirīgs urbumu daudzums. D_{1gr} slānis veidots, pamatojoties uz 55 urbumu informāciju, bet D_{2rz-pr} slānis uz 432 urbumiem (5.2. tabula). Lielāka nesaistes variācija ir vērojama D_{1km}, D_{2rz-pr}, D_{2nr} un D_{2ar} slāņos, kur konstatējamas maksimālās slāņu nesaistes vērtības, kas atsevišķos urbumos D_{2ar} slānī sasniedz 78 m. Statistiski nozīmīgas kļūst arī ± 40 m nesaistes vērtības (8.4. att.), ko apliecina arī standartnovirzes vērtības, kas no D_{2rz-pr} slāņa līdz D_{2ar} slānim pakāpeniski pieaug. Standartnovirzes vērtība D_{2rz-pr} slānī ir $\pm 2,03$ m, bet D_{2ar} slānī jau $\pm 7,83$ m, vienlaicīgi ievērojami pieaugot arī nesaistes variācijas amplitūdai līdz 39,85 D_{2rz-pr} slānī un 141,29 m D_{2ar} slānī.



8.5. attēls. Nesaistes vērtību histogrammas starp urbumiem virsmām augšdevona slāņkopai (sagatavojis autors). A – D₃gj, B – D₃am, C – D₃pl, D – D₃slp, E – D₃dg, F – D₃kt-og, G – D₃st-el, H – D₃jn-ak, I – D₃zg-mr, J – D₃ktl-sk modeļa slāņiem atbilstošās histogrammas.

Modelī vislielākā nesaistes vērtību svārstību amplitūda novērojama augšdevona slāņkopā kopā ar C – J slāņkopu, kas atspoguļots 8.5. un 8.6. attēlos. Novērojams, ka samazinoties dziļumam, pieaug nesaistes vērtību diapazons un ievērojami palielinās arī kritisko vērtību atkārtotamība. Novērtējot šo informāciju, redzams, ka histogrammās attēlotā modeļa virsmu nesaiste kļūst asimetriska, pieaugot gan pozitīvā, gan negatīvā virzienā. Šāda tendence konstatējama jau no apakšdevona un turpinās arī vidusdevona slāņkopai atbilstošajos slāņos. D₃ktl-sk slānī 70 – 80 m nesaistes intervālā ietilpstošo urbumu skaits

kļūst nozīmīgs. To apliecina arī ievērojamā standartnovirzes vērtība ($\pm 11,82$ m) un nesaistes variācijas amplitūda, kas ir lielākā no visiem modeļa slāņiem (155,95 m).



8.6. attēls. Nesaistes vērtību histogrammas starp urbumiem virsmām karbona līdz Juras slāņkopām (sagatavojis autors). A – C, B – P, C – T, D – J modeļa slāņiem atbilstošās histogrammas.

Karbona – juras slāņkopā saglabājas iepriekš novērotās tendences, kur ievērojami variē aprēķinātā nesaistes vērtību standartnovirze, kas svārstās robežās no 8 J slānim un pieaug līdz 12,56 P slānim, kamēr C un T slānim tās ir līdzīgas – 11,6 līdz 11,8. Tāpat slāņkopai ir ievērojami augsta aprēķinātā variācijas amplitūda, 141,21 C slānim. No šiem raksturlielumiem var novērot, ka slāņkopā vislabākā slāņa virsmas atbilstība urbumu informācijai ir J slānim, kur vidējā nesaiste ir 2,74 m un ir vismazākā variācijas amplitūda un standartnovirzes vērtība, kas vērojams arī šīs slāņkopas nesaistes vērtību histogrammās (8.6. att.). C slānim dominantās nesaistes vērtību klases ar ievērojamu atbilstošu urbumu skaitu atbilst -40 līdz 40 m intervālam ar atsevišķiem urbumiem, kur nesakrītība ir līdz pat 70 m. Tomēr vidējā aritmētiska nesaistes vērtība visai urbumu kopai saglabājas zema – 0,8 m. Augstāk iegulošajiem slāņiem maksimālās nesaistes vērtības nedaudz samazinās, līdz -22,45 un 46,93 m J slānim, saglabājoties augstam urbumu skaitam, kas iekļaujas dominantajās nesaistes intervāla klasēs – 40 līdz 40 m.

Aplūkojot histogrammās atainoto informāciju visam griezumam kopumā, modeļa slāņiem nesaistes vērtību sadalījums pamatā ir normāls vai tuvu normālam ar nelielu asimetriju, kur novērojams, ka modeļa un urbumu nesaiste tiecas uz minimumu. Šādi rezultāti

netieši norāda uz atsevišķiem problemātiskajiem urbumiem un, iespējams, arī modeļa režģa izšķirtspēju, kur urbumu punkti nesakrīt ar režģa punktiem. Šis aspekts modeļa rezultātu salīdzināšanā ar urbumu informāciju nav ņemts vērā. Atsevišķu modeļa slāņu virsmās, īpaši D_{3st-el} un D_{3ktl-sk} nesaistes vērtību sadalījuma raksturs ir izteikti citādāks nekā pārējiem modeļa slāņiem. Šo virsmu nesaistes vērtību histogrammās konstatēts bimodāls vērtību sadalījums, vai ar izteiktu nesaistes asimetriju negatīvā vai, atsevišķos gadījumos, arī pozitīvā virzienā. Šādi rezultāti var norādīt uz sistemātisku kļūdu vairākos modeļa izveides soļos vai stratigrāfisko vienību apvienojumā modeļa slāņu izdalīšanā. Iespējams, tas var norādīt arī uz neprecizitātēm urbumu ģeoloģisko griezumņu aprakstos, kur var variēt gan stratigrāfisko vienību iedalījuma ticamība, gan aprakstu kvalitāte. Viens no skaidrojumiem varētu būt tāds, ka šajos slāņos ir ievērojams urbumu skaits, kas tikai aizsniedz slāņa virsmu, un tāpēc netiek izmantots slāņu biezumu interpolācijā. To daļēji apstiprina pilno un nepilno urbumu skaita attiecība šo slāņu ietvaros. Tāpat šāda nesaistes variācija var daļēji norādīt arī uz izmantoto interpolācijas metožu un urbumu informācijas atlases nepilnībām un ierobežojumiem. Šo sakarību iemesli aprakstīti diskusijas nodaļā.

9. DISKUSIJA

Izveidotais 3D ģeoloģiskais modelis Latvijas teritorijai izvēlētajā detalizācijā labi attēlo vispārpieņemtus priekšstatus par Latvijas teritorijas ģeoloģiskās uzbūves un ģeoloģisko struktūru ģeometrisko kompleksitāti un slāņu sagulumu un to biezuma variācijām. Modelī labi atspoguļotas teritorijas ģeoloģiskās attīstības galvenās iezīmes un tektonisko lūzumu struktūras. Izveidotā modeļa ģeometrija ir cieši saistīta ar pieejamo ģeoloģisko informāciju un tās kvalitāti. Liela nozīme modeļa ģeometrijas izveidē ir izmantotajām datu atlasēs un apstrādes, kā arī modeļa izveides metodēm.

9.1. Algoritmizētas 3D ģeoloģiskās struktūras veidošanas priekšrocības un trūkumi

Pētījumā izmantotā algoritmizētā pieeja 3D ģeoloģisko modeļu izveidē līdz šim nav ļoti plaši izmantota ģeoloģiskajos pētījumos (Calgano et al., 2008). Pētījuma rezultāti apstiprina vairāku pētnieku viedokli, ka šāda pieeja ir piemērotāka reģionālu ģeoloģisko modeļu izveidē (Banks, 1993; Zhu & Zhuang, 2010), jo, salīdzinot ar biežāk lietotām metodēm (Zhu & Zhuang, 2010), kur modeļa ģeoloģiskā struktūra tiek veidota kā vienots objekts, manuāli apvienojot atsevišķus modeļa struktūrelementus, šī pieeja atstāj lielu brīvību struktūras elementu koriģēšanai, datu interpretācijai un ievades datu kopas papildināšanai ar ģeoloģisko informāciju.

