

**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**

Loodusteaduskond

Geoloogia instituut

**TOOLSE PIIRKONNA FOSFORIIDI JA  
GRAPTOLIITARGILLIIDI GEOLOOGILINE MUDEL**

**Bakalaureusetöö**

**Sander Ahi**

Juhendaja: Sigrid Hade, TTÜ geoloogia instituut,

assistent

Kaasjuhendaja: Alvar Soesoo, TTÜ geoloogia instituut,

professor

Tallinn

2017

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidanud.

*Sander Ahi*

*(allkiri ja kuupäev)*

Juhendaja: Sigrid Hade

Kaasjuhendaja: Alvar Soesoo

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatavatele nõuetele.

*(allkiri ja kuupäev)*

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....  
*(nimi, allkiri, kuupäev)*

## LÜHIKOKKUVÕTE

Antud töö teemaks on Toolse piirkonna fosforiidi ja graptoliitargilliidi geoloogilise mudeli koostamine. Selle eesmärgiks on analüüsida Toolse piirkonna fosforiidi ja graptoliitargilliidi ruumilist levikut ja keemilist muutlikkust tuginedes varasemalt kogutud andmestikule. Analüüs toimub kaarditarkvara abil loodud mudelite abil. Lisaks viiakse läbi mõlema kihi esmased mahuarvutused. Peale eelpool mainitud tegevusi peaks olema võimalik hinnata varasemalt kogutud andmete usaldusväärsust ning uute proovide ja analüüside tegemise vajadust. Fosforiidikihi mudelid on loodud paksuse, lasumi ning  $P_2O_5$ ,  $MgO$  ja  $Fe_2O_3$  andmestiku põhjal. Graptoliitargilliidi kihi mudelid on loodud ruumilise leviku andmetele ning perspektiivsemate metallide (Mo, V ja U) kontsentratsioonidele tuginedes. Loodud mudelid on kooskõlas Tremadoki ajal valitsenud settimistingimuste ning merepõhja topograafiaga. Samuti sobituvad fosforiidikihi andmed Toolse fosforiidilasundi iseloomuga. Elementide ja keemiliste ühendite sisaldused annavad aimu huvipakkuvate kihtide ülesehitusest uurimisalal. Fosforiidi üldised varud on 407 milj. tonni. See on kooskõlas Toolse fosforiidiala üldise lasundi varuga. Graptoliitargilliidi tonnaaž uurimispiirkonnas on 242 milj. tonni. Võib öelda, et andmed tunduvad usaldusväärsed ning suures mahus uusi mõõtmisi tarvis pole vaja teha. Vajalikud oleksid detailsemad mahuarvutused, sest pole täpselt teada, milliseid meetodeid 1970.-1980. aastatel kasutati.

Töös on esitatud mudelid, nende aluseks olnud koondandmed ja esmased mahuarvutused, mida on võimalik rakendada tuleviku arenguprojektides.

Võtmesõnad: graptoliitargilliit, fosforiit, ruumiline levik, keemiline muutlikkus, mahuarvutus

**Abstract.** The Geological Model of Phosphorite and Graptolite argillite in Toolse area.

This thesis focuses on creating a geological model of phosphorite and graptolite argillite in Toolse area. The goal was to analyze the spatial distribution and chemical variability of phosphorite and graptolite argillite in Toolse area based on older data which was collected earlier. Analysis has been done with the help of models, which has been created using GIS software. Additionally primary reserve calculations of both layers have been found. Based on analyzes and calculations mentioned before, one could evaluate the reliability of the older collected data and the necessity of taking new samples from the area. The models concerning the phosphorite layer have been created from the data of thickness, depth of the upper boundary and concentrations of  $P_2O_5$ ,  $MgO$  and  $Fe_2O_3$ . The models concerning the graptolite argillite layer have been created from the data of spatial distribution and concentrations of perspective trace elements in the area – Mo, V and U. The models are consistent with the sedimentary environments and the seafloor topography dominated in the Tremadocian age. Data of the phosphorite layer fits with the known information of the Toolse deposit area. Additionally the concentrations of analyzed elements and chemical compounds comply with the rocks associated with them. The total tonnage of phosphorite in the area is 407 million tons. It is in accordance with the reserves of the whole Toolse deposit area. The total tonnage of graptolite argillite in the area is 242 million tons. It is in compliance with the calculation for the Estonian graptolite argillite. It could be said that the data seems to be generally reliable and there is no need for large amount of new measurements. Although there is a necessity for more detailed reserve calculations, because there is not a certain knowledge of how these calculations were made in 1970s and 1980s.

The paper presents geological models, assembled data and reserve calculations, which one could use in future development projects.

Key words: phosphorite, graptolite argillite, spatial distribution, chemical variability, tonnages

## **SISUKORD**

LÜHIKOKKUVÕTE .....	3
SISUKORD .....	5
SISSEJUHATUS.....	7
1. MATERJAL JA MEETODID.....	9
2. TOOLSE PIIRKONNA GEOLOOGIA .....	13
3. TOOLSE PIIRKONNA MAAVARAD .....	17
3.1 Fosforiit .....	17
3.2 Graptoliitargilliit.....	18
3.3 Karbonaatsed kivimid .....	21
4. GIS MEETODID.....	23
4.1 Pinnamudelite loomine.....	24
4.2 Pinnamudelite loomise meetodid .....	27
4.2.1 Ruumilise leviku mudelid .....	28
4.2.2 Keemilise muutlikkuse mudelid.....	28
4.3 Varuarvutuse meetod.....	29
5. TULEMUSED JA DISKUSSIOON.....	31
5.1 Piirkonna fosforiidi ruumilise leviku mudelid .....	31
5.2 Fosforiidi keemilise koostise muutlikkus.....	32
5.3 Piirkonna graptoliitargilliidi ruumilise leviku mudelid.....	34
5.4 Graptoliitargilliidi keemilise koostise muutlikkus .....	35

KOKKUVÕTE.....	37
KASUTATUD KIRJANDUS .....	39
LISAD .....	42
Lisa 1. Eesti geoloogiline ehitus .....	42
Lisa 2. Uurimisala ja Rakvere piirkonna aluskorra kaart.....	43
Lisa 3. Uurimisala ja Rakvere piirkonna aluspõhja kaart .....	44
Lisa 4. Uurimisala ja Rakvere piirkonna pinnakatte kaart.....	45
Lisa 5. Eesti graptoliitargilliidi tonnaaž.....	46
Lisa 6. Eesti ala graptoliitargilliidi makrokomponentide sisaldus .....	47
Lisa 7. Eesti graptoliitargilliidi mikroelementide keskmised sisaldused eri tsoonides.....	48
Lisa 8. Eesti karbonaatsete kivimite kasutamine maavarana .....	49
Lisa 9. Mõõtmispunktide jaotused ruumiliste andmete kogumisel.....	50
Lisa 10. Radial Basis Functions meetod .....	51
Lisa 11. Keemilise muutlikkuse mudelite loomisel kasutatud meetodid.....	52
Lisa 12. Fosforiidi paksuse mudeli ulatus.....	53
Lisa 13. Graptoliitargilliidi paksuse mudeli ulatus .....	54
Lisa 14. Fosforiidi ruumilise leviku mudelid.....	55
Lisa 15. Fosforiidi keemilise muutlikkuse mudelid.....	56
Lisa 16. Fosforiidi keemiliste ühendite sisalduste võrdlus .....	58
Lisa 17. Fosforiidi paksuse ja P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> suhe.....	59
Lisa 18. Graptoliitargilliidi ruumilise leviku mudelid .....	60
Lisa 19. Graptoliitargilliidi keemilise muutlikkuse mudelid .....	61
Lisa 20. Graptoliitargilliidis leiduvate metallide sisalduste võrdlus .....	63

## SISSEJUHATUS

Perioodil 1990-2006 ei olnud Eesti fosforiidi uurimine majanduslikult põhjendatud piisava fosforiidi pakkumise tõttu senistest maailma lihtsamatest maardlatest. Alates 2007. aastast on nõudlus ja hind maailmaturul kasvanud. Samuti on arenenud allmaakaevanduse ja fosforiidi töötlemise tehnoloogiad. Need aspektid on loonud aluse Eesti fosforiidi kasutamise analüüsimiseks (Petersell jt., 2017). Graptoliitargilliidi kiht paikneb katendina fosforiidikihi peal. Selle õlisaagis ja põlemissoojus on küll madal, kuid antud kihis leidub perspektiivseks kasutamiseks mõeldud haruldasi metalle (Raukas, 2003). Töö eesmärgiks on eelpool mainitud maavarade ruumilise leviku ja keemilise andmestiku analüüs Toolse piirkonnas ning kasutatud andmete usaldusväärsuse hindamine.

Kesk-Kambriumi kuni Hilis-Ordoviitsiumi orgaanikarikka musta savikilda lasundeid Eestis nimetatakse graptoliitargilliidiks. See sisaldab märkimisväärtset kontsentratsioonides selliseid metalle nagu U, Mo, V ja Ni. Samas võib esineda ka kohalikku rikastumist haruldaste muldmetallide, Cd, Au, Sb, As ja Pt-ga (Hade, 2014). Fennoskandia musta savikilta ja Eesti graptoliitargilliiti saab vaadelda metallimaagi ja energiaallikana (sealhulgas U ja põlevkiviõli) (Hade&Soesoo, 2014). Varasemalt on graptoliitargilliiti kutsutud diktüoneemakildaks, diktüoneemaargilliidiks või *alum shale*'iks. Sõna „diktüoneema“ tulenes bentilise eluviisiga graptoliidi liigist *Dictyonema flabelliforme*, kuid hilisematel täpsustustel on osutunud Türisalu kihistus leiduvad fossiilid planktiliselt elanud vormiks *Rhabdinopora flabelliformis* (*Ibid.*, 2014). Antud töös on kasutatud terminit graptoliitargilliit, kuid kõige täpsem oleks üldine nimetus „must kilt“.

Eestis on fosforiidiks Vara-Ordoviitsiumi ajastus (488-472 Ma tagasi) ladestunud ooboluskarbikete ehk lingulaatide tükikeste poolest rikas liivakivi. Heaks maardeks

loetakse kivimit, milles karbikeste sisaldus ületab 60%. Kaevandamiseks sobivas sügavuses on seda vaid Põhja-Eestis, pankrannikust lõuna suunas (Petersoo jt., 2017). Fosforiidikiht moodustab oma levikualal eraldi asetsevaid laigulisi rikastusvööndeid, kus fosforisisaldus ja kihi paksus vastavad esitatud nõuetele. Tööstuslikku huvi pakuvad lasundid, mille keskmine  $P_2O_5$  sisaldus on üle 6%. Ka ei tohi kahjulikke lisandeid ( $MgO$ ,  $Fe_2O_3$ ) olla üle lubatud piiri. Toolse leiukoht kuulub tööstuslikku huvi pakkuvate lasundite hulka (Isakar, 2011).

Antud töös on kasutatud ESRI ArcGIS tarkvara, mis hõlmab endas ArcGIS Desktop ver. 10.1 & 10.4.1. Selle laiendustena kasutati Spatial Analysti ja 3D Analysti, ka Geostatistical Analyst'i.

Töö eesmärgiks on uurida Toolse ala graptoliitargilliidi ja fosforiidi levikut ning geokeemilist muutlikkust. Geokeemilise muutlikkuse analüüs tugineb varasemalt analüüsitud metallide ja keemiliste ühendite kontsentratsioonidele. Analüüs toetub kaasaegsele kaarditarkvarale, kus esitatakse erinevate parameetrite alusel koostatud mudelid. Uurimuse käigus peaks selguma graptoliitargilliidi ja fosforiidi ruumiline jaotus Toolse leiukoha ümbruses. Samuti leitakse potentsiaalse maavara varu etteantud uurimisalal. Uuringuruum jääb Rakvere ja Kunda vahele Toolse leiukoha piirkonda ning selle suuruseks on 115,98 km<sup>2</sup>. Lisaks koostatakse metallide ja keemiliste ühendite kontsentratsioonide levikukaardid. Graptoliitargilliidi ja fosforiidi leviku ning geokeemilise muutlikkuse analüüsimise järel peaks olema võimalik hinnata kasutatud andmete täpsust ning uute proovide ja analüüside tegemise vajadust. Töö tulemusi on võimalik rakendada jätkuvates arenguprojektides.

Töö esimene pool annab ülevaate materjali ja andmete hankimise meetodikast, Eesti ja Toolse piirkonna geoloogilisest ehitusest ning Toolse piirkonna maavaradest. Teine osa annab ülevaate kaardiprogrammi rakendamisest antud töös ja seal kasutatud meetoditest. Sellele järgneb ülevaade tulemustest ning nende põhjal tehtud järeldustest.



## 1. MATERJAL JA MEETODID

Töö praktilises osas ja mudelites kasutatud materjal pärineb Eesti Geoloogiakeskuse fondist. Samuti on kasutatud geoloogilise baaskaardi teemakaarte mõõtkavas 1 : 50 000 ja puursüdamike andmebaasi.