Šāda pieeja ļāva darba procesā brīvi koriģēt gan ievades datu kopu, gan datu interpretāciju modeļa elementiem, pašu struktūru neveidojot no jauna. Tādējādi tika samazināts daudzkārt atkārtotu darbību process modeļa izveidē, galveno uzmanību veltot tieši ģeoloģiskās uzbūves korektai implementācijai (Popovs et al., 2011).

Modeļa izveidē izmantotā biezumu interpolācija ļāva iegūt ģeoloģiski korektu slāņu biezumu sadalījumu pat pie salīdzinoši neliela datu apjoma, kas saskan ar R. Grošonga viedokli (Groshong, 2006), ka biezumu interpolācija sniedz ievērojami pilnīgāku informāciju par slāņa ģeometriju. To arī apliecina autora iepriekšējie pētījumi (Popovs u.c., 2011), kur, veidojot ģeoloģisko modeli pēc slāņu virsmu principa, iegūtā slāņa biezuma sadalījums starp divām virsmām daudzviet rezultējās nepamatotās biezuma izmaiņas. Pie līdzīgiem secinājumiem ir nonākuši arī citi autori (Calgano et al., 2008; Groshong, 2006). Tas norāda uz to, ka nepamatotās slāņa biezuma svārstības veicina divu dažādu datu kopu (augstāk un zemāk ieguloša slāņa augstuma vērtības) interpolācija, starp kurām biezuma vērtības būs paaugstinātas vietās ar maksimālo augstuma atzīmju atšķirību un nepamatoti samazinātas vietās ar minimālo augstuma atzīmju atšķirību.

Modeļa rezultāti apliecina, ka pēc biezumu datu interpolācijas, iegūto slāņa biezumu sadalījumu secīgi summējot pie zemāk iegulošās zināmās virsmas reljefa datnes, tiek iegūta

ģeoloģiski korekta slāņa virsma, salīdzinot ar virsmu, kas veidota, interpolējot slāņu virsmas atzīmes. Tas saskan ar citu pētnieku pausto viedokli (Calgano et al., 2008). Tomēr autors vēlas atzīmēt, ka, izmantojot šādu ģeoloģiskās struktūras izveides metodi, liela nozīme ir atskaites virsmu reljefa modeļu kvalitātei un ticamībai, kas nereti ir iepriekš veidotas atsevišķu ģeoloģisko virsmu struktūrkartes.

Jāatzīmē, ka atsevišķiem slāņiem ievērojamā nesaiste starp urbumu informāciju un modeļa slāņu virsmām (7.1. nodaļa) var būt saistīta ar ievērojamo daudzumu urbumu, kuros nav dokumentēts pilns slāņa biežums, kas attiecīgi netiek izmantoti biežumu interpolācijā (6.2. nodaļa). Apskatot modeļa rezultātus, statistiski kļūdainākās virsmas ar lielākajām nesaistes vērtībām tieši sakrīt ar tām virsmām, kuras raksturo liels urbumu skaits, kas aizsniedzis tikai slāņa virsmu, un procentuāli mazs skaits urbumu ar dokumentētu pilnu slāņa biežumu. Šādas nesaistes iespējamība ir aprakstīta jau iepriekš (Chiles & Delfiner, 1999; Groshong, 2006), tomēr tas liecina par nepieciešamību veikt papildu pētījumus, lai novērtētu šo nesaisti un tās cēloņus attiecībā uz datu interpolācijas metodēm.

Tāpat šai metodei ir ierobežojumi to slāņu ģenerācijai, kuru virsmā novērojamas erozijas pazīmes, kas izpaužas slāņa samazinātā biežumā. Neskatoties uz to, ka urbuma griezumā ir konstatēts pilns slāņa biežums, kur urbuma griezumā dokumentē gan slāņa augšu, gan apakšu, salīdzinot šo biežuma vērtību ar tuvāko urbumu, kura vertikālajā griezumā nav konstatēts stratigrāfiskais pārtraukums, biežumu atšķirības ir ievērojamas.

Veicot šādu biežuma datu interpolāciju, tiek iegūta nepamatota nesaiste starp interpolēto un tam uzgulošo slāni, kas aprakstīts 7.1. nodaļā. Lielākā nesaiste šajā pētījumā ir konstatēta silūra slāņkopā, kur nesaiste veidojas pret devona slāņkopas apakšējo robežu. Šāda nesaiste izveidojusies silūra slāņkopas augšējo nodaļu (S_{2vn} , S_{3ld} , S_{4pr}) slāņu dēļ, kuriem ar diskordanci dažādā apjomā uzguļ devona nogulumi. Šī nesaiste metodiski risināta, izmantojot iepriekšējos pētījumos aprakstīto risinājumu, nesaistes vietas secīgi rekonstruējot pēc pilna slāņa biežuma no tuvākā urbuma (Zanchi et al., 2009).

Pētījumā izmantotā lūzumu implementācijas metode (3.2.2. nodaļa) balstās uz vienu no nedaudzajām plaši pieejamajām un labi dokumentētajām metodēm, kur līnijas iespējams definēt kā barjeras, kam netiek interpolēts pāri (Zoraster, 2003). Lai gan šī metode tiek pozicionēta kā universāla interpolācijas metode ģeoloģiskiem datiem, kas piemērota ar lūzumiem saposmotām teritorijām (*ibid*), autors pētījuma sākuma stadijā nonācis pie secinājuma, ka pie maza ģeoloģiskās informācijas blīvuma un datu punktu izkliedes pa pētījumu teritoriju iegūtais rezultāts nav korekts un virsma tiek atspoguļota ar pārspīlētām augstuma atzīmju svārstībām (Popovs u.c., 2011). Taču šajā pētījumā, izmantojot šo metodi

tikai pārvietojuma vērtību gar lūzuma līnijām iegūšanai, izmantotā metode kopumā sniedz labu rezultātu.

Pētījuma rezultātā tika konstatētas vairākas nesaistes vietas un nepamatota pārvietojumu amplitūda gar lūzumiem (apskatīts 7.2. nodaļā), kas saistīts ar ierobežoto datu kopu, kur lūzumu līnijas nav pamatotas ar izolīniju informāciju no kartogrāfiskā materiāla vai urbumiem, interpolētajā datnē izpaužoties kā virsmas oscilācija, ko izraisa tālu no lūzuma līnijas novietoti urbumi vai interpretētas virsmas izolīnijas. Šāda rakstura problēmas ir novērojuši arī citi pētnieki (Zoraster, 2003), kuru piedāvātais risinājums, kas pielietots arī šajā pētījumā, ir manuāla pārvietojumu vērtību korekcija gar lūzumu, interpretējot iespējamo pārvietojuma amplitūdu.

9.2. Modeļa virsmu un urbumu nesaistes interpretācija

Modeļa stratifikācija, kas aprakstīta 5. nodaļā, lielā mērā balstīta uz pieejamo urbumu informāciju, to klasificējot pēc Latvijas ģeoloģiskā griezumā litostratigrāfiskajām vienībām (Stinkulis, 2003). Stratifikācija veidota tik detalizēta, lai izdalītās vienības būtu nozīmīgas korektai ģeoloģiskā modeļa izveidei un tā rezultātu interpretācijai (Zanchi et al., 2009). Papildus modeļa slāņu izdalīšanai nepieciešamie priekšnosacījumi ir: pietiekams urbumu skaits, kas raksturo slāni, ar atbilstošu izkliedi pa modeļa teritoriju un to, kuru vertikālajā griezumā raksturots pilns slāņa biezums. Minētie aspekti ir svarīgi konsistentā ģeoloģiskā modeļa izveidē (Banks, 1993; Zanchi et al., 2009).

Salīdzinot urbumu skaitu ar modeļa slāņu augstuma vērtību nesaisti pret urbumu datiem, var konstatēt vairākas likumsakarības. D₃g₁ slāņa virsmu raksturo 7098 urbumi, no kuriem tikai 2323 (32,7 %) raksturo pilnu slāņa biezumu, savukārt vidējā aritmētiskā nesaiste šim slānim ir 0,64 m ar minimālās un maksimālās nesaistes vērtībām secīgi -68,83 m un 76,39 m. Nesaistes vērtības veido ļoti lielu variācijas amplitūdu (145,22 m), saglabājot visas datu kopas salīdzinoši mazu standartnovirzes vērtību ($\pm 8,94$ m). Neskatoties uz krasajām nesaistes vērtībām, to sadalījums ir normāls (8.5. att. – A), kas liecina par to, ka izveidotā modeļa virsma ir korekta ar nelielu nesaisti pret urbumu datiem un tikai ar atsevišķu urbumu punktu anomālām nesaistes vērtībām, kas secināts, salīdzinot šādus modeļa rezultātus ar citu autoru līdzīgu pētījumu rezultātiem (Calgano et al., 2008).

Pēc citu autoru veikto pētījumu rezultātiem (Calgano et al., 2008; Zhu & Zhuang, 2010), iespējamais papildu skaidrojums šādai nesaistei ir modeļa interpolācijas režģa ģeneralizācijas pakāpe, kur nesaistes vērtību cēlonis ir datu punktu nesakritība ar interpolācijas režģa virsotnēm, kas attiecīgi var veicināt lielāku neatbilstību starp tuvu stāvošām atšķirīgām vērtībām. Pēc autora novērojumiem, režģa detalizācijas radītā nesaiste

attiecināma uz nesaistes vērtībām $\pm 10 - 15$ m diapazonā, kas procentuāli atbilst lielākajai nesaistes vērtību datu kopai. Pēc autora domām, šādu vērtējumu var attiecināt arī uz $D_{3gj} - D_{3kt}$ -og modeļa slāņkopu, kur modeļa nesaistes raksturojošo parametru attiecība ir līdzīga.

Labākā modeļa virsmu un urbumu informācijas sakrītība konstatēta $C_m - S_{4pr}$ modeļa slāņkopai, kur dominantās nesaistes vērtības iekļaujas ± 5 m diapazonā, tikai atsevišķos urbumos konstatēta lielāka nesaiste (8. nodaļa). Šādi rezultāti cieši saistīti ar pilno urbumu procentuālo attiecību, kas šai slāņkopai variē $80 - 100$ % diapazonā no visiem slāni sasniegušajiem urbumiem (8.1., 8.2. un 8.3. attēli).

Šie rezultāti norāda uz to, ka biežumu interpolācija sniedz salīdzināmi labākus rezultātus to slāņkopu izveidē, kuras raksturo procentuāli lielāka pilno urbumu datu kopa, kas sakrīt ar literatūrā minēto (Groshong, 2006). Jāatzīmē, ka šie rezultāti netieši norāda uz iepriekšējos pētījumos sagatavoto pamatklintāja un ordovika virsmu struktūrkāršu (Brangulis un Konšins, 2002) labo interpretācijas pakāpi, jo to urbumu nesaiste pret modeļa slāņiem, kas neaizsniedz minētas virsmas, ir salīdzinoši neliela.

Savukārt polimodāls nesaistes vērtību sadalījums, īpaši izteikts D_{3st-el} un $D_{3ktl-sk}$, bet novērojams arī D_{3jn-ak} un D_{3zg-mr} slāņos, norāda arī uz citiem ietekmējošiem faktoriem. Analizējot nesaistes vērtību standartnovirzes un variācijas amplitūdas vērtību atšķirības šajos slāņos, ir konstatēts, ka šiem slāņiem ir lielākā nesaistes variācijas amplitūda, kas variē robežās no 100 līdz 155 m (2. pielikums), kas sakrīt arī ar lielākajām standartnovirzes vērtībām ($\pm 10 - 16$ m). Jāpiemin, ka šiem slāņiem ir konstatētas arī lielākās vidējās aritmētiskās nesaistes vērtības, kas D_{3st-el} slānim sasniedz deviņus metrus.

Pēc autora domām, tas norāda uz vairākiem iemesliem – iespējamā nekonsekvenca stratigrāfisko vienību izdalīšanā urbumu ģeoloģisko griezumumu aprakstos, kā arī ģeoloģiskā griezuma apraksta kvalitāte, kas atšķiras atkarībā no stratigrāfisko vienību ģeneralizācijas pakāpes (apskatīts 5. nodaļā). Salīdzinot šos rezultātus ar citiem līdzīga rakstura pētījumiem, tajos bieži ir konstatētas līdzīgas problēmas, ko apliecina citu pētnieku līdzīgais viedoklis (Wellman et al., 2010; Zhu & Zhuang, 2010).

Pētījumu turpinājumā būtu nepieciešams veikt papildus urbumu stratigrāfisko vienību atlasu un analīzi, pievēršot uzmanību arī litoloģiskajām variācijām stratigrāfisko vienību ietvaros un stratigrāfisko vienību apvienošanas priekšnosacījumiem, ar mērķi uzlabot interpolācijas datu kopas stratigrāfisko vienību konsistenci.

Nesaistes mazināšanai līdzīgu pētījumu realizācijā būtu nepieciešams novērtēt arī režģa ģeneralizācijas pakāpes radīto nesaisti pret urbumu datiem, uz ko īpaši norāda vairāki pētnieki (Calgano et al., 2008; Caumon, 2009).

9.3. Datu blīvums un modeļa mēroga atbilstība

Pēc izveidotā ģeoloģiskā modeļa Latvijas teritorijai var spriest, ka pieejamais faktiskais materiāls Latvijas teritorijas ģeoloģiskās uzbūves atspoguļojumam ir pietiekams. To apliecina 7. nodaļā aprakstītā modeļa struktūra, kurā, vadoties pēc urbumu informācijas un atsevišķu struktūrkaršu reljefa datiem, var skaidri izdalīt galvenās starpreģionālās, reģionālās un subreģionālās struktūras (7.2. att.). Teritorijās ar pietiekamu urbumu informāciju iespējams izšķirt arī lokālas struktūras (7.3. att.).

Pētījuma rezultāti ļauj apgalvot, ka pieejamā urbumu informācija labi raksturo teritorijas ģeoloģisko uzbūvi un ir izmantojama kā primārā informācija modeļa ģeometrijas izveidē, tās apjoms ir pietiekams, lai atspoguļotu galvenās ģeoloģiskās uzbūves iezīmes. Tomēr ir jāatzīmē, ka Latvijas teritorijas ģeoloģiskās uzbūves 3D modeļa izveide šajā pētījumā apskatāmajā detalizācijā nav realizējama, balstoties tikai uz urbumu datiem.

Dziļāk iegulošo kembrija – silūra un arī apakšdevona slāņkopu korekta telpiska interpretācija tikai no urbumu datiem ir ierobežota. Tas ir izskaidrojams ar urbumu nepietiekamu daudzumu un nevienmērīgo izkliedi modeļa apgabalā, kur ir izteikti vāji raksturota teritorijas austrumu daļa. Šīs slāņkopas ģeoloģiskā nenoteiktība tika mazināta, modeļa struktūrā integrējot pieejamo struktūrkaršu reljefa informāciju pamatklintāja un ordovika virsmām (Brangulis un Konšins, 2002), ievērojami uzlabojot šīs slāņkopas atspoguļojumu modeļa struktūrā.

Augstāk iegulošās devona – juras slāņkopas ģeoloģisko uzbūvi ļoti labi raksturo pieejamā urbumu informācija, un šai slāņkopai tā ir uzskatāma par labāko informāciju. Pamatojoties tikai uz urbumu informāciju, modeļa struktūrā iespējams izdalīt arī lokālas ģeoloģiskās struktūras. Kā piemēru var minēt Dobeles astroblēmas atspoguļojumu modeļa struktūrā (7.3. att.), kas liecina, ka atsevišķos modeļa apgabalos vadoties pēc urbumu datiem, ir iespējams veikt lielāku modeļa detalizāciju, kā tas ir apstiprināts šajā pētījumā.