Materjali hankimise algaasis oli saadaval ArcGIS Desktop 10.4.1 versioonis mxd formaadis kaardidokument, kuhu oli lisatud lisaks Eesti piiri, graptoliitargilliidi Eesti levikuala ja fosforiidiala piiri ka uurimisala raamistik. Uuringuruumi esialgne pindala oli 174,99 km<sup>2</sup>. Kasutada oli faktilise materjali andmepunktide üldandmete tabel (FM\_PA). Viimane kuulub Maa-ameti geoloogilise baaskaardi andmebaasi hulka ja sisaldab puuraukude, puurkaevude, paljandite ja vaatluspunktide üldandmeid (Maa-amet, 2015a). Andmete esmane töötlus hõlmas endas puurkaevude, paljandite ja vaatluspunktide andmestikust eemaldamist.

Uuritav graptoliitargilliit ja fosforiit paikneb Alam-Ordoviitsiumi ladestikku kuuluvas Pakerordi lademes. Tegu on aluspõhja kuuluvate settekivimite kihtidega. Seega puuraugud, mis ulatuvad ainult pinnakattesse, ei anna antud uurimuse probleemi püstitust silmas pidades, kasulikke andmeid. Need oli tarvis FM\_PA tabelist eemaldada. Peale eelpool mainitud tegevusi oli võimalik tabelis esindatud puuraugud kaardile kanda. Kaardidokumendis tuli tervet Eestit katva faktilise materjali andmepunktide tabel lõigata Clip tööriista kasutades uurimisala raamistikuga. Sel moel sai kätte aluspõhja, aluskorra ning tüübilt teadmata puuraukude üldandmed huvipakkavas piirkonnas.

Andmestikku lisandusid juhendajate Sigrid Hade ja Alvar Soesoo varasemate uuringute käigus kogutud andmed. Puuraukude andmestik sisaldas endas koordinaate, graptoliitargilliidi kihi paksust, lasumit ja lamamit. Informatsiooni võrreldi Maa-ameti geoloogilise baaskaardi andmebaasi puuraukudega. Eesmärgiks oli kontrollida

andmete kattumist ning usaldusväärsust. 63-st puuraugust 24 kattusid FM\_PA tabelis leiduvate puuraukudega. Sellised puuraugud sai andmestikust (duplikaatide tekkimise vältimiseks) eemaldatud. Identsete või peaaegu identsete koordinaatidega, kuid erineva graptoliitargilliidi paksusega puuraukusid oli tarvis Eesti Geoloogiakeskuse fondis (EGF) üle kontrollida.

Koondatud andmetabeli mahuks jäi 328 puurauku. 289-st FM\_PA tabelist pärit puuraugust puudus 65-l geoloogiline kirjeldus. Seetõttu eemaldati need andmestikust. Ülejäänute kohta oli vaja EGF-ist hankida täiendavat sisulist, faktilist informatsiooni.

Faktilise materjali andmepunktide üldandmete tabelis on olemas informatsioon andmekogust ja selle inventarinumbrist (Maa-amet, 2015b). 224 geoloogilise baaskaardi andmebaasi puurauku jagunes 14-le inventarinumbrile ehk aruandele. Koostatud aruanded on mahukad ning suur osa tööga seotud puuraukude andmestikust pärineb Nõukogude Liidu aegsest perioodist. Eelpool mainitu viitab väga ajamahukale tööle ning nõuab head vene keele oskust ja mahukates aruannetes orienteerumise võimet. Parem alternatiiv on andmeid hankida lähtudes aruannetest, mis on koostatud Toolse leiukoha ja seal leiduvate maavarade kohta.

Toolse leiukohaga on seotud fosforiidi ja graptoliitargilliidi aruanne inventarinumbriga 3200. Selle nimetus eesti keeles on „Aruanne Toolse fosforiidimaardla detailuuringu 1969.-1971.a“. Aruande autoriteks on P. Raudsep ja R. Sinisalu. Töö tegijaks on Geoloogia Valitsus (Eesti NSV Ministrite Nõukogu juures olev Geoloogia ja Maapõue Kaitse Valitsus) (Eesti Geoloogiakeskus OÜ, 2016). Detailse uurimise ülesandeks oli määrata Toolse maardla piir, fosforiidireservid plokkide kaupa ning võimalused katendi kasutamiseks. Töö käigus puuriti 615 uurimuslikku puurauku/puurkaevu (Raudsep jt., 1972). Paljudes puuraukudes ja –kaevudes uuriti katendit. Uuringute järgi on paljulubavad Pakerordi lademe, Türisalu kihistu graptoliitargilliit, Varangu kihistu aleuriitsavid, Leetse lademe glaukoniitliivakivid ja Tallinna lademe lubjakivid. Antud on katendi geoloogilised ja kvalitatiivsed karakteristikud ning nende praktilise kasutamise potentsiaal (*Ibid.*, 1972). Graptoliitargilliidi kohta moodustatud peatükk sisaldas endas argilliidi paksuse skemaatilist kaarti Toolse maardla piirkonnas. Puurauke graptoliitargilliidi kihi

paksusega oli skemaatilisel kaardil 171. Graptoliitargilliidi paksus oli leitav veel puuraukude kirjeldusi sisaldavates köidetes kui ka puuraukude registris. Viimases olid välja toodud stratigraafiliste ühikute paksus. Puuraukude kirjeldustest oli saadaval graptoliitargilliidi lamami ja lasumi väärtused. Maavarale pühendatud peatükis olid välja toodud elementide Mo ja V kontsentratsioonid. Aruande teistes köidetes olid leitavad U sisaldused. Metallide kontsentratsioonid on mõõdetud ühikus g/t.

Toolse leiukohta iseloomustab 1978. aastast pärinev fosforiidivarude ümberarvutamise töö. Antud uuring uuendas varude mahtu ning keemiliste ühendite sisaldust kihis. Töö kannab eestikeelset nimetust „Toolse maardla fosforiidivarude ümberarvutamine“ ja omab inventarinumbrit 3503. Tegijaks on samuti Geoloogia Valitsus ja autoriks H. Liivrand (Eesti Geoloogiakeskus OÜ, 2016). Aruandes sisaldus tabel, kus on väljatoodud puuraugu fosforiiti kandva kihi ülemine ja alumine piir, paksus ning keemiliste ühendite –  $P_2O_5$ ,  $MgO$  ja  $Fe_2O_3$  – sisaldused. Viimased on mõõdetud nii %-liste kontsentratsioonidena kui ka kaaluliste keskmistena tootvas kihis.

Antud uurimustöös on kasutatud ka andmeid, mis hõlmavad endas puurauke, mis on puuritud fosforiidi ja graptoliitargilliidi uuringuteks ning mille andmestik on üle vaadatud Eesti Geoloogiakeskuse poolt eraettevõtte tellimusel. Uusi puurauke lisandus üks – 988. Küll aga erinesid mitme olemasoleva puuraugu Mo, V ja U kontsentratsioonide väärtused teistest fondis kogutud andmestikest märgitust. Sellised puuraukud vajasisid edasist uurimist.

Faktilist materjali on saadud EGK poolt 2008. aastal tehtud tööst „Eesti maavarade kaart. Diktüoneemakilt (graptoliitargilliit)“, mille autoriteks on M. Niin ja M. Rammo. Tööst leiab graptoliitargilliidi kihi ruumilist jaotust iseloomustavate parameetrite väärtused ja järgnevate mikroelementide sisaldused diktüoneemakildas: uraan, toorium, molübdeen, vanaadium, plii, tsink ja hõbe. Uurimisalasse jäi 4 puurauku, mis liideti graptoliitargilliidi ruumilise jaotuse andmestikule.

Graptoliitargilliidi ruumilise jaotuse andmestikku täiendavaid puurauke leidis 1984. aastal koostatud aruandes, mis kannab eestikeelset nimetust – „Fosforiidide kattekivimite geoloogilis-geokeemiline uurimine (diktüoneemakildad)“. Aruande

autoriteks on K. Rühko ja E. Pukkonen. Töid sooritati aastatel 1983-1984 ning tegijaks oli Geoloogia Valitsus (Eesti Geoloogiakeskus OÜ, 2016). Antud aruandest on võetud uurimisala raamistikku kuuluva seitsme puuraugu graptoliitargilliidi kihi paksuse, ülemise ning alumise piiri andmed. Ruumilise jaotuse parameetrite andmed on olemas ka kerogeensetes kivimites leiduvate mikroelementide kvantitatiivsete sisalduste tabelis.

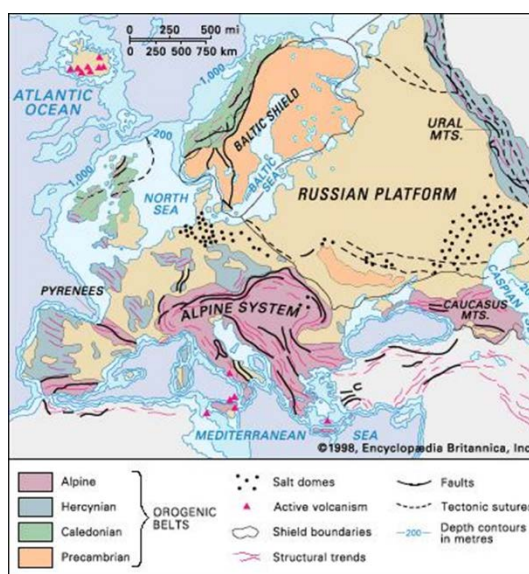
Paljudes Nõukogude Liidu aegsetes aruannetes pole antud puuraukude asukohakoordinaate või on need esitatud salastamise tõttu moonutustega. Näiteks, 1972. aasta Toolse fosforiidimaardla detailuuringu aruandes toodud koordinaatide teisendamine Eesti riiklikku ristkoordinaatsüsteemi (L-EST'97) tol ajal kasutatud projektsioonidest Pulkovo'42 või Pulkovo'63 polnud võimalik. Võrreldes EGF-st kogutud andmestikku geoloogilise baaskaardi andmebaasiga, sai valdavale osale huvipakkuvatele puuraukudele koordinaadid lisatud. Sellegipoolest jäi 85 puurauku, millele FM\_PA tabelist vastet ei leidnud. Osale nendest on leitud koordinaadid fondist, erinevatest Toolse leiukohaga seotud graptoliitargilliidi ja fosforiidi aruannetest. Ülejäänud pidi tabelist eemaldama.

## 2. TOOLSE PIIRKONNA GEOLOOGIA

Eesti asetseb Ida-Euroopa platvormi loodeosas. Ida-Euroopa platvormiks nimetatakse Skandinaavia, Uraali, Kaukasuse, Krimmi ja Karpaatide mäestike vahele jäävat laialdast lauskmaad (vt joonis 1). Eesti ala aluspõhi jaguneb kahte erineva geoloogilise ehituse ja koostisega ossa. Sügavama aluskorra moodustavad tugevasti kurrutatud eelkambriumi tard- ja moondekivimid. Nende kulutatud ja murenemiskoorikuga kaetud pinnal lamavad üldiselt rõhtsa lasumusega pealiskorra settekivimid, mis siin tekkisid osalt Ediakara ajastul, peamiselt aga Kambriumi, Ordoviitsiumi, Siluri ja Devoni ajastul. Devoni ladestust nooremaid aluspõhja kihte Eestis säilinud ei ole. Aluspõhja kivimeid katab kobedaist Kvaternaari ladestu setteist koosnev pinnakate (Rõõmusoks, 1983).

Aluskorra pealispind on Põhja- ja Kesk-Eestis üldiselt väikese lõunasuunalise kallakusega, Lõuna-Eestis Mõniste ümbruses aga uuesti kõrgemale tõusev. Selline lasumus määrab pealiskorra Ediakara, Kambriumi, Ordoviitsiumi ja Siluri kihtide samasuguse kallakuse (vt lisa 1) (*Ibid.*, 1983).