Tektonisko struktūru implementācijai modeļa struktūrā tā pašreizējā detalizācijā urbumu dati nesniedz nepieciešamo informācijas apjomu, jo dziļākajiem slāņiem tikai neliela daļa zināmo lūzumu tiek apstiprināta ar urbumu datiem. Lūzumus raksturojošā pieejamā informācija no pētījumā izmantotajām struktūrkartēm sniedz primāri nepieciešamo informāciju par lūzumu novietojumu un iežu bloku pārvietojumu gar tiem. Struktūrkartes ir liela mēroga (M 1:1 500 000), un šāds mērogs ļauj veikt šo struktūru implementāciju šī pētījuma realizētā modeļa mērogā, bet ir nepietiekams detalizētāku pētījumu veikšanai.

Autors vēlas norādīt, ka uz šo struktūrkaršu informācijas pamata veiktā slāņu biezumu interpolācija atsevišķos modeļa apgabalos ļāva konstatēt nesaisti starp pamatklintāja un ordovika virsmu struktūrkartēm, kas izpaužas kā slāņu biezumu variācija, kas nav pamatota

(apskatīts 7.1.1 un 7.1.1. nodaļās). Ņemot vērā to, ka šajos problēmu apgabalos ir ierobežots urbumu apjoms, korektam lūzumu struktūru atspoguļojam modelī būtu nepieciešams veikt papildu interpretāciju izmantojot, struktūrkaršu sagatavošanā izmantoto seismisko griezumu materiālus, kas sakrīt ar citu pētnieku secinājumiem (Kauffman and Martin, 2008).

Subkvartāra virsmā eksponēto slāņkopu izplatības apgabalu iestrāde modelī balstīta uz Latvijas ģeoloģiskajā kartē (Brangulis u.c., 2000) atspoguļoto stratigrāfisko vienību izplatību. Tomēr pēc šo apgabalu iestrādes modeļa struktūrā tika konstatēta to ievērojama nesaiste ar urbumu informāciju, kur ievērojams daudzums urbumu atradās ārpus slāņu izplatības apgabaliem, automātiski izslēdzot šos urbumus no interpolācijas datu kopas (apskatīts 7.1.2. nodaļā). Pēc autora domām, šādai nesaistei var būt vairāki cēloņi, piemēram, ārpus definētajiem izplatības apgabaliem esošie urbumi ir ierīkoti pēc karšu sagatavošanas perioda vai karšu sagatavošanai izmantota tikai daļa no pieejamajiem urbumiem. Ņemot vērā to, ka modeļa ģeometrijas izveide primāri tika balstīta uz urbumu datiem, veikta šo izplatības apgabalu korekcija un tajos iekļauti arī iztrūkstošie urbumi. Šo robežu korekcija ļāva likvidēt radušos nesaisti starp slāņu izplatības apgabaliem. Tas norāda uz urbumu informācijas lielo nozīmi ģeoloģisko modeļu izveidē, kur slāņu laterālās izplatības apgabalu iestrādei modeļa struktūrā ir primārā nozīme (Kauffman & Martin, 2008).

9.4. Ģeoloģiskās struktūras izveides algoritms

Ģeoloģiskais modelis izveidots, ievērojot ģeoloģiskās attīstības principu, secīgi rekonstruējot slāņu sagulumu no vecākajiem uz jaunākajiem nogulumiem, ņemot vērā zināmās Latvijas teritorijas ģeoloģiskās attīstības likumsakarības. Savukārt lūzumu struktūras modeļa ģeometrijā implementētas, neievērojot šo ģenētisko principu, šķeļot modeļa struktūru pa zināmajām lūzumu līnijām un secīgi iestrādājot pārvietojuma vērtības no izmantotajām struktūrkartēm.

Novērtējot modeļa rezultātus, var secināt, ka, izmantojot šādu pieeju, tiek izveidots ģeoloģiski pamatots modelis, kurā ir ticami rekonstruētas slāņu biezuma variācijas un korekti interpretētas ģeoloģiskās attīstības likumsakarības. To pamato modeļa atbilstība iepriekšējo pētījumu rezultātā pieņemtajiem uzskatiem par pētījumu teritorijas ģeoloģisko uzbūvi (apskatīts 7. nodaļā).

Veicot ģeoloģiskās uzbūves rekonstrukciju, ievērojot ģeoloģiskās attīstības principu, lielākā modeļa nenoteiktība var būt saistīta ar diviem aspektiem, ko apliecina arī šī pētījuma rezultāti. Pirmais aspekts saistīts ar reģionālo erozijas virsmu implementāciju modeļa struktūrā, un otrs – ar iežu bloku pārvietojumu korektu interpretāciju.

Pirmais aspekts šī pētījuma ietvaros ir īpaši nozīmīgs silūra un devona, kā arī pamatiežu un kvartāra slāņkopu kontaktvirsmu implementācijai modeļa struktūrā. Izmantotā struktūras izveides pieeja, kā arī pietiekamais urbumu informācijas daudzums veicināja silūra – devona kontaktvirsmas daļēji automātisku un ģeoloģiski korektu iestrādi modeļa struktūrā, kur nesaisti starp šīm slāņkopām veidoja iepriekš aprakstītā silūra slāņu biezuma variācija, kuras cēlonis ir slāņu augšdaļas erozija (apskatīts 7.2. nodaļā).

Otrais aspekts ir nozīmīgs kembrija – vidusdevona slāņkopas atspoguļojumam, kur modeļa struktūrā ir iestrādātas pārvietojuma vērtības gar lūzumiem no trīs struktūrkartēm – pamatklintāja, ordovika un vidusdevona Pērnavas svītas virsmām. Analizējot modeļa rezultātus, atsevišķos modeļa apgabalos tika konstatētas struktūrkartēs interpretēto pārvietojuma vērtību nesaistes starp pamatklintāja un ordovika virsmām, kā arī iespējamā nesaiste starp ordovika un Pērnavas svītas virsmām. Šo nesaisti veido atšķirīgās detalizācijas informācija, kas izmantota lūzumu struktūru interpretācijai kartogrāfiskā materiāla sagatavošanai, kur šo datu nenoteiktība palielinās, pieaugot slāņa ieguluma dziļumam.

Pētījuma tālākai attīstībai tektonisko struktūru iestrādi modelī nepieciešams pakārtot ģeoloģiskās attīstības nosacījumiem (Caumon, 2010). Tas nozīmē, ka nepieciešams rekonstruēt slāņu dabisko sagulumu un to biezumu pirms tektonisko procesu ietekmes, secīgi šķeļot visu modeļa struktūru pēc zināmajiem lūzumiem un pārvietojumiem gar tiem. Pēc šāda principa rekonstruējot visu modeļa griezumus, būtu iespējams mazināt modeļa ģeoloģisko nenoteiktību, iegūstot vēl korektāku tā ģeoloģisko interpretāciju, par ko liecina citu pētījumu rezultāti (Bardossy & Fodor, 2001; Caumon, 2010).

9.5. 3D ģeoloģiskās struktūras salīdzinājums ar kartogrāfisko materiālu

Ģeoloģiskās kartes un griezumā ir viens no labākajiem un efektīvākajiem tradicionāli izmantotajiem veidiem, kā tiek atspoguļota ģeoloģisko objektu ģeometrija un interpretēta slāņkopu ģeoloģiskā uzbūve (Zanchi et al., 2009). Tomēr šie materiāli nesniedz pilnīgu informāciju par šo elementu telpisko raksturu, saglabājot ievērojamu ģeoloģisko nenoteiktību, kas attiecināma pret trešo neatspoguļoto dimensiju. 3D modeļu konstruēšana no uzskaitītajiem materiāliem, tos pamatā balstot uz pieejamo urbumu informāciju, sniedz ievērojami labāku priekšstatu par slāņkopu telpisko uzbūvi. Šādi modeļi ļauj interpretēt pieejamos datus 3D un mazināt to ģeoloģiskās uzbūves interpretācijas nenoteiktību (Groshong, 2006; Turner, 2006).