Ida-Euroopa platvormil on võimalik eristada kahte osa: lava – settekivimite ehk pealiskorraga kaetud valdavat platvormivööndit, ja kilpi, kus pealiskord settekivimite näol puudub või on esindatud vaid õhukese pinnakattega. Eesti paikneb kahe

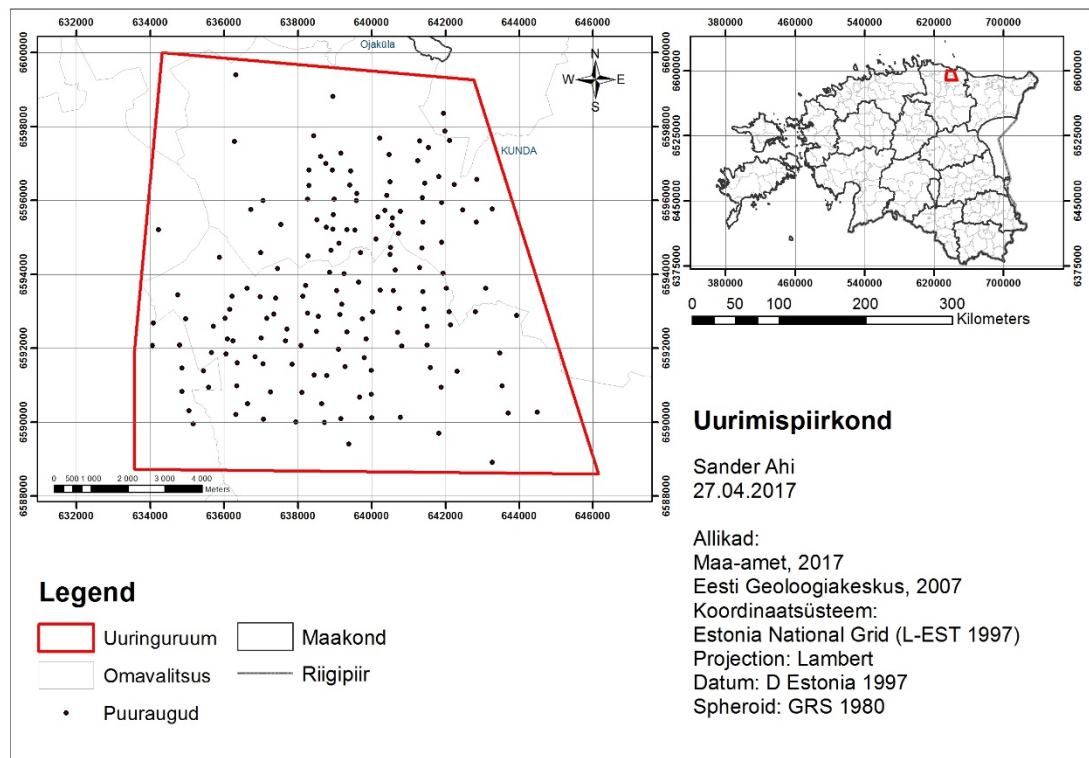


Joonis 1. Ida-Euroopa (Vene) platvorm (Structural features of Europe, 1998).

nimetatud vööndi äärealal. Seetõttu on meie alal pealiskorda moodustavate settekivimite paksus suhteliselt väike – Tallinnas ja põhjarannikul 100-150 m piires, lõuna poole see paksus järk-järgult suureneb (500-700 m) (Pirrus, 2001).

Eelpool mainitud kallakus iseloomustab antud töö raames uuritavat piirkonda. Omane on pealiskorra kaldus lasumus langusega lõuna suunas 2-4 meetrit kilomeetri kohta (Raudsep jt., 1972).

Uurimisala jääb Kunda ja Rakvere vahelisele alale Toolse leiukoha piirkonda (vt joonis 2). Piirkonna geoloogilist ülesehitust on võimalik iseloomustada tuginedes osaliselt Rakvere piirkonna geoloogilisele kirjeldusele.



Joonis 2. Uuringuruum ja töös kasutatud puuraugud.

Toolse fosforiidi- ja graptoliitargiliidi ala geoloogiline läbilõige koosneb Proterosoikumi, Paleosoikumi ja Kvaternaari kivimitest. Alam- ja Kesk-Proterosoikumi kivimitest leidub Toolse ala edelaosas sügavusel 226-245,8 m graniit-

gneisse (Raudsep jt., 1972). Uuritav ala jääb Alutaguse struktuursesse vööndisse. Uurimisala aluskorda kirjeldav kaart on lisatud antud töösse (vt lisa 2).

Põhiliselt mitmesugustest sette kivimitest koosneva pealiskorra formeerumine algas uuritava alal Neoproterosoikumis, umbes 600 miljoni aasta eest, kui idakaarest pealetungi alustanud meri alani jõudis. Neoproterosoilistest ja paleosoilistest sette kivimeist pealiskord lasub kristasel aluskorral suure (u 800 miljonit aastat) ajalise lünga ja põiksusega. Settekivimilise pealiskorra struktuurid jälgivad uurimiskiirkonnas suures osas kristalse aluskorra pealispinna reljeefi (Suuroja jt., 2006).

Ülem-Proterosoikumi Vendi kompleks on esindatud Gdovi kihistu nõrgalt tsementeerunud peeneteraliste liivakivide ning Kotlini kihistu aleuriitsete savidega. Vendi kompleksi (Ediacara ladestu) Kotlini lademe purdkivimid (savid, aluroliidid, liivakivid) lasuvad transgressiivselt, kirdesse tüseneva 70–90 m paksuse lasundina kristalse aluskorra murenemiskoorikul (*Ibid.*, 2006).

Kotlini savide peal lasuvad Alam-Kambriumi ladestikku kuuluvad purdkivimid (savi, aleuroliit, liivakivi). Kesk-Kambrium on esindatud Tiskre kihistu peeneteraliste liivakivide ja mudadega. Formatsiooni paksus ulatub 16,8 meetrini (*Ibid.*, 1972). Varemalt Alam-Ordoviitsiumisse kuulunud Kallavere kihistu alaosa on loetud mikrofauna leidude põhjal Ülem-Kambriumis kuuluvaks. Ladestik koosneb peeneteralisest nõrgalt tsementeerunud ja vähesel määral peent lukuta brahhiopoodide purdu sisaldavast kvartsliidakivist (*Ibid.*, 2006).

Alam-Ordoviitsiumi ladestikku kuuluva 3 lademe piires eristub 4 kihistut – Kallavere, Türisalu, Varangu ja Leetse. Ladestikus leidub nii ooboluste detriiti kui kojapoolmeid sisaldavat liivakivi (fosforiiti) (Kallavere kihistu), kerogeenset argilliiti ehk diktiõneemakilta (Türisalu kihistu), glaukoniitliivakivi ja bentoniitsavi (Varangu kihistu) kui ka glaukoniitliivakivi (Leetse kihistu) (*Ibid.*, 2006).

Kesk-Ordoviitsiumi ladestik on esindatud karbonaatkivimitega. 30–40 m paksuses ladestikus on eristatud (alt üles): Toila, Sillaoru, Loobu, Aseri, Vão ja Kõrgekalda kihistut (*Ibid.*, 2006).

Ülem-Ordoviitsiumi ladestik on täies ulatuses esindatud karbonaatkivimitega. Kuue lademe (Kukruse, Haljala, Keila, Oandu, Rakvere, Nabala) piires on eristatavad järgmised kihistud (alt üles): Viivikonna, Tatruse, Vasavere, Jõhvi, Keila, Hirmuse, Rägavere, Paekna ja Saunja kihistu. Ladestiku mittetäielik paksus on üle 70 meetri (Suuroja jt., 2006).

Uurimisala ja Rakvere piirkonna aluspõhja geoloogia skemaatiline kaart on välja toodud lisades ( vt lisa 3).

Kvaternaari ladestu lasundite ( vt lisa 4) paksus jääb uurimisalal vahemikku 0,10-120,0 m. Suurimad kvaternaarisetete lasundid on akumulatsioonid jäänud jääajalsetele madalatele aladele ja mattunud orgudesse. Platool jääb kvaternaarisetete paksus vahemikku 0,1 kuni 2-3 m (Raudsep jt., 1972).

Kvaternaarisetetest on piirkonnas levinud Ülem-Pleistotseeni kuuluvad glatsiaalsetted. Kihi paksus jääb vahemikku 1,0-10 m (*Ibid.*, 1972). Glatsiofluviaalsed setted lasuvad viimase jääajalsete moreenidel või vahetult aluspõhjal. Nende paksus kõigub suurtes piirides, tavaliselt 5–15 m (*Ibid.*, 2006). Kohati võib see ulatuda isegi 33 meetrini (*Ibid.*, 1972). Limnoglatsiaalsed setted on koosnevad nii sügavaveelistest, madalaveelistest kui ka rannikusetetest (*Ibid.*, 2006). Limnoglatsiaalsete setete paksus võib küündida 35 meetrini (*Ibid.*, 1972).

Holotseeni setetest leidub uuritava alal tuule-, järve-, alluviaal-, soo- ning merelisi setteid. Alluviaalsete setete paksus jääb Toolse alal vahemikku 0,5-3 meetrit. Järvesetete paksus ulatub 10 meetrini. Soosetted on alal laialt levinud. Turbakihi paksus ulatub 5-6 meetrini. Deluviaalsetete paksus ulatub 10 meetrini (*Ibid.*, 1972). Tuulesetetest äratuntavaid hilisglatsiaalseid luiteid ja luidestikke on alal vähe (*Ibid.*, 2006).



### 3. TOOLSE PIIRKONNA MAAVARAD

Aluspõhjalistest maavaradest leidub Toolse alal põlevkivi, graptoliitargilliiti, fosforiiti, karbonaatseid kivimeid ning Alam-Kambriumi Lontova kihistu tsemendisavi. Kvaternaarisetetest saab maavaradena lisaks turbale kasutada veel liiva, kruusa, savi ja järvelupja (Suuroja jt., 2006).

Piirkonna kõige levinumad ja perspektiivsemad maavarad on graptoliitargilliit, fosforiit ning karbonaatsed kivimid.

#### 3.1 Fosforiit

Eesti fosforiit on helekollane või tumehall, peene- või jämedateraline, kergelt tsementeerunud, liivane lasund. Käsijalgsete karbipoolmeid sisaldav fosforiit ilmneb Ülem-Kambriumi ja Alam-Ordoviitsiumi piiril (Kallavere kihistus) (Raudsep, 1994). Fosforiidi ilmingud on seotud puudulukuliste brahhiopoodide kojapoolmete ja nende purdu sisaldava kvartslivakiviga (*Ibid.*, 2006). Mineraalide proportsioon varieerub erinevates kihtides ja lasundites. Fosfaadi (esindatud käsijalgsete jäänustega) sisaldus kivimis jääb vahemikku alates 5-10%-st kuni 80-90%-ni. Brahhiopoodide kojapoolmed ja detriit sisaldab kuni 35-37%  $P_2O_5$ . Kogu fosforiidikihis jääb  $P_2O_5$  sisaldus vahemikku 6-20% (*Ibid.*, 1994).

Põhilised fosfaati kandvad liivast ja kodadest koosnevad kihid sisaldavad lisaks  $P_2O_5$ -le ka 13-18% CaO, 55-62%  $SiO_2$ , 1-2% püriiti, 1-2% rauaoksiide, 1,3-1,7%  $CO_2$ , 0,36-1,01% F ja umbes 0,2% orgaanilist süsinikku (Comparative Geochemistry of Shell Phosphorites..., 2013).

Fosforiiti sisaldava Kallavere kihistu lasundid on levinud üle terve Eesti (välja arvatud kitsas edela-kirdesuunaline Saaremaalt Pepsi järveni ulatuv tsoon). Kihistu

paksus varieerub 1-20 meetrini. Tootev fosforiidikiht paikneb 5-200 meetri sügavusel ja on 1-12 meetrit paks. Monokliinaalselt lasuval settekompleksil on kerge lõunasuunaline inklinatsioon (10-15') (Raukas jt., 1997).

Fosforiidikiht on kaetud kerogeeni- ja püriidirikka graptoliitargilliidiga ning Alam-Ordoviitsiumi savide, glaukoniitsete liivakivide, lubjakivide ja dolomiidiga. Kesk-Ordoviitsiumi katend on esindatud lubjakivide, dolomitiseerunud lubjakivide, dolomiitide ja merglitega. Ülem-Ordoviitsiumi ja Siluri lasundid on sarnased Kesk-Ordoviitsiumi ladestikuga. Kvaternaarisetete paksus jääb üldjuhul vahemikku 0,5-2,3 m. Põhja-Eestis levinud vanades mattunud jõeorgudes ulatub pinnakatte paksus 20-90 meetrini (Raudsep, 1994).

Uuritava piirkonnaga seotud Toolse lasund paikneb Lääne-Virumaa põhjaosas (*Ibid.*, 1997). Maardla põhimaavara fosforiidi paksus ulatub 1,7-7,1 meetrini (Suuroja jt., 2006). Fosforiidi keskmine paksus on 2,9 m (*Ibid.*, 1994). Settekompleksi paksus suureneb lõunasuunas. Põhjas piirneb lasund klindiga ja idas lõikab fosforiidikihti Kunda ürgorg. Kihi lõuna- ja läänepiir on üleminekuline muutudes vähem rikkalikumaks. Fosforiidi formatsiooni katendi paksus on 5-55 m (*Ibid.*, 1997).

Toolse lasundis eristatakse nelja tüüpi fosforiiti: räni-, kulutatud, ferrogeenne ja räni-ferrogeenne fosforiit. Nendest kõige levinum on ränifosforiit, mis moodustab umbes 70% piirkonna lasundist (*Ibid.*, 1997).

Võrreldes Toolse fosforiidiala teiste Eesti fosforiidilasunditega, hinnatakse Toolse fosforiidi tootlikust keskmiseks. Fosforiit on kõrge kvaliteediga sisaldades keskmiselt 10,6% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (*Ibid.*, 1994). Fosforiidivarud on Toolse maardlas 2015. aasta seisuga passiivses tarbevarus 386 574,0 tuhat tonni ja reservvarus 257 325,0 tuhat tonni (Roosalu, 2016).