Pētījumā izveidotais 3D ģeoloģiskais modelis ir ļāvis izvērtēt pieejamo kartogrāfisko materiālu un urbumu informāciju, atsevišķos modeļa apgabalos konstatējot šo datu veidotu neatbilstību. Pēc autora domām, konstatēto neatbilstību cēlonis ir ne tik daudz šo materiālu

nekorektā interpretācija, bet gan ierobežotā iespēja attēlot telpiskus objektus 2D vidē, kā arī apgrūtinātā vairāku šādu 2D materiālu vienlaicīga telpiskā analīze.

Izvērtējot šī pētījuma rezultātus, 3D modeļa galvenās priekšrocības, salīdzinot ar kartogrāfisko un citiem 2D materiāliem, ir iespēja analizēt ģeoloģisko elementu telpisko uzbūvi un to savstarpējo attiecību. Līdz ar to rodas iespēja veikt korektāku ģeoloģiskās uzbūves interpretāciju. 2D materiālu interpretācija 3D vidē sniedz līdzvērtīgu informāciju, ko iespējams atspoguļot kartē, t.i., slāņu virsmu reljefu, to biezuma izmaiņas un tektonisko struktūru raksturojošo informāciju, kā arī slāņu laterālās izplatības apgabalus. Tomēr tā papildina 2D materiālus ar iespēju atspoguļot modeļa elementu tilpumu izmaiņas un biezuma variāciju visā modeļa struktūrā, šos lielumus izmantojot detalizētākai uzbūves interpretācijai.

Papildus, izmantojot 3D pieeju ģeoloģiskās informācijas interpretācijā, pamatojoties uz slāņkopu biezumu variācijām un ievades datu raksturu un daudzumu ir iespējams ģeoloģiski korektāk veikt ģeoloģiskās uzbūves interpretāciju, ievērojot noteiktas ģeoloģiskās attīstības likumsakarības, rekonstruējot to teritorijām, kurās nav pieejams faktiskais materiāls.

SECINĀJUMI

Veiktais pētījums ir veiksmīgs, un tam izvirzītie uzdevumi izpildīti, ļaujot sasniegt pētījuma mērķi. Pēc mērķa sasniegšanai izvirzīto uzdevumu izpildes iegūtie pētījuma rezultāti ļauj izdarīt vairākus nozīmīgus secinājumus.

1. Pieejamā ģeoloģiskā informācija pēc apjoma un kvalitātes ir atbilstoša, lai kā galveno informāciju izmantojot urbumu datus, būtu iespējams izveidot ģeoloģiski korektu 3D reģionālo ģeoloģisko modeli, kas kvalitatīvi atspoguļo teritorijas ģeoloģisko uzbūvi.
2. Pētījumā izmantotā ģenētiskā pieeja modeļa izveidē nodrošina ģeoloģiski pamatota ģeometriskā modeļa izveidi, kas ļauj ticami rekonstruēt slāņu ģeometriju un kvalitatīvi interpretēt ģeoloģiskās attīstības likumsakarības.
3. Galvenie modeļa nenoteiktības cēloņi ir erozijas virsmu un slāņu pārvietojuma vērtību variācijas gar lūzumu līnijām implementācija modeļa struktūrā, ko veicina nepietiekamā informācija par erozijas virsmu reljefa raksturu un ierobežotā informācija par iežu bloku pārvietojuma variāciju ģeoloģiskajā griezumā.
4. Tektonisko struktūru korekts atspoguļojums modeļa struktūrā ir tieši atkarīgs no slāņu biezuma un pārvietojuma variācijām gar lūzumiem, kur to interpretāciju modelī nepieciešams pakārtot ģeoloģiskās attīstības priekšnosacījumiem, secīgi rekonstruējot slāņu dabisko sagulumu un biezumus pirms tektonisko procesu ietekmes.
5. Slāņu biezumu interpolācija sniedz salīdzināmi labākus rezultātus to slāņkopu izveidē, kuru biezumu raksturojošo urbumu skaita procentuālā daļa no visiem slāni aizsniegušajiem urbumiem ir ne mazāka kā 75 %, ko apliecina labākā modeļa virsmu un urbumu informācijas sakritība (± 5 m) Cm – S₄pr slāņkopā, kur šo urbumu procentuālā attiecība ir 80-100 % robežās.

Pētījumu turpinājumā būtu nepieciešams veikt papildus urbumu stratigrāfisko vienību analīzi un atlasī, pievēršot uzmanību arī litoloģiskajām variācijām stratigrāfisko vienību ietvaros un stratigrāfisko vienību apvienošanas priekšnosacījumiem, ar mērķi uzlabot interpolācijas datu kopas stratigrāfisko vienību konsistenci.

Papildus nenoteiktības mazināšanai būtu ieteicams novērtēt arī režģa ģeneralizācijas pakāpes radīto nesaisti pret ievades datiem, kas šajā pētījumā netika veikts, bet pētījuma rezultāti to ļauj izvirzīt kā iespējamo cēloni nesaistei atsevišķos modeļa apgabalos.

Tāpat arī tektonisko struktūru korektam atspoguļojumam modelī, atsevišķos tā problēmapgabalos, kur konstatēta nesaiste starp kartogrāfisko materiālu un urbumu informāciju, būtu nepieciešams veikt to papildus interpretāciju, izmantojot seismisko griezumam materiālus, kas izmantoti struktūrkaršu izstrādē.

PATEICĪBAS

Šī pētījuma autors izsaka pateicību maģistra darba vadītājam Dr. ģeol. Tomas Saks par neatsveramo ieguldījumu pētījuma attīstībā, noderīgajām un pacietīgajām diskusijām par pētījuma problemātiku un rezultātiem. Autors ir īpaši pateicīgs arī savam kolēģim un studiju biedram Jānim Ukasam par kopīgu darbu pētījuma attīstībā, sadarbību pētījuma rezultātu sagatavošanā un aizstāvēšanā zinātniskajās konferencēs un zinātniskā raksta izstrādē. Autors ir pateicīgs arī kolēģim Jānim Jātņiekam par vērtīgajām konsultācijām GIS programmatūras pielietojumu ģeotelpisko datu sagatavošanā un apstrādē, kā arī stoicisku mieru palīdzot apgūt datu atlases nianse darbā ar MySQL datubāzu sistēmu. Tāpat autors izsaka pateicību Andrejam Timuhinam un Jurim Seņņikovam par konsultācijām MOSYS modeļsistēmas lietojumā, programmēšanas valodu nianšu skaidrošanā un ģeologa vēlmju iestrādi pētījumā izmantotajā modelēšanas programmatūrā.

Autors pateicas Dr. ģeol. Andrim Karpovičam par laika ieguldījumam maģistra darba tekstuālās daļas rediģēšanā. Autors augstu novērtē arī kolēģu Dr. ģeol. Anda Kalvāna un topošās ģeogrāfijas doktores Guntas Kalvānes ieguldījumu pētījuma realizācijā ar padomiem darba saturiskajā un tehniskajā noformēšanā.

Īpašu pateicību autors izsaka pašai burvīgākajai un skaistākajai ģeoloģei Alisei Babrei par atbalstu pētījuma izstrādes laikā, vērtīgām idejām, diskusijām, kas rosinājušas pētījuma attīstību, kā arī palīdzību pie datu statistiskās apstrādes un izstrādātā darba tekstuālās daļas rediģēšanas.

Šī pētījuma veikšanai ir saņemts finansiāls un materiāls atbalsts no Eiropas Sociālā fonda projekta aktivitātes „Cilvēkresursu piesaiste zinātnei” projekta „Starpnozaru zinātnieku grupas modeļu sistēmas izveides pazemes ūdeņu pētījumiem” Projekta Nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060.