### **3.2 Graptoliitargilliit**

Eesti Tremadocki lademe graptoliitargilliit on orgaanilise aine ja püriidirikas peeneteraline settekivim (*Ibid.*, 1997). Kivim sisaldab planktilise eluviisiga graptoliitide kivistunud fragmente, ülesehitust iseloomustab domineeriv aleuroliidi

fraktsioon ning püriidi sisalduse varieeruvus (Hints jt., 2014). Kildale on omane C ja S kõrge kontsentratsioon ning mitmesuguste metallide olemasolu (Mo, U ja V). Diktüoneemakilt ilmneb riigi põhjaosas Türisalu kihistus (Raukas jt., 1997). Türisalu kihistu on levinud umbes 250 km pikkuse vööndina. Vööndi laius on Lääne-Eestis kuni 80 km, Kesk-Eestis 30–60 km ja Ida-Eestis 10–50 km. Põhjast on kihistu piiratud Põhja-Eesti klindiga, lõunas aga suidub välja (Niin jt., 2008). Eesti graptoliitargilliidi ala hinnanguline pindala on 12 212,64 km<sup>2</sup>. Sellele vastav ruumala on 31,92 mrd m<sup>3</sup> (Hade, 2014). Võttes graptoliitargilliidi keskmiseks eritiheduseks 2,1 g/cm<sup>3</sup> kohta, on kihi tonnaažiks umbes 67 mrd tonni (lisa 5) (Hade&Soesoo, 2014).

Toolse fosforiidiala piirkonna argilliidivarud jagunevad ühteistkümmele plokile, nende kogupindalaks on 50,5 km<sup>2</sup>, sellele vastav tonnaaž on 141 402 800 tonni ning ruumala 70 701 400 m<sup>3</sup> (Raudsep jt., 1972).

Graptoliitargilliit paljandub mitmes kohas Pakri poolsaare ja Narva vahel. Lasundil on lõunasuunaline inklinatsioon (3 m km kohta). Eestis jääb kihistu paksus 1-8 meetri vahele (Hints jt., 2014). Kihistu suurim paksus on fikseeritud Lääne-Eestis, kus see võib ulatuda 8 meetrini (Ahtama puurauk (F323)). Idasuunas toimub kihistu paksuse järk-järguline vähenemine – Kiviõli ja Narva vahel on see vaid 1–2 m (*Ibid.*, 2008).

Türisalu kihistu lasumussügavus on rannikuvööndis ja klindil 0,5-6 m (*Ibid.*, 1997). Kihistu levikuala lõunapiiril Lääne-Eestis kuni 300 m (Järvakandi piirkond), Kesk-Eestis kuni 200 m ja Ida-Eestis kuni 130 m (*Ibid.*, 2008).

Kihi paksuse üldise vähenemisega ida suunas kaasneb ka orgaanilise ainese vähenemine ning mineraalainerikka aleuroliidi, püriidi ja antrakoniidi osatähtsuse suurenemine selles. Sama tendents leiab aset ka vagumuse pikiteljest põhja- ja lõunasuunas. Lääne- ja edelasuunas on kihi paksuse ja orgaanilise aine vähenemine vähem jälgitavam (*Ibid.*, 2008).

GA koosneb peamiselt 65-75% mineraalosakestest, 15-20% orgaanilisest ainest ja 2,4-6,0% püriidist. Kristalliinses mineraalosas on 79,67% tegu peliitse fraktsiooniga. Nende osahulk väheneb vahekihtide arvu suurenemisega. Liivafraktsiooniga on tegu vähem kui 2% graptoliitargilliidi puhul. See fraktsioon koosneb peamiselt fossiilide fragmentidest ning mineraalide sisaldus on ebaoluline. Vertikaalses läbilõikes

väheneb peliitiline fraktsioon allapoole liikudes. Liiva- ja aleuroliiditerade hulk suureneb edelast kirde suunas (Raukas jt., 1997).

Üldiselt domineerivad graptoliitargilliidi mineraalide kompositsioonis kaaliumpäevakivi, kvarts ja savimineraalid (Voolma, 2016). Viilkude, kloriidide ja teiste mineraalide osakaal on väike (*Ibid.*, 1997).

$<2\mu\text{m}$  ja  $>2\mu\text{m}$  fraktsioonide piiril muutub graptoliitargilliidi terasuurus ja mineraalne kompositsioon märkimisväärselt. 2-5  $\mu\text{m}$  fraktsioonide hulk suureneb järsult ning savimineraalid vahelduvad kaaliumpäevakivi ja kvartsiga (*Ibid.*, 1997).

Graptoliitargilliidi püriidi sisaldus on kõrgelt varieeruv (1,5-9,0%), enamasti jääb selle sisaldus 2,4-6% piiresse. Püriit moodustab peenkristalliinseid formatsioone, läätsesid, õhukesti vahekihte ja erineva ulatusega konkretsioone. Konkretsioonide diameeter ei ületa tavaliselt 2-3 sentimeetrit. Konkretsioonid sisaldavad galeniiti, sfaleriiti ja kaltsiiti. Püriit hõlmab endas veel markasiiti. Atmosfäärsetel tingimustel asendub osa püriidist kiiresti jarosiidi ja anhüdriidiga (Hade&Soesoo, 2014). Kõrge kerogeeni ja püriidi kontsentratsioon võib viidata haruldaste muldmetallide ja elementide olemasolule (Soesoo jt., 2014). GA sisaldab lisaks veel helepruune fosfaatseid ooiide. Lisaks sulfiididele hõlmab graptoliitargilliit lisandmineraale, sh tsirkooni, turmaliini, granaati, rutiili, glaukoniiti ja karbonaate. Kihist on leitud korundi, amfiiboole, disteeni, apatiiti, titaniiti, barüüti ja diopsiidi (*Ibid.*, 1997). Graptoliitargilliidis leiduva sulfiidi mineraliseerumise suur intensiivsus on seotud aleuroliidi vahekihtidega. Need vahekihtid võivad sisaldada tavalisest suuremates kogustes fosfaate, karbonaate, barüüti ja glaukoniiti. Karbonaatsed mineraalid esinevad sporaadiliselt. Nad tsementeerivad laikudena terrigeenset materjali ning moodustavad konkretsioone: kaltsiiti läänes ja dolomiiti idas (*Ibid.*, 2014).

Aleuroliidi vahekihtide mahu suurenemisega läänest itta, suureneb Si, Ca ja P kontsentratsioon, samas Al, K ja Mg kontsentratsioon väheneb (*Ibid.*, 1997). Makrokomponentide sisaldused on ära toodud lisades (lisa 6).

Graptoliitargilliidis on määratud üle kaheteistkümne mikroelemendi. Nendest perspektiivseimad on Mo, V ja U. Varasematele uuringutele tuginedes on Eesti graptoliitargilliit jagunenud kolme tsooni: Lääne-, Kesk-, ja Idatsoon. Viimased

erinevad teineteisest eelpool mainitud haruldaste elementide sisalduse poolest. Leviala Idatsooni kesk- ja lääneosa näitavad kõige kõrgemaid V ja Mo kontsentratsioone, V on kõrge kontsentratsiooniga ka Lääne- ja Kesktsiooni lõunaosas (Voolma jt., 2013). Uraan näitab kõige suuremaid kontsentratsioone Eesti idaosas, samal ajal kui Lääne-Eestis esinevad keskmised väärtused ning Kesktsoonis kõige madalamad väärtused (Soesoo jt., 2014). Zn kontsentratsioon on suure varieeruvusega, küündides kohati üle 1000 ppm-i (Raukas jt., 1997). Mo, V, U, Zn ja Cd kõrge kontsentratsioon omab üldiselt positiivset kovariatsiooni orgaanilise aine sisaldusega (Voolma, 2016). Mõnes kohas on registreeritud anomaalselt kõrged Au ja Pt kontsentratsioonid (>1 ppm). Kohati on väga kõrge kontsentratsiooniga Re (>3 ppm) (*Ibid.*, 1997). Põhiliste mikrokomponentide sisaldused graptoliitargilliidis on välja toodud „Lisad“ peatüki juures (lisa 7).

Kuigi graptoliitargilliidi tonnaaž ületab kukersiidi oma, on selle kvaliteet energiatootmist silmas pidades halb (Hade&Soesoo, 2014). Kõige suurem on kilda kütteväärtus selle leviku lääneosas, ulatudes paljudes puuraukudes 1400–1500 kcal/kg-ni. Alal tervikuna kõigub kilda kütteväärtus üsna suurtes piirides – 417 kcal/kg-st Kõnnu (300) puuraugus 1600 kcal/kg-ni puuraugus 1298 (Niin jt., 2008).

### **3.3 Karbonaatsed kivimid**

Karbonaatsed kivimid ilmnevad kolmes põhilises vormis: lubjakivi, marmor ja dolokivi. Nad erinevad teineteisest mineraalide kompositsiooni ja tekstuuri poolest (Lal Gauri jt., 1999). Lubjakivist moodustab 56% CaO ja 44% CO<sub>2</sub>. Dolomiit kui binaarne ühend CaCO<sub>3</sub>\*MgCO<sub>3</sub> koosneb 30,4% CaO, 21,7% MgO ja 47,9% CO<sub>2</sub>. Merglite põhikomponentideks on lubjakivi ja savimineraalid. Erinevate keemiliste ühendite sisaldused varieeruvad sõltuvalt stratigraafiliste üksuste eripäradest. Lubjarikkad kivimid varieeruvad sõltuvalt komponentidest ja lisandmineraalidest. Nendeks on glaukoniit, püriit, rauaoksiidid ja-hüdroksiidid, ränidioksiidi sisaldavad ühendid, galeniit, päevakivi, kips, barüüt jt (Trikkel, 2001).

Eestis levinuimad karbonaatsed kivimid on lubjakivi, savine lubjakivi, dolomiit, dolomiitne lubjakivi ja merglid (Trikkel, 2001).

Lubjakivi kompleksi paksus ulatub Ruhnu saarel ja Sõrve poolsaarel 500 meetrini, Kesk-Eestis üle 200 meetri ja Põhja-Eesti klindil ainult 10 meetrini. Lubjakivi kompleks kujunes umbes 490-410 miljonit aastat tagasi, mil Ida-Euroopa põhiosa triivis jaheda temperatuuriga lõunapoolkeralt troopilisse tsooni (Einasto jt., 1994).

Katendi paksuse, kvaliteedi, materjali konsistentsi ja paljandite asukoha mugavuse tõttu on rohkem kui 75% maavara rakendamisest koondunud Ordoviitsiumi lubjakividele. Kontrastselt ülejäänud territooriumile on Kagu-Eesti lubjakivi ja dolomiidi ressursid väikesed (Raukas jt., 1997).

Antud uurimuse raames analüüsitud piirkonnas paiknevaid karbonaatsete kivimite lasundeid leidub Volhovi, Kunda, Aseri, Lasnamäe, Uhaku ja Nabala lademes (*Ibid.*, 1997).

Karbonaatkivimeid kasutatakse Eestis sõltuvalt vastava lasundi omadustele ehituskivina, tehnoloogilisel otstarbel paberi- ja tselluloositööstuses, killustiku tootmiseks, tsemendi valmistamiseks, lubja põletamiseks, metallurgias, klaasi-, keemia- ja toiduainetööstuses (Raukas, 2003).

Erinevate karbonaatsetest kivimitest saadavate maavarade summaarne aktiivne tarbevaru on 337 973 tuhat m<sup>3</sup>, reservvaru 587 027 tuhat m<sup>3</sup> ja passiivne varu vastavalt 447 008 tuhat m<sup>3</sup> (lisa 8) (Roosalu, 2016). Antud tööga seotud piirkonda jäävad Kunda maardla, sh Toolse-Lääne ja Aru-Lõuna lubjakivikarjäär. Maardlas kaevandatakse maavaradena tsemendilubjakivi ning ehituslubjakivi. Nende summaarne aktiivne tarbevaru on 46 370,6 tuhat m<sup>3</sup>, reservvaru 108 907 tuhat m<sup>3</sup> ja passiivne varu vastavalt 73 275 tuhat m<sup>3</sup> (Roosalu, 2016).

## 4. GIS MEETODID

Geograafiline infosüsteem (GIS) võimaldab andmeid visualiseerida, analüüsida, usaldusväärsust hinnata ja tõlgendada. Eelpool mainitu abil on andmetes võimalik märgata seoseid, iseloomulikke jooni ja trende (ESRI, 2017a). GIS komponentideks on riistvara, GIS tarkvara, metaandmete sisendriistvara ja andmemälu, informatsiooni väljundriistvara, GIS andmed ja ruumiandmetega töötav GIS inimressurss (Hade, 2017). Geoinfosüsteemil põhinev andmetöötlus koosneb viieastmelisest protsessist. Esmalt on vaja püstitada lahendamist vajav probleem ja selle ilmnemise asukoht. Järgmisena on tarvis selgitada andmete olemasolu ja kättesaadavus. Kolmanda sammuna hinnatakse kogutud andmete organiseeritust, täpsust ja päritolu. Sellele järgneb vajalike andmete juurdetootmine ja geograafiline analüüs. Viimase sammuna on vaja tulemusel korrektselt vormistada ja esitleda (ESRI, 2017b).

Antud töö raames on andmete esmasel töötlemisel kasutatud Microsoft Exceli tabelarvutus- ja tabelitöötlusprogrammi. Hilisemal ruumiandmete töötlemisel ja analüüsil on rakendatud ESRI ArcGIS tarkvara, mis hõlmab ArcGIS Desktop ver. 10.1 & 10.4.1. Selle laiendustena on kasutatud 3D Analysti, Spatial Analysti ja Geostatistical Analysti.

ArcGIS 3D Analysti laiendus hõlmab endas tööriistu, mille abil on võimalik luua, visualiseerida ja analüüsida GIS andmeid 3D kontekstis. Muuhulgas saab määrata rasterpindade pindala ja ruumala ning luua mitmesuguseid profiile (Booth, 2000). Antud töö raames on rakendatud ruumala ja pindala arvutamise võimekust.

Kõige rohkem on kasutatud andmete analüüsimisel ja töötlemisel Spatial Analysti laiendust. Viimane võimaldab andmete ruumilist analüüsi ja modelleerimist nii raster- kui ka vektorandmetele. Antud töö raames on kasutatud interpoleerimise ja pinnatöötlemise tööriistu.

Geostatistical Analysti abil saab uurida ruumilisi andmeid, tuvastada viimastes anomaaliaid ja ebakõlasid, hinnata loodud mudelite täpsust, analüüsida nende statistilisi näitajaid ja pakkuda optimaalseid pindade loomise vahendeid. Enamkasutatavamaid vahendeid selles laienduses on Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) tööriistad, mis võimaldavad analüüsida sisestatud andmete jaotust, trendi, võõrväärtusi ja ruumilist ülesehitust (ESRI, 2001).

Antud töö raames on rakendatud Geostatistical Analysti koondatud andmete analüüsimisel, mille tulemuste alusel sai valida mudelite loomiseks sobivaimad interpolatsioonimeetodid. Loodavate mudelite täpsust on seejärel kontrollitud Geostatistical Analyst tööriba abil.

#### **4.1 Pinnamudelite loomine**

Peamised GIS meetodid pinnamudelite loomise juures on interpolatsioon ja selle üks vorme – triangulatsioon. Erinevate interpolatsioonimeetodite alusel on võimalik luua rasterpindu. Trianguleeritud vektormudeleid moodustatakse TIN (*Triangulated Irregular Network*), terrain või LAS (*Log ASCII Standard*) andmestike abil (ESRI, 2016a).

Antud töö raames on kasutatud interpolatsioonimeetodit, mis annab piiritletud ala igale pikslile väärtuse matemaatilisi funktsioone rakendades. Tulemuseks on rastermudel. Viimast saab kasutada huvipakkuva parameetri iseloomustamisel ja ruumilise leviku kirjeldamisel. Interpoleerimine on punktandmete väärtuste järgi pideva pindandmestiku genereerimine. See põhineb ruumilise autokorrelatsiooni või sõltuvuse põhimõtetel, mis mõõdavad lähedal või kaugel paiknevate objektide omavahelisi seoseid (Childs, 2004).

Ruumiandmete analüüs aitab lahendada probleeme, mida ei ole võimalik lahendada kahemõõtmelise analüüsi korral. Tänu ruumilisele autokorrelatsioonile annab interpoleerimine tegelikkusele vastavaid tulemusi. Interpolatsiooni kasutatakse peamiselt sellepärast, et välitööde käigus andmete kogumine on kulukas. Samuti on neid võimatu igast punktist hankida (GIS Resources, 2013a).



Interpoleeritava pinna omadusi on võimalik erinevatel viisidel mõjutada. Saab piirata pikslite arvutamisel kasutatud sisendpunktide arvu. Paljud interpolatsiooni tööriistad rakendavad barjääre, mis mõjutavad loodava pinna sujuvust ja pidevust. Barjäärid on vajalikud, sest üldjuhul ei tohi interpoleerida üle murrangujoonte, tammide, kaljude ja ojade/jõgede, mis loovad pinnas pidevusetust. Barjäärid võimaldavad selliseid pinnas esinevaid muutusi kirjeldada (Childs, 2004).

Üldjuhul kehtib põhimõte, et mida rohkem proovipunkte, seda parem on tulemus. Samuti oleks hea, kui punktid jaotuksid uuritava alal ühtlaselt (GIS Resources, 2013a). Ühtlase jaotuse põhimõttest lähtudes on parim stratifitseeritud juhuslikkus, kus punktid jaotuvad korrapärases ruudustikus suvaliselt. Teistest jaotustest annab klastriline head informatsiooni ainult valitud piirkonna kohta, läbilõikelist jaotust kasutatakse profiilide uurimisel ja kontuurset meetodit on rakendatud digitaalsete kõrgusmudelite (DEM) loomisel (vt lisa 9; Burrough jt, 2015).

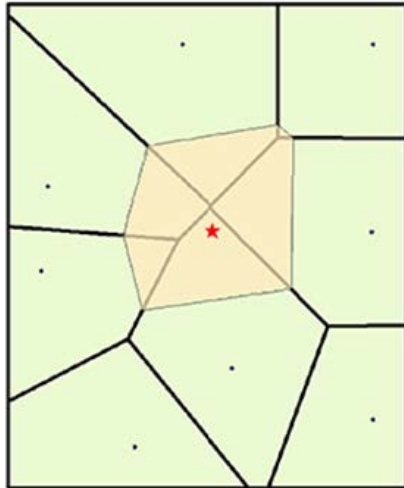
Pole olemas ühte kindlat interpolaatorit, mida on võimalik igas situatsioonis rakendada. Meetodi valik sõltub algandmetest, loodavate pindade tüüpidest ja täpsusnõuetest (*Ibid.*, 2013a).

Seejuures eristatakse deterministlikku ja geostatistilist interpolatsiooni tehnikat. Deterministlikud meetodid loovad pindu tuginedes mõõdetud punktidele või matemaatilistele valemitele. Geostatistiline tehnika põhineb statistikal. See hõlmab endas juhuslikkuse mõõtu ning ennustuste täpsuse hinnangut (Childs, 2004).

Deterministlikud interpolatsioonimeetodid on IDW (*Inverse Distance Weighted*), Natural Neighbour, Spline, Topo To Raster, RBF (*Radial Basis Functions*) ja Trend, geostatistilistest meetoditest võib nimetada Krigingu erinevad meetodeid. Antud töös on kasutatud Natural Neighbouri, RBF-i ja Krigingi meetodeid.

Natural Neighbouri näol on tegu kasutaja jaoks üsna lihtsa meetodiga. See loob sisestatud punktidest Delauney triangulatsiooni. Iga sisestatud punkti ümber moodustatakse Natural Neighbouri regioon. Seejärel valitakse lähimad sidepunktid, mis moodustavad interpoleeritava punkti ümber analoogse regiooni. See kattub erinevates proportsioonides ümbritsevaid sisestatud punkte defineerivate aladega (vt

joonis 3). Interpoleeritava punkti väärtus arvutatakse läheduses paiknevate punktide parameetri väärtuse kaalutud keskmistena. Nende punktide osakaal valemis on



Joonis 3. Natural Neighbouri polügoonid (ESRI, 2011).

määratud ümbritseva regiooni selle osa suuruse järgi, mis kattub interpoleeritava punkti ümber loodud alaga (GIS Resources, 2013b). Meetod sobib andmetele, millele on omane ebäühtlane ruumiline jaotus. Samuti on interpolaator efektiivne suure hulga algandmete töötlemiseks (Childs, 2004).

RBF meetodi iseloomulikuks jooneks on loodava pinna läbimine igast mõõdetud punkti väärtusest (vt lisa 10). Eristatakse viite erinevat põhifunktsiooni. Igal funktsioonil on erinev kuju ja tulemuseks on teistsugune pind. RBF on sarnane

kummist membraani sobitamisega läbi mõõdetud punktide, samal ajal pinna kumerust minimeerides. Valitud funktsioon määrab ära viisi, kuidas membraan väärtuste vahele sobitub. Meetodit kasutatakse suurest hulgast andmepunktidest sujuva pinna loomisel. Head tulemused annab väikese varieeruvusega z-väärtuste esinemine. (ESRI, 2001, 2003).

Kriging eeldab, et andmepunktide vaheline kaugus ja suund peegeldab ruumilist korrelatsiooni, mida saab kasutada pinnas ilmnevate varieerumiste selgitamiseks. See omistab teatud arvule või kõikidele teatud piirkonnas paiknevatele punktidele funktsiooni, millega on võimalik määrata iga asukoha z-väärtus. Kriging on kasutamiseks sobilik, kui on teada ruumilise korrelatsiooni olemasolu. Meetod kasutab kaalutud keskmise tehnikat, rakendab fikseeritud või varieeruvat otsinguraadiust ning pind ei pruugi läbida mõõdetud punktide z-väärtust (Childs, 2004).

## 4.2 Pinnamudelite loomise meetodid

GIS tarkvarasse kantud andmestik vajab edasist töötlust. Enne interpolaatorite rakendamist peab muutma andmepunktide jaotuse võimalikult ühtlaseks. Ekstreemselt kõrged või madalad väärtused võivad luua mittetõese mudeli.

Andmete esmasel vaatlusel selgus, et uurimisala lõunaosas oli graptoliitargilliidi ruumilise leviku andmeid tunduvalt hõredamalt kui uurimisruumi teistes piirkondades. Samuti puudusid seal fosforiidiandmed, mis olid koondunud pigem ala kesk- ja põhjaosasse. Seetõttu poleks omavahel saanud võrrelda fosforiidi ja graptoliitargilliidi ruumilise leviku parameetreid. Eelpool mainitud põhjustel oli vajalik uurimisala vähendada selle lõunaosa arvelt seniselt 175 km<sup>2</sup>-lt 116 km<sup>2</sup>-le.

Graptoliitargilliidi ruumilise leviku andmestik oli peamiselt koondunud uurimisala keskosasse. Moodustusid klastrid, mis segasid interpolaatorite tööd. Selle tõttu oli tarvis osa Eesti Geoloogiakeskusest pärinevaid andmeid proovipunktide hulgast eemaldada. Sama oli tarvis teha ka mujal, kus esinesid teineteisele väga lähestikku paiknevad puuraugud.

Geostatistical Analysti tööriba võimaldab leida globaalseid ning lokaalseid võõrväärtusi. Neid aitavad tuvastada semivariogrammi pilv, histogramm ja Voronoi kaardistamise tööriist (ESRI, 2001, 2003). Selliseid normaaljaotusest kõrvalekalduvate atribuudi väärtustega puurauke sai kontrollitud võrreldes omavahel erinevaid andmetabeleid. Kui andmetes ebakõlasid ei esinenud, võis jõuda kahele järeldusele: tegu on heterogeense uurimispiirkonnaga, kus lähestikku võivad paikneda väga erinevate parameetriliste väärtustega punktid või on aruannetes tehtud viga, mida pole võimalik tuvastada antud andmehulkasid omavahel võrreldes.

Ebakõlad ilmnesid Eesti Geoloogiakeskuse aruannete ruumilise leviku andmetes. Uuritavate parameetrite väärtused ei olnud teineteisega loogilises seoses. Sellistel puhkudel oli abiks Maa-ameti Geoportaal, kus leidub teavet puuraukude ruumilise leviku kohta. Samuti oli võimalik probleemseid puurauke võrrelda naabruskonnas paiknevate puuraukudega. Siinjuures on lähtunud lähestikku paiknevate puuraukude omaduste suurema sarnasuse põhimõttest. Vajadusel võis veel analüüsida Toolse

maardla detailplaneeringu käigus uuritud puuraukude kirjeldusi. Kui need kontrollmeetodid selgust ei toonud, tuli nimetatud puuraukud valimist eemaldada.

Interpolatsioonimeetodi valikul on abiks ESRI Geostatistical Analyst laiendus, mis aitab hinnata loodud mudeli vastavust sisestatud algandmetele ning normaaljaotuse olemasolu. Viimase ilmnemise puhul soovitatakse kasutada Krigingit. Eelpool mainitud laienduses leiduvad tööriistad võimaldavad lisaks analüüsida ka andmetes esinevat trendi. Samuti on võimalik semivariogrammi pilve abil kontrollida ruumilise autokorrelatsiooni olemasolu. Semivariogrammi pilv kõrvutab andmepunktide paaride z-väärtuse erinevuse nendevahelise kaugusega (ESRI, 2001, 2003).

ArcGIS tarkvaras on võimalik statistiliste näitajate abil hinnata mudeli vastavust algandmetele. Täpset mudelit iseloomustavad statistilised näitajad on nullilähedane keskmine ennustusviga, ühelähedane RMS standardiseeritud ennustusviga ning võimalikult väikesed RMS ja keskmine standardviga (*Ibid.*, 2001, 2003).

#### **4.2.1 Ruumilise leviku mudelid**

Varasemates töodes graptoliitargilliidi kihi paksuse kohta Eesti alal tervikuna on ruumilise leviku hindamisel kasutatud Natural Neighbouri meetodit. See ei loo juurde mingeid trende ega äärmusi, mida pole olemas juba algandmetes. Kriging sobib kõige paremini tugevat juhuslikku komponenti sisaldava fenomeni puhul. Samas enamik settelise keskkonna pindadest ja mahtudest pole stohhastilised, vaid on pigem loodusliku protsessi tulemus (Hade&Soesoo, 2014).