LITERATŪRAS SARAKSTS

Publicētā

- Banks, R. 1993. *Computer stacking of multiple geologic surfaces. Petro Systems World.* Winter, 14-16.
- Bardossy, G. & Fodor, J. 2001. Traditional and New Ways to Handle Uncertainty in Geology. *Natural Resources Research.* 10(3), 179-187.
- Bistacchi, A., Massironi, M., Piaz G., Monopoli, B., Schiavo, A. & Toffolon, G. 2008. 3D fold and fault reconstruction with an uncertainty model: An example from an Alpine tunnel case study. *Computers & Geosciences.* 34(4), 351-372.
- Brangulis, A.J., Kuršs, V., Misāns, J. un Stinkulis, Ģ. 1998. *Latvijas Ģeoloģija. 1:500 000 mēroga ģeoloģiskā karte un pirmskvartāra nogulumu apraksts.* Rīga, Valsts Ģeoloģijas dienests.
- Brangulis, A.J., Juškevičs, V., Kondratjeva, S., Gavēna, I., Pomeranceva, R. 2000. *Latvijas ģeoloģiskā karte, mērogs 1:200000.* Rīga, Valsts Ģeoloģijas dienests.
- Brangulis, A.J. un Konšins, S. 2002. *Latvijas tektonika.* Rīga, Valsts Ģeoloģijas dienests.
- Calgano, P., Chiles, J., Courrioux, G. & Gullien, A. 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge. Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 171(1), 147-157.
- Caumon, G. 2009. Surface-Based 3D Modelling of Geological Structures. *Math Geosciences.* 41(8), 927-945.
- Caumon, G. 2010. Towards stochastic time-varying geological modeling. *Mathematical Geosciences.* 42(5), 555-569.
- Chilès, J.P. & Delfiner, P. 1999. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty.* A Wiley-Interscience Publication. New York, Wiley.
- Davis, J. C. 2002. *Statistics and data analysis in geology, 3rd edn.* Mark Gerber (ed), New York, John Wiley & Sons
- Delaunay, B. 1934. Sur la sphère vide, *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk.* 7, 793–800.
- Delina, A., Babre, A., Grinberga, B., Sennikovs, J. un Popovs, K. Effects of karst processes on surface water and groundwater hydrology at Skaistkalne vicinity, Latvia. *Hydrology research.* (Accepted on 11.04.2011.)
- Dēliņa, A., Saks, T., Jātnieks, J. un Popovs, K. 2011. Baltijas artēziskā baseina ģeoloģiskā uzbūve hidroģeoloģiskajam modelim - pieejamo datu implementācija un problēmas.

- Latvijas Universitātes 69. zinātniskā konference. Ģeoloģijas sekcijas apakšsekcija "Baltijas artēziskā baseina pazemes ūdeņi." Referātu tēzes.* Rīga, Latvijas Universitāte, 30.-32.
- Downey, A. 2008. *Think Python. How to Think Like a Computer Scientist.* Needham, Green Tea Press.
- Groshong, R. 2006. *3-D Structural Geology. A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map interpretation. 2nd edition.* Berlin. Springer.
- Jātnieks, J., Popovs, K., Ukass, J., Karušs, J., Pērkone, E., Raga, B., Babre, A. un Saks, T. 2011. Ģeotelpisko datu sagatavošana PUMa projekta ietvaros. *Latvijas Universitātes 69. zinātniskā konference. Ģeoloģijas sekcijas apakšsekcija "Baltijas artēziskā baseina pazemes ūdeņi." Referātu tēzes.* Rīga, Latvijas Universitāte, 38.-40.
- Kauffman, O. & Martin, T., 2008. 3D geological modelling from boreholes, cross sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers & Geosciences.* 34 (1) 278–290.
- Kemp, E.A. & Sprague, K.B. 2003. Interpretive Tools for 3-D Structural Geological Modelling Part I: Bezier - Based Curves, Ribbons and Grip Frames. *GeoInformatica.* 7(1), 55-71.
- Levins, I., Levina, N. un Gavēna, I. 1998. *Latvijas pazemes ūdeņu resursi.* Rīga, Valsts Ģeoloģijas dienests.
- Liepiņš, P. 1947. Purmaļu merģeļu nogulumi Austrumprūsijas – Lietuvas ieplakā. *LPSR ZA Ģeoloģijas un Ģeogrāfijas institūta raksti.* Rīga, 35.-81.
- Liepiņš, P. 1961. Pamatklintājs. Grām.: Daņilāns, I., Liepiņš, P. un Sprinģis, K. (red.). *Latvijas PSR Ģeoloģija.* Rīga, Zinātņu akadēmijas izdevniecība, 29.-32.
- Mann, J.C. 1993. *Uncertainty in geology. Computers in Geology—25 Years of Progress.* New York, Oxford University Press, 241–254.
- Nikuļins, V. 2007. *Latvijas seismotektoniskie apstākļi un seismiskā bīstamība: promocijas darbs.* Rīgā, Latvijas Universitāte, 15.- 46.
- Popovs, K., Ukass J. un Saks, T. 2011. Application of thickness analysis and block structure regularities for establishment of geometric model within Latvia territory. *Daugavpils Universitātes 53. starptautiskās zinātniskās konferences tēzes.* Daugavpils, Akadēmiskais apgads Saule, 64.
- Popovs, K., Saks, T. un Ukass, J. 2011. Interpolācijas metožu piemērošana ģeoloģisko virsmu 3D interpretācijai Latvijas teritorijā *Latvijas Universitātes 69. zinātniskā konference. Ģeoloģijas sekcijas apakšsekcija "Baltijas artēziskā baseina pazemes ūdeņi." Referātu tēzes.* Rīga, Latvijas Universitāte, 43.-45.

- Price, N. J. & Cosgrove, J. W. 1990 *Analysis of geological structures*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Ragan, D. 1985. *Structural Geology. An Introduction to Geometrical techniques*. Third edn. New York, John Wiley & Sons, Inc. 129-269.
- Ramsay, J.G. & Huber, M.I. 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 2: Folds and Fractures*. San Diego, Academic Press inc.
- Seņņikovs, J. 2011. Baltijas artēziskā baseina matemātiskais modelis. *Latvijas Universitātes 69. zinātniskā konference. Ģeoloģijas sekcijas apakšsekcija "Baltijas artēziskā baseina pazemes ūdeņi."* Referātu tēzes. Rīga, Latvijas Universitāte, 7.-9.
- Stinkulis, G. 2003. Latvijas nogulumiežu segas stratigrāfiskā shēma. Stratigraphic chart of deposits of Latvia. *Latvijas ģeoloģijas vēstis*. 11, 14.-17.
- Suveizdis, P., Ilginyte, V., Šalavejus, S. & Bernadskis, V. 1994. Seismic-tectonic activity of Middle Lithuania. In: *Geologija, Academia, Vilnius*, 16, 56 – 60.
- Tacher, L., Pomian-Srzednicki, I. & Parriaux, A. 2006. Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models. *Computers and geosciences*. 32(2), 212-221.
- Tuulig, I. & Floden, T. 2009. Seismic correlation of Paleozoic rocks across the northern Baltic Proper - Swedish-Estonian project since 1990, a review. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 58(4), 273-285.
- Turner, A.K. 2006. Challenges and trends for geological modelling and visualisation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 65(2), 109–127.
- Ukass, J., Popovs, K. un Saks, T. 2011. Lūzumu raksturojums un izplatības likumsakarības Latvijas teritorijā. *Latvijas Universitātes 69. zinātniskā konference. Ģeoloģijas sekcijas apakšsekcija "Baltijas artēziskā baseina pazemes ūdeņi."* Referātu tēzes. Rīga, Latvijas Universitāte, 41.-43.
- Ulste, R. 1961a. Kembrija sistēma. Grām.: Daņilāns, I., Liepiņš, P. un Sprinģis, K. (red.). *Latvijas PSR Ģeoloģija*. Rīga, Zinātņu akadēmijas izdevniecība, 32.-53.
- Ulste, R. 1961b. Ordovika sistēma. Grām.: Daņilāns, I., Liepiņš, P. un Sprinģis, K. (red.). *Latvijas PSR Ģeoloģija*. Rīga, Zinātņu akadēmijas izdevniecība, 40.-47.
- Walsh, J.J., Bailey, W.R., Childs, C., Nicol, A. & Bonson, C.G. 2002. Formation of segmented normal faults: a 3D perspective. *Journal of Structural Geology*. 25(8), 1251–1262.
- Wellman, J.F., Horowitz F.G., Schill, E. & Regenauer-Lieb, K. 2010. Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. *Tectonophysics*. 490(3/4), 141-151.