Üldjuhul ongi töös ruumilist levikut kirjeldavad kihid loodud Natural Neighbour meetodit kasutades. Fosforiidi lasumi pinna koostamisel on kasutatud Krigingi tehnikat seetõttu, et antud mudel vastab täpsemalt sisestatud algandmetele.

#### **4.2.2 Keemilise muutlikkuse mudelid**

Keemilise koostise muutlikkuse mudelite loomisel on levinud meetodiks Kriging, sest metallide ja keemiliste ühendite keskmised kontsentratsioonid võivad olla rohkem stohhastilised. Elementide ja nende kontsentratsioonide vahel ei pruugi esineda selget seost (Hade&Soesoo, 2014).

Võttes arvesse varasemalt mainitud interpolaatori valikule kaasa aitavaid meetodeid ja andmeid iseloomustavaid statistilisi näitajaid, on keemilise andmestiku mudelite puhul kasutatud tehnikate valik laiem. Rakendatud on Natural Neighbouri, Krigingi ja RBF meetodit (vt lisa 11). Graptoliitargilliidi keemiliste parameetrite juures on enamasti kasutatud Kriging meetodit. Vanaadiumi andmetele tuginev pind on loodud Natural Neighbouri tehnika alusel. Seda põhjusel, et saadud tulem on sisestatud algandmete väärtustele lähedasem. Antud juhul oli Krigingi meetodi kasutamise puhul probleemiks kontsentratsiooni väärtuste vahemiku liigne tasandamine. Kadusid algandmetes esinenud äärmused. RBF-i on kasutatud P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kontsentratsiooni iseloomustava pinna juures. Valik on tehtud mudeli heade statistiliste näitajate ning algandmete sarnasuse tõttu. Teiste fosforiidi keemiliste näitajate puhul on eelistatud Natural Neighbouri meetodit.

#### 4.3 Varuarvutuse meetod

Fosforiidikihi paksuse mudeli loomisel on kasutatud 101 puuraugu andmeid. Varu kalkuleerimisel kasutatud rasterpinna piksli suurus on võetud 35 × 35 m. See on määratletud valemiga  $Cell\ size = \frac{width\ or\ height\ (whichever\ is\ shorter)}{250}$ . Laius või pikkus on võetud sisendina kasutatud andmestiku ulatusest (ESRI, 2016b). Ala on piiritletud äärmiste puuraukude asukoha järgi. Piirkonna täpsustatud pindala on 63,1 km<sup>2</sup>. Selle läänepoolseim punkt jääb Haljalast 6,7 km kaugusele. Uurimisala kirdeosa jääb Kundast 840 m kaugusele. Kaugus Toolse asulast on 2,2 km. Piirkonna ulatus põhja-lõuna suunas on umbes 8,7 km, lääne-ida suunas vastavalt 10,4 km (vt lisa 12).

Fosforiidikihi eritiheduse arvutamisel kasutatakse nii liivakivi kui ka brahhiopoodide karbipoolmete tihedust. Mõlemat arvestatakse nende vastavates proportsioonides. Antud töös on fosforiidi tiheduseks võetud keskmine väärtus 2,13 g/cm<sup>3</sup> kohta.

Graptoliitargilliidi interpoleeritud pinna loomisel on kasutatud puuraukude arv 159. Piksli suurus on 42 × 42 m. Ala on piiritletud sarnaselt fosforiidi paksuse mudelile äärmiste puuraukude asukoha järgi. Piirkonna täpsustatud pindala on 83,2 km<sup>2</sup>.

Piirkonna ulatus põhja-lõuna suunas on umbes 10,5 km, lääne-ida suunas samuti 10,5 km (vt lisa 13).

Graptoliitargilliidi eritihedus varieerub vahemikus 1,8-2,5 g/cm<sup>3</sup>. Antud töös on esitatud üldised varud erinevate tiheduste korral. Keskmiseks eritiheduseks on loetud 2,1 g/cm<sup>3</sup> (Hade, 2014).

Mõlema eelpool mainitud kihi juures pole huvipakkuvate keemiliste ühendite ja metallide varu eraldi välja arvatud. Antud elemendid ja keemilised ühendid on esitatud eraldi kaardidel keskmiste kontsentratsioonidena g/t kohta või %-des ning interpoleeritud vahemikena. GA ja fosforiidi varu arvutamisel on kasutatud paksusandmete alusel loodud interpoleeritud pindu. Nende põhjal on välja arvatud fosforiidi- ja graptoliitargilliidi kihi ruumala, mida on seejärel võimalik maavara eritihedust teades ümber arvutada hulgaks tonnides.

## 5. TULEMUSED JA DISKUSSIOON

### 5.1 Piirkonna fosforiidi ruumilise leviku mudelid

Fosforiidi interpoleeritud paksus jääb vahemikku 1,0-5,3 m. Keskmine paksus uurimisalas on 3,1 m. Üldiselt on märgata kirde-edelasuunalist ( $27-43^{\circ}$  -  $205-222^{\circ}$ ) trendi, kus kihi paksus püsib stabiilselt üle kolme meetri. Ulatudes kohati isegi üle 5 meetri. Erandiks on puuraugu 462 ümbrus uurimisruumi edelanurgas, kus kihi paksus langeb 1,55 meetrini. Piirkonna keskosast lääne- ja lõunasuunas ( $73-202^{\circ}$ ) liikudes on märgata kihi paksuse järsku langemist, kahanedes ala kagunurgas 1 meetrini. Fosforiidikihi paksus langeb alla keskmise ka uurimisruumi loodenurgas. Fosforiidikihi paksuse mudel on välja toodud lisades (vt lisa 14).

Interpoleeritud pind vastab üldiselt teadaolevatele leviku tingimustele (Raukas jt., 1997). Põhjust piirneb Toolse fosforiidiala lasund klindiga. Seda on märgata antud uuringuruumi loodenurgas, kus kihi paksus hakkab järsult kahanema. Idast lõikab fosforiidikihti Kunda ürgorg. Lõuna- ja kagusuunas toimub kihi paksuse üleminekuline kahanemine.

Interpoleeritud fosforiidikihi lasum jääb vahemikku 14,9-55,3 meetrit. Keskmine lasumi sügavus on 27,6 meetrit. Uurimisruumi lõunaservas suureneb lasumi sügavus järsult 32-lt üle 55 meetri. Märgata on vööndilist, üleminekulist sügavnemist (vt lisa 14). Lasumi sügavnemine lõuna suunas võib olla tingitud piirkonna paiknemisest Fennoskandia lõunanõlval.

Fosforiidi kihi mahuarvutused on sooritatud nii Krigingi kui ka Natural Neighbouri alusel loodud pinnast. Nende omavaheline mahuerinevus on umbes 0,9 % (vt tabel 1).

Lähtudes Natural Neighbour meetodi alusel loodud kaardist, on fosforiidikihi tonnaaž 407 milj. tonni. Toolse maardla tarbe- ja reservvaru on maavarade koondbilansile tuginedes 643 899 000 tonni

Meetod	V (m3)	m (t)
Natural Neighbour	191 226 179,2	407 311 761,8
Kriging (ordinary)	192 868 367,2	410 809 622,2

Tabel 1. Fosforiidi varuarvutuse tulemused.

(Roosalu, 2016). Arvestades, et uuringuruumi pindala on 63,1 km<sup>2</sup> ja Toolse maardla ametlik pindala on 101,9 km<sup>2</sup>, on sooritatud mahuarvutuse tulemus tõenäoliselt usaldusväärne.

Fosforiidikihi ruumilise leviku andmed näivad vastavat Toolse fosforiidiala teadaolevatele seaduspäradele. Kihi paksuse varieerumine on samuti selgitatav Kallavere kihistu kujunemise ajal valitsenud merepõhja topograafia ning mitmesuguste hüdrodünaamiliste settimistingimustega (Hints jt., 2014).

## 5.2 Fosforiidi keemilise koostise muutlikkus

Fosforiidi keemilist muutlikkust on hinnatud P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO ja Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alusel (vt lisa 15). Difosforpentaoksiidi kontsentratsiooni iseloomustava interpoleeritud pinna pindala on 63,0 km<sup>2</sup>. Teiste keemiliste ühendite sisaldust iseloomustavate mudelite pindala on väiksem (58,7 km<sup>2</sup> – MgO kaardil; 57,9 km<sup>2</sup> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaardil).

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus jääb uurimisruumis vahemikku 3,3-16,7 %. Keskmise sisaldus on 9,1 %. Üldiselt on märgata piirkonna lääne-, loode- ja põhjaosas tunduvalt madalamat kontsentratsiooni. See langeb ala põhjanurgas 3,3 %-ni (puurauk 401). Kõrgeimad väärtused esinevad piirkonna kesk- ja kaguosas. Lõuna suunas liikudes on märgata kontsentratsiooni langust 6,48 %-ni. Keskmise kontsentratsioon 9,1 % jääb alla Toolse fosforiidilasundi üldisele P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kontsentratsioonile (10,6 %). See võib olla tingitud sellest, et antud uurimisruumi kaasatud loode- ja lääneosa ei kuulu ametlikult määratletud Toolse fosforiidiala hulka. Antud piirkonnas esinevad keskmisest madalamad difosforpentaoksiidi sisaldused, kontsentratsioonid jäävad alla 6 %.



Andmetes on märgata trendi, kus üldjuhul  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  kontsentratsiooni suurenedes kasvab ka  $\text{P}_2\text{O}_5$  kontsentratsioon. Rauaoksiidi leidub peamiselt brahhiopoodide konglomeraatides (Raudsep jt., 1972). MgO-ga esinev seos on nõrgem (vt lisa 16).

Üldiselt on märgata fosforiidikihi paksuse vähenemisega  $\text{P}_2\text{O}_5$  kontsentratsiooni suurenemist (vt lisa 17). Vastupidine trend on ala lääne- ja loodeosas, kus paksema kihiga kaasneb madalam sisaldus.

MgO kontsentratsioon uurimisruumis jääb vahemikku 0,09-2,9 %. Keskmine sisaldus on 0,47 %. Üldjuhul jääb uurimisruumis MgO kontsentratsioon 0,08-1 % piiresse. Sellest trendist eristub ala kagunurgas esinev suur sisaldus, kus see küündib 2,88 %-ni. Magneesiumi kandjaks on dolomiitne tsement. Toolse fosforiidiala keskmine MgO kontsentratsioon on 0,4 % (Raukas jt, 1997). Detriitsetes kvartsliaakivides, detriitsetes liivakivides ja detriitsetes brahhiopoodide konglomeraatides on MgO sisaldus üldiselt madalam (0-1,0 %), samas brahhiopoodide konglomeraatides ületab magneesiumoksiidi kontsentratsioon 1,5 % piiri (*Ibid.*, 1972). Viimasest tuleneb tõenäoliselt MgO suur keskmine sisaldus uurimisala kaguosas.

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  kontsentratsioon jääb uurimisruumis vahemikku 0,7-3,2 %. Keskmine sisaldus on 1,80 %. Sarnaselt difosforpentaoksiidi ja MgO kontsentratsioonidele, on  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sisaldus uurimisruumi lääne-, põhja- ja loodeosas madal jäädes üldjuhul alla 1,5 %-i. Kõrgeimad väärtused esinevad piirkonna kirdeosast lõunaosani ( $40^\circ$ - $205^\circ$ ). Edelas esineb madala rauaoksiidi kontsentratsiooniga puurauk 832 (1,19 %). Toolse fosforiidiala üldine rauaoksiidi sisaldus on 1,5 %. Antud uuringuruumi kontsentratsioon on sellest mõnevõrra kõrgem. Suur rauaoksiidi sisaldus osades puuraukudes võib olla seotud argilliidi vahekihtidega, mis sisaldavad püriiti.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sisaldus on uuringuruumis varieeruv ning ei pruugi alati vastata mingisuguste seaduspäradele.

Keemiline andmestik vastab üldjoontes teadaolevatele iseloomujoontele.  $\text{P}_2\text{O}_5$  sisaldus varieerub üsna suurtes piirides. Selgelt tuleb esile madala kontsentratsiooniga uuringuruumi loodepiirkond. MgO suur kontsentratsioon langeb kokku piirkondadega, kus esineb dolomiitset tsementi, samuti on kontsentratsioon suurem

brahhiopoodide konglomeraatides. Rauaoksiidi sisaldus on suur piirkondades, kus esineb argilliidi vahekihte. Viimast toetab puuraukude kirjelduses leiduv teave.

### **5.3 Piirkonna graptoliitargilliidi ruumilise leviku mudelid**

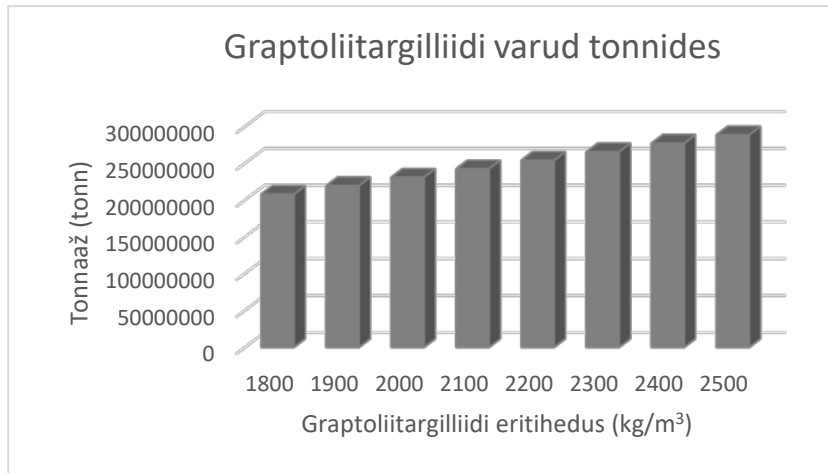
Graptoliitargilliidi interpoleeritud paksus jääb vahemikku 0,5-2,3 m. Keskmise paksus on uurimisalas 1,4 m. Paksuse muutlikkust iseloomustab suur heterogeensus. Sellegi poolest on märgata graptoliitargilliidi kihi paksuse suurenemist lääne suunas. Jagades uurimisruumi puuraukude nr 871 ja 563 joonel kaheks plokiks, on läänepoolse osa graptoliitargilliidi kihi keskmine paksus 1,50 m, idapoolse ploki parameetri keskmine väärtus on 1,36 m (vt lisa 18).

On teada, et ida suunas toimub Türisalu kihistu järkjärguline vähenemine – Kiviõli ja Narva vahel kõigest 1-2 meetrini. Samuti väheneb kihi paksus lõunasuunas, kus toimub selle välja suidumine (Niin jt., 2008). Antud uurimisruumi kohta loodud mudel näib eelpool mainitud teadmistega kooskõlas olevat. Türisalu kihistu paksuse varieerumine uurimisruumi ulatuses võib olla seotud iseloomult dünaamiliste settimisprotsessidega. Settekeskkonnas olid orgaanikarikka muda tavalisemad levimisviisid põhjalähedased, lainetega seotud voolused ja mudaosakeste transport mööda põhja. Oma roll ebahütlase paksusega kihi kujunemisel võis olla merepõhja topograafia eripäradel antud piirkonnas. See on mõjutanud ka Kallavere kihistu ruumilise leviku iseloomujooni (Hints jt., 2014).

Interpoleeritud graptoliitargilliidi kihi lasum jääb vahemikku 8,3-55,1 meetrit. Keskmise lasumi sügavus on 25,4 meetrit. Uurimisruumi lõunaservas suureneb lasumi sügavus järsult 30-lt üle 55 meetri (vt lisa 18). Lasumi sügavnemist lõuna suunas selgitab piirkonna paiknemine Fennoskandia lõunanõlval.

Graptoliitargilliidi kihi mahuarvutused on sooritatud nii RBF-i kui ka Natural Neighbouri meetodi alusel loodud pindadest. Nende omavaheline mahuerinevus on umbes 0,2 %. Lähtudes Natural Neighbour tehnika alusel loodud kaardist, on

graptoliitargilliidi kihi tonnaaž keskmise tiheduse –  $2,1 \text{ g/cm}^3$  – puhul 242 milj. tonni (vt joonis 4).



Joonis 4. Graptoliitargilliidi hulk tonnides.

Arvestades pindalalisi erinevusi mõlema ala puhul, võib öelda, et üldiste varude suurusjärk antud töös langeb kokku Toolse maardla detailplaneeringu raames tehtud varuarvutustega. Samas ei teata täpselt, kuidas aastatel 1969-1971 neid varusid leiti. See annab aluse uute arvutuste ja mõõtmiste tegemiseks.

Graptoliitargilliidi ruumilise leviku andmed on tõenäoliselt kvaliteetsed. Loodud mudel on kooskõlas eelpool mainitud settimistingimustega. Samuti vastavad lasumi andmed Fennoskandia kilbi asendile.

#### 5.4 Graptoliitargilliidi keemilise koostise muutlikkus

Graptoliitargilliidi keemilist muutlikkust on hinnatud metallide Mo, V ja U alusel (vt lisa 19). Loodud pindade pindala on  $52,5 \text{ km}^2$ .

Mo sisaldus uurimisruumis jääb vahemikku 217-657 g/t. Keskmine sisaldus on 411 g/t. Suurim kontsentratsioon on uurimisala kagunurgas puuraukude 946 ja 938 läheduses. Kirde-edelasuunas on üldjuhul madalamad väärtused vahemikus 214-440 g/t. Sellest eristuvad puuraugud 513 ja 439-A. Viimases küündib Mo kontsentratsioon üle 600 g/t (667 g/t).

On teada, et graptoliitargilliidi kergetes amorfsest, silikaatsest materjalist koosnevates vahekihtides küündib Mo sisaldus üle 125 g/t. Puhtas argilliidis ulatub

Mo kontsentratsioon 400 g/t ja üle selle (Raudsep jt., 1972). Eelpool mainitu annab informatsiooni konkreetsetes asukohtades esineva kihi ülesehituse kohta.

V sisaldus uurimisruumis jääb vahemikku 744-1317 g/t. Keskmise sisaldus on 1041 g/t. Kõrgemad kontsentratsioonid on uurimisala lõunaosas puuraugu 867 ümbruses. Suur on sisaldus ka uurimisruumi põhjaosas. Kirde-edelasuunal on üldjuhul madalamad väärtused vahemikus 740-975 g/t. Sellest eristub puurauk 513. Viimases küündib V kontsentratsioon üle 1300 g/t. Märkata on tugevat korrelatiivset sidet Mo-ga (vt lisa 20).

U sisaldus uurimisruumis jääb vahemikku 96-384 g/t. Keskmise sisaldus on 198 g/t. Kõrgeimad kontsentratsioonid on uurimisala lõunaosas puuraukude 867 ja 940 ümbruses. Uuringuruumi muudes piirkondades on üldjuhul madalamad väärtused vahemikus 98-210 g/t. Sellest eristuvad puuraugud 988 (308 g/t) ja 590 (258 g/t).

Kõrged uraanisisaldused on seotud sellise kildaga, mille kütteväärtus, s.o. orgaanilise aine sisaldus on suur (Niin jt., 2008). Kontsentratsiooni sõltuvuslik side Mo ja V-ga on nõrgem (vt lisa 20).

Uraani sisalduse suurenemine lõuna suunas võib olla seotud vahekihtide osakaalu vähenemise ning kihi homogeensemaks muutumisega.

Mikroelementide suuremale kontsentratsioonile mõjusid soodsamalt varieeruvad settimistingimused (*Ibid.*, 1972). Sellest tulenevalt on ka antud uurimisruumis märgata suuri kontsentratsioonide kõikumisi, mis võib viidata Vara-Ordoviitsiumis esinenud dünaamiliste ja rahulikemate settimistingimuste vaheldumisele.

Keemilise andmestiku iseärasused on üldjuhul eelpool väljapakutud teooriatega kooskõlas. Mo ja V keskmine kontsentratsioon on lähedane Toolse tsooni vastavate metallide üldisele sisaldusele (vt lisa 7). Erinevus ilmneb U kontsentratsiooni puhul. Uuringuruumid pole samade mõõtmega, mistõttu pole võimalik antud juhul kindlat hinnangut anda. Parameetrite väärtuste suur varieeruvus on vastavuses varasemalt tehtud uurimusega, mis tõi esile Mo, V ja U sisalduse suure muutlikkuse Eesti graptoliitargilliidi ala lõikes (Voolma jt, 2013).

## KOKKUVÕTE

Käesoleva töö käigus loodi erinevad graptoliitargilliidi ja fosforiidikihi parameetreid kirjeldavad mudelid. Mudelid on loodud tuginedes kihtide paksuse, lasumi ning keemilise andmestiku andmetele. Seejärel mudeleid geostatistiliselt analüüsitud. Analüüsil on kasutatud keemiliste ühendite, metallide ning kihtide ruumilist levikut kirjeldavate parameetrite omavahelisi seoseid. Esile on toodud loodud kaarte iseloomustavad eripärad ning otsitud nende ilmnemise põhjuseid. Seejärel on olnud võimalik anda hinnang andmete usaldusväärsusele. Lisaks on tehtud esialgsed mahu- ja varuarvutused. Viimaste sooritamisel kasutati interpoleeritud pindade meetodit.

Fosforiidikihi ruumilist levikut mõjutavad mitmesugused tegurid. Seda mõjutavad nii Põhja-Eesti klint, Kunda ürgorg kui ka ala paiknemine Balti kilbil. Varieerumine kihi paksuses võib olla põhjustatud ka Vara-Ordoviitsiumi ajal valitsenud settimistingimustes. Antud töös rakendatud andmed ja mudelid toetavad varasemalt tõstatatud seisukohti ning need viitavad 1978. aastal kogutud andmete usaldusväärsusele.

Sooritatud üldine fosforiidi varuarvutus näib samuti viitavat mõõtmiste täpsusele, sest leitud varu suurusjärk – 407 milj. tonni – langeb kokku Toolse fosforiidiala varudega. Siinjuures ka arvestades uuringuruumide pindalalisi erinevusi.

Fosforiidi keemilist andmestikku analüüsid selgusid mitmesugused seosed, mis annavad informatsiooni kihi ülesehituse kohta antud asukohas. Märkata on  $P_2O_5$  ja rauaoksiidi omavahelist korrelatsiooni. Suurema difosforpentaoksiidi sisaldusega kasvab  $Fe_2O_3$  kontsentratsioon. Samuti on märkata  $P_2O_5$ -e seost kihi paksusega. Üldjuhul suureneb fosforiidikihi paksuse vähenemisega difosforpentaoksiidi kontsentratsioon. Erandiks on piirkonna loodeala, kus on madala väärtusega fosforiit. Erinevate ühendite sisaldused annavad ettekujutuse kihi kompositsioonist. Keemiline

andmestik vastab üldjuhul varasemalt teadaolevatele faktidele ning sisaldused uuringualal on hästi ära põhjendatud. Seega võib öelda, et antud andmestik ja loodud mudelid on pädevad.

Graptoliitargilliidi kihi paksus varieerub suures ulatuses ning on üldiselt heterogeenne. Lähestikku paiknevad üsna suure paksuse erinevusega piirkonnad. Lasumi mudeli lõuna suunas sügavnemise eripära toob esile ala paiknemise Balti kilbi lõunanõlval. Antud mudelis ja andmestikus ilmnevad iseloomujooned on kooskõlas varasemalt avaldatud teooriate ja piirkonna geoloogia kirjeldustega. See annab alust arvata, et Eesti Geoloogiakeskuse fondist pärit graptoliitargilliidi ruumilise leviku andmed on usaldusväärsed.

Usaldusväärsust kinnitavad ka üldised mahuarvutused, mille suurusjärk langeb kokku Eesti graptoliitargilliidi varudega. Saadud hinnanguline varu on 242 milj. tonni. Hinnangu andmise juures on arvestatud ka piirkondade pindalalise erinevuse ning kihi üldise õhenemisega ida suunas.

Keemilist andmestikku iseloomustab väärtuste suur varieerumine ning suur keskmine kontsentratsioon. Samuti on märgata erinevate metallide sisalduste omavahelisi seoseid. Suurim sõltuvuslik seos on Mo ja V vahel. Kõikide elementide puhul on märgata suuremat kontsentratsiooni piirkonna lõunaosas ning üldjuhul kaasneb ühe jälgelemendi suure kontsentratsiooniga teiste elementide sisalduse tõus. Nõrgim seos on uraani ja teiste metallide kontsentratsioonide vahel. Jälgelementide sisaldused annavad aimu graptoliitargilliidi kihi ülesehitusest. Lisaks toetab mudel arusaama, et lasundi kujunemisel olid varieeruvad settimistingimused. Toolse ala graptoliitargilliidi keemiline andmestik näib olevat kooskõlas varasemalt avaldatud publikatsioonidega.

Uuringutulemusi saab arvesse võtta tuleviku arenguprojekte silmas pidades. Antud andmestikku ja mudeleid on võimalik kasutada täpsemate mahu- ja varuarvutuste tegemisel. Välja on arvutatud üldised varud, mis annavad ülevaatliku ettekujutuse ala perspektiivist, kuid tarvis oleksid täpsemad arvutused plokkide kaupa. Seda põhjusel, et pole täpselt teada, millisel meetodil 1970.-1980. aastatel mahtusid kalkuleeriti. Mudeleid on võimalik kasutada edasistel geoloogilistel uuringutel.

## KASUTATUD KIRJANDUS

ArcGIS® 9: Using ArcGIS® Geostatistical Analyst. (2001, 2003). United States of America: ESRI.

Booth, B. (2000). Using ArcGIS™ 3D Analyst™. United States of America: ESRI.

Burrough, P. A., McDonnell, R. A., Lloyd, C. D. (2015). Principles of Geographical Information Systems. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press.

Childs, C. (2004). Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. – *ArcUser: The Magazine for Esri Software Users*, Summer, 32-35.

Eesti Geoloogiakeskus OÜ. (2016) [WWW] <http://www.egk.ee/info/fond/> (28.03.2017)

Einasto, R., Kukk, M. (1994). Limestone and Dolomite. – *Estonian Mineral Resources*. Tallinn : Estonian Environmental Information Centre, 25-31.