- Zanchi, A., Francesca, S., Stefano, Z., Simone, S. & Graziano, G. 2009. 3D reconstruction of complex geological bodies: Examples from the Alps. *Computers & Geosciences*. 35(1), 49-69.
- Zhu, L. & Zhuang, Z. 2010. Framework system and research flow of uncertainty in 3d geological structure models. *Mining Science and Technology*. 20(2), 306-311.
- Zoraster, S. 2003. A Surface Modeling Algorithm Designed for Speed and Ease of Use with all Petroleum Industry Data. *Computers & Geosciences*. 29(9), 1175-1182.
- Гайлите, Л.К., Улст, Р.Ж. и Яковлева, В.И. 1987. *Стратотипические и типовые разрезы силура Латвии*. Рига, Зинатне.
- Сорокин, С. В., Лярская Л. А., Савваитова Л. М. и др. 1981. *Девон и карбон Прибалтики*. Рига, Зинатне.
- Ковалевский, М.И. и Озолинь, Н.К. 1967. *Тектоническая структура западного блока Восточно - Европейской платформы*. В кн.: *Вопросы геологии среднего и верхнего палеозоя Прибалтики*. Рига, Зинтанте.
- Брангулис, А.П. 1985. *Венд и кембрий Латвии*. Рига, Зинатне.
- Куршс, В.М. и Савваитова, Л.С. 1986. *Пермские известняки Латвии*. Рига, Зинатне.

Nepublicētā

- Cirša, M., Kučerenko V., Mūrnieks A. 1994. *Inčukalna laukuma seismiskās izpētes rezultāti. Seismikas grupas informatīvā atskaite par 1993. gadu*. Rīga, Latvijas ģeoloģija.
- Каņевс, S. 2001. *Inčukalna pazemes gāzes krātuves seismisko datu pārāpstrāde un interpretācija*. Rīga, Valsts Ģeoloģijas dienests.
- Каņевс, S., Bērziņš, R. 1995. *Pārskats par tēmas 13-94 "Seismiskās izpētes ar KDzP metodi materiālu pārinterpretācija ar mērķi precizēt Dienvidrietumu Latvijas naftas perspektīvo objektu struktūru."* Rīga, Naftas un gāzes zinātniski pētnieciskais institūts.
- Latipova, L., Volkovs, J., Gorobecs, N., Jevdokimova, T. 1992. *Detalizēti seismiskās izpētes darbi ar KDzP metodi Latvijai piegulošajā jūras akvatorijā. Pārskats par 1991. - 1992. g. Darbiem. Dziļurbšanai sagatavoto struktūru E2, E13, E24, E23 passes. Jūras inženierģeoloģija*. Rīga.
- PAIC. 2002. *HiFiGeo v.3.5 for Windows 95/98/2000/NT/XP*. Lietotāja rokasgrāmata, 67.
- Vetrenņikovs, V. 1996. *Latvijas un Baltijas jūras akvatorijas kristāliskā pamatklintāja tektoniskā karte, M 1:1 000 000. Latvijas un tās blakusteritoriju kristāliskā pamatklintāja stratigrāfija, tektonika un metaloģēnija*. Rīga, Valsts Ģeoloģijas dienests.

Tiešsaistes resursi

Amatas virsma 500K. *Amatas svītas nogulumu virsmas struktūrkarte mērogā 1:1 500 000.*

LU ĢZZF WMS. Sk. 26.11.2010. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>

Atsauce tekstā (Amatas virsma 500K).

ArcGIS 9.2. desktop help. An Overview of topology in ArcGIS [Bez dat.] Sk. 10.11.2010.

Pieejams

[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=An overview of topology in ArcGIS](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=An%20overview%20of%20topology%20in%20ArcGIS). Atsauce tekstā (ArcGIS, Bez dat.).

Childs, C. 2004. *Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst*. ArcUser. Sk. 10.11.2010.

Pieejams <http://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf>.

Hercīnijas struktūrkomplekss 500K. *Hercīnijas struktūrkompleksa tektoniskā karte M 1:1 500 000.* LU ĢZZF WMS. Sk. 26.11.2010. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv> Atsauce tekstā (Hercīnijas struktūrkomplekss 500K).

Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A. & Guevara, E. 2008. *Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database.*

Sk. 10.11.2011. Pieejams <http://www.cgiar-csi.org/data/elevation/item/45-srtm-90m-digital-elevation-database-v41>.

Kaledonijas struktūrkomplekss 500K. *Kaledonijas struktūrkompleksa tektoniskā karte M 1:1 500 000.* LU ĢZZF WMS. Sk. 26.11.2010. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv> Atsauce tekstā (Kaledonijas struktūrkomplekss 500K).

LVGD Pirmskvartāra. *Pirmskvartāra nogulumu karšu mozaīka M 1:200 000.* LU ĢZZF WMS. Sk. 26.11.2010. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>

Atsauce tekstā (LVGD Pirmskvartāra).

LVGD Zemkvartāra. *Zemkvartāra virsmas reljefa karšu mozaīka M 1:1 500 000.* LU ĢZZF WMS. Sk. 26.11.2010. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>

Atsauce tekstā (LVGD Zemkvartāra).

LVĢMC [Bez dat.] DB "Urbumi" (Latvijas urbumu datu bāze) Sk. 03.03.2010.

Pieejams <http://mapx.map.vgd.gov.lv/geo3/vgf/vgf.html>. Atsauce tekstā (LVĢMC, bez dat.).

Ordovika virsma 500K. *Ordovika nogulumu virsmas struktūrkarte mērogā 1:1 500 000.* LU ĢZZF WMS. Sk. 26.11.2010. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>

Atsauce tekstā (Ordovika virsma 500K).

PAIC [Bez dat.] HiFiGeo. Sk. 23.10.2010.

Pieejams <http://www.paic.lv/en/produkti.php#hifigeo>. Atsauce tekstā (PAIC, Bez dat.a).

PAIC [Bez dat.] MeshEditor. Sk. 23.10.2010.

Pieejams <http://www.paic.lv/en/produkti.php#mesheditor>.

Atsauce tekstā (PAIC, Bez

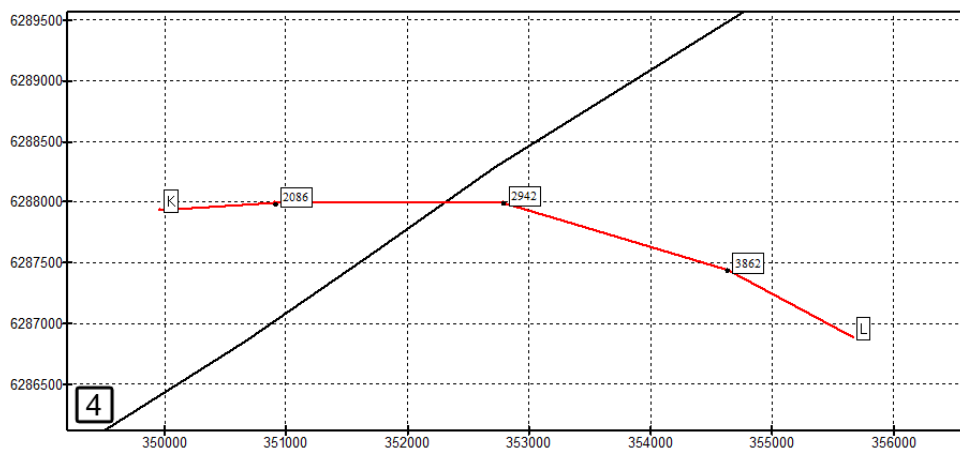
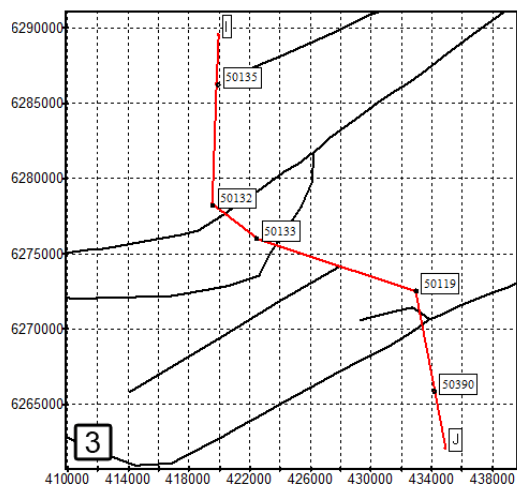
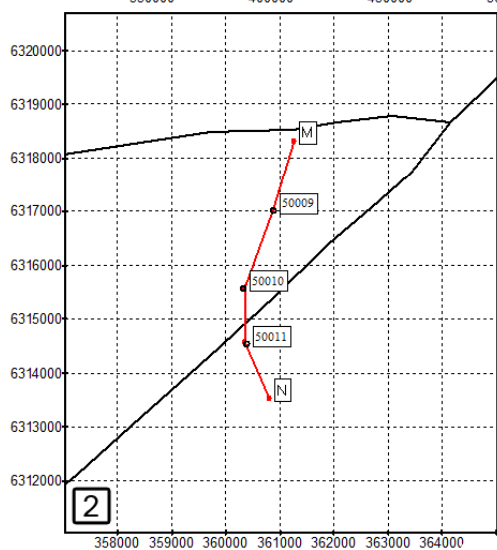
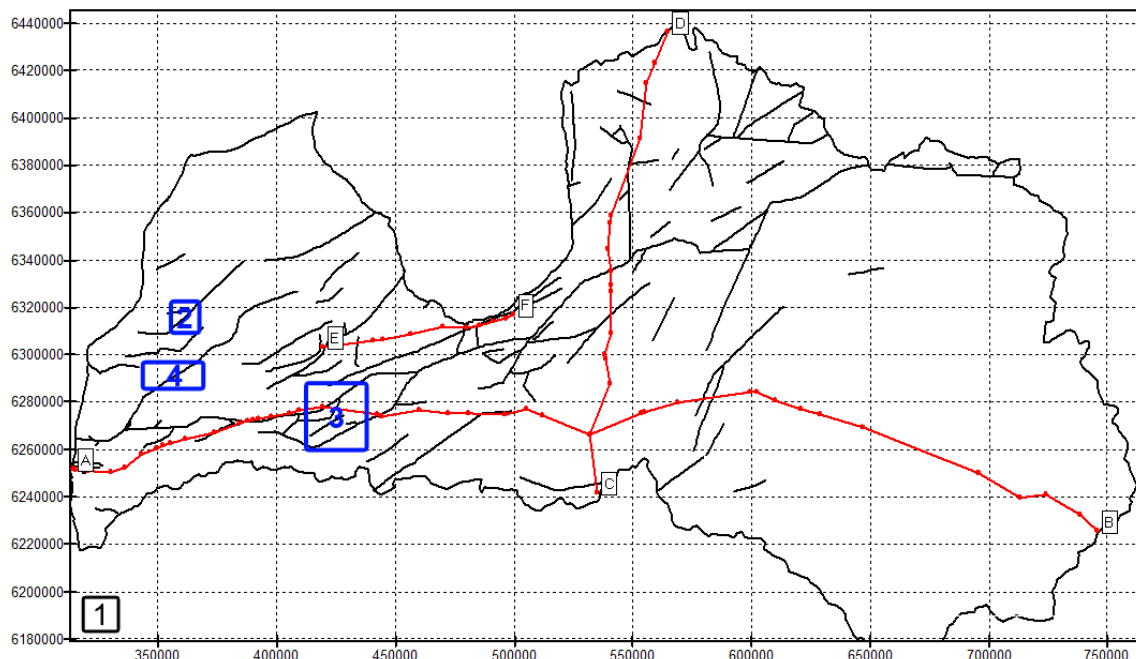
dat.b).

Pamatklintāja virsma 500K. *Pamatklintāja nogulumu virsmas struktūrkarte mērogā 1:1 500 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 26.11.2010. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv> Atsauce tekstā (Pamatklintāja virsma 500K).

Pērnavas virsma 500K. *Pērnavas nogulumu virsmas struktūrkarte mērogā 1:1 500 000*. LU ĢZZF WMS. Sk. 26.11.2010. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv> Atsauce tekstā (Pērnavas virsma 500K).

1. pielikums. Modeļa griezumumu profila līniju novietojuma mozaīka

1. attēls – griezumumu A – B, C – D un E – F novietojums, attēls papildināts ar M – N, I – J un K – L griezumumu novietojuma apgabaliem modeļa teritorijas kopskatā (zilā krāsā). 2. attēls – modeļa griezumuma M – N novietojums, 3. attēls – modeļa griezumuma I – J novietojums, 4. attēls – modeļa griezumuma K – L novietojums. 2., 3. un 4. attēls papildināti ar urbumu punktiem, caur kuriem izvilkti griezumumi.



2. pielikums. Modeļa rezultātu un urbumu datu nesaistes statistiskie rādītāji

Modeļa slānis	Minimālā nesaiste (m)	Maksimālā nesaiste (m)	Videjā aritmētiskā nesaiste (m)	Standartnovirze (s, m)	Variācijas amplitūda (R, m)
Ar-Pr	-2,61	46	0,26	±3,2445	48,61
Cm	-4	38,1	0,20	±2,538	42,1
O ₁	-3,1	48,16	0,24	±3,14	51,26
O ₂	-3,7	54,27	0,27	±3,497	57,97
O ₃	-2,32	31,3	0,16	±2,0445	33,62
S _{1ln}	-52,64	16,36	-0,24	±4,221	69
S _{2vn}	-47,9	8,73	-0,25	±3,86	56,63
S _{3ld}	-29	5,52	-0,23	±2,3117	34,52
S _{4pr}	-1,36	1,5	-0,0002	±0,3501	2,86
D _{1gr}	-0,03	31	0,88	±4,3519	31,03
D _{1km}	-35,43	20,01	-0,10	±3,45	55,44
D _{2rz-pr}	-34	5,58	-0,12	±2,031	39,58
D _{2nr}	-68,86	21,43	-0,35	±5,265	90,29
D _{2ar}	-63,01	78,28	0,39	±7,8338	141,29
D _{2br}	-44,68	57,7	0,44	±4,124	102,38
D _{3gj}	-68,83	76,39	0,64	±8,94	145,22
D _{3am}	-39,68	73,78	1,18	±7,866	113,46
D _{3pl}	-49,05	89,5	1,79	±7,8513	138,55
D _{3slp}	-41,26	62,6	0,96	±5,787548	103,86
D _{3dg}	-46,27	59,59	0,51	±6,380239	105,86
D _{3kt-og}	-3,29	42,1	0,66	±6,12505	45,39
D _{3st-el}	-56,86	42,1	-8,71	±16,51299	98,96
D _{3jn-ak}	-64,88	77,46	0,80	±10,91267	142,34
D _{3zg-mr}	-59,62	77,91	1,80	±11,37239	137,53
D _{3kti-sk}	-83,8	72,15	3,40	±11,82507	155,95
C	-73,8	67,41	0,8	±11,4473	141,21
P	-39	73,79	2,28	±12,56522	112,79
T	-72	39,93	-1,72	±11,61083	111,93
J	-22,45	46,93	2,74	±8,016684	69,38