Encyclopædia Britannica, Inc. (1998). [WWW] <https://www.britannica.com/place/Europe#toc34516> (07.04.2017)

ESRI. (2001). ArcGIS Geostatistical Analyst: Statistical Tools for Data Exploration, Modeling and Advanced Surface Generation. – *ESRI White Paper*, August, 1-19.

ESRI. (2016a). [WWW] <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/fundamentals-of-3d-surfaces.htm> (29.04.2017)

ESRI. (2017a). [WWW] <http://www.esri.com/what-is-gis> (29.04.2017)

ESRI. (2016b). [WWW] <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/environments/cell-size.htm> (02.05.2017)

ESRI. (2017b). [WWW] <http://www.esri.com/what-is-gis/howgisworks> (29.04.2017)

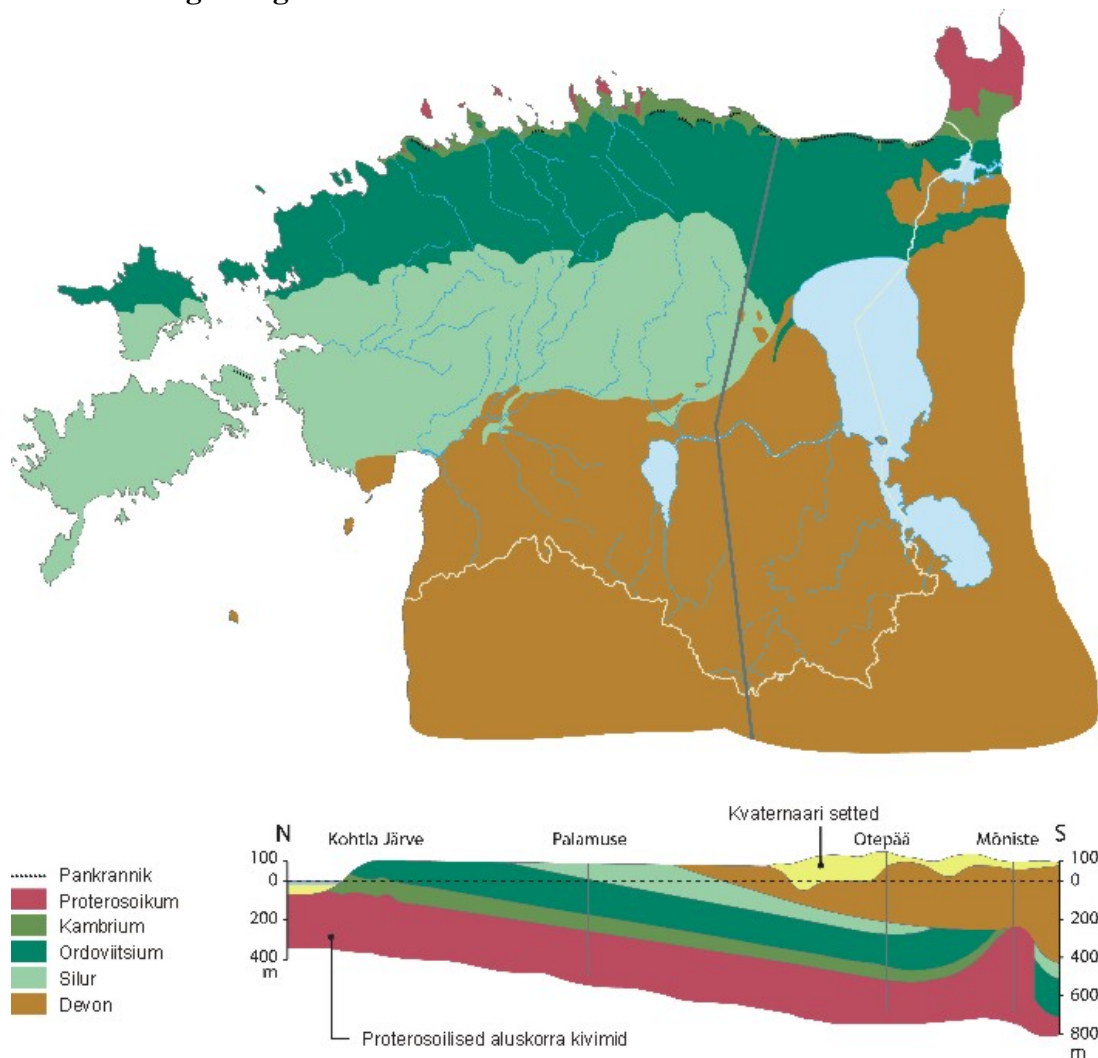
- ESRI. (2011). [WWW]  
<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=How%20Natural%20Neighbor%20works> (22.04.2017)
- Geology and Mineral Resources of Estonia. (1997). / eds. A. Raukas, A. Teedumäe. Tallinn : Estonian Academy Publishers.
- GIS Resources. (2013a). [WWW]  
[http://www.gisresources.com/gis\\_interpolation\\_techniques\\_2/](http://www.gisresources.com/gis_interpolation_techniques_2/) (21.04.2017)
- GIS Resources. (2013b). [WWW] [http://www.gisresources.com/types-of-interpolation-methods\\_2/](http://www.gisresources.com/types-of-interpolation-methods_2/) (21.04.2017)
- Hade, S. (2014). GIS meetodite rakendused Paleosoikumi graptoliitargilliidi ja keskkonnaseisundi muutlikkuse uuringutes : doktoritöö. Tallinn University of Technology, Tallinn.
- Hade, S. (2017). GIS methods in geology: Spatial Analyst : loengumaterjal. TTÜ, Department of Geology, Tallinn.
- Hade, S., Soesoo, A. (2014). Estonian Graptolite Argillites Revisited: A Future Resource?. – *Oil Shale*, 31 (1), 4-18.
- Hints, R., Hade, S., Soesoo, A., Voolma, M. (2014). Depositional framework of the East Baltic Tremadocian black shale revisited. – *GFF*, 136 (3), 464-482.
- Isakar, M. (2011). Fosforiit. [WWW] <http://www.ut.ee/BGGM/maavara/fosforiit.html> (27.04.2017)
- Isakar, M. (2013). [WWW] [http://www.ut.ee/BGGM/eestigeol/e\\_geol\\_kaart.jpg](http://www.ut.ee/BGGM/eestigeol/e_geol_kaart.jpg) (07.04.2017)
- Lal Gauri, K., Bandyopadhyay, J. K. (1999). Carbonate stone : chemical behavior, durability, and conservation. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Maa-amet. (2015a). Eesti digitaalkaardistamise (mõõtkavas 1 : 50 000) juhendi seletuskiri: juhendi versioon 2.4.
- Maa-amet. (2015b). Juhend Eesti geoloogiliseks digitaalkaardistamiseks mõõtkavas 1 : 50 000 (versioon 2.4).



- Niin, Mati, Rammo, Mati. (2008). Eesti maavarade kaart: diktüoneemakilt (graptoliitargilliit). Mõõtkavas 1:400 000 (1:200 000). Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus.
- Pirrus, E. (2001). Eesti geoloogia. Tallinn: TTÜ kirjastus.
- Pleiades Publishing, Ltd. (2013). Comparative Geochemistry of Shell Phosphorites and Dictyonema Shales of the Baltic. – *Geochemistry International*, 51 (1), 23-32.
- Raudsep, R. (1994). Phosphorite. – *Estonian Mineral Resources*. Tallinn: Estonian Environmental Information Centre, 19-25.
- Raudsep, R., Sinisalu, R. (1972). Aruanne Toolse fosforiidimaardla detailuuringust 1969.-1971.a. Keila : Eesti NSV Ministrite Nõukogu Geoloogia Valitsus.
- Raukas, A. (2003). Geoloogia ja geofüüsika alused. Tallinn : Eesti Mereakadeemia
- Reinsalu, E., Petersell, V. Fosforiit Eestis. [WWW] <http://eestifosforiit.ee/fosforiit-eestis/fosforiit-eestis> (27.04.2017)
- Roosalu, R. (2016). Eesti Vabariigi 2015. aasta maavaravarude koondbilansid (seisuga 31.12.2015. a.). Tallinn : Maa-amet.
- Rõõmusoks, A. (1983). Eesti aluspõhja geoloogia. Tallinn : Valgus.
- Soesoo, A., Hade, S., (2014). Black Shale of Estonia: Moving towards a Fennoscandian Baltoscandian Database. – *Труды Карельского научного центра РАН*, 1, 103-114.
- Suuroja, Kalle, Ploom, Kuldev, Mardim, Tiit, All, Tarmo, Otsmaa, M., Veski, A. (2006). Baaskaardi Rakvere (6434) lehe geoloogilise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine: aruanne. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Trikkel, A. (2001). Estonian Calcareous Rocks and Oil Shale Ash as Sorbents for SO<sub>2</sub> : doktoritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- Voolma, M. (2016). Geochemistry of Organic-Rich Metalliferous Oil Shale/Black Shale of Jordan and Estonia : doktoritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- Voolma, M. Soesoo, A., Hade, S., Hints, R., Kallaste, T., (2013). Geochemical Heterogeneity of Estonian Graptolite Argillite. – *Oil Shale*, 30 (3), 377-401.

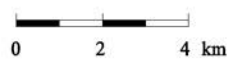
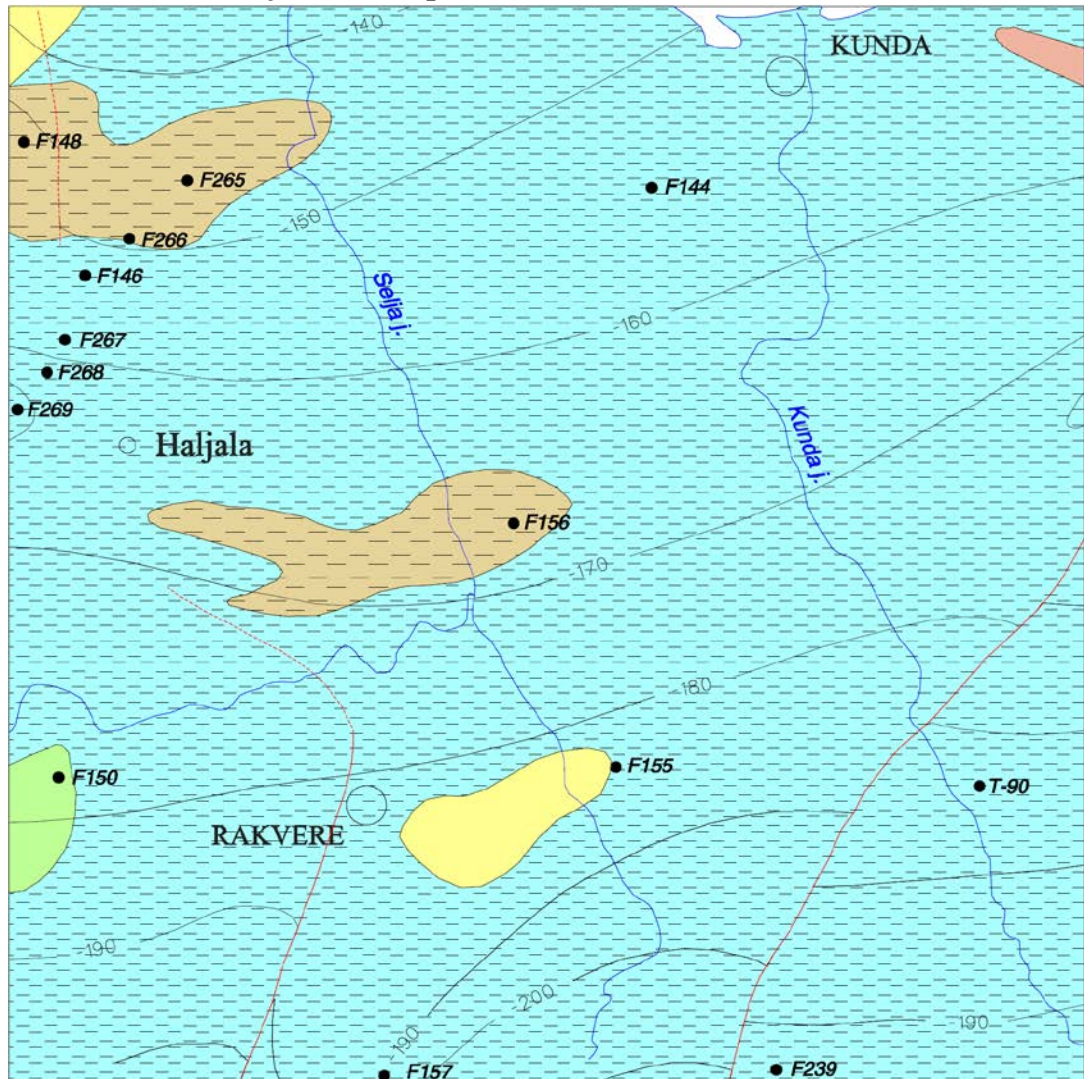
## LISAD









### Lisa 1. Eesti geoloogiline ehitus



Joonis 1. Eesti geoloogiline läbilõige (Isakar, 2013).

## Lisa 2. Uurimisala ja Rakvere piirkonna aluskorra kaart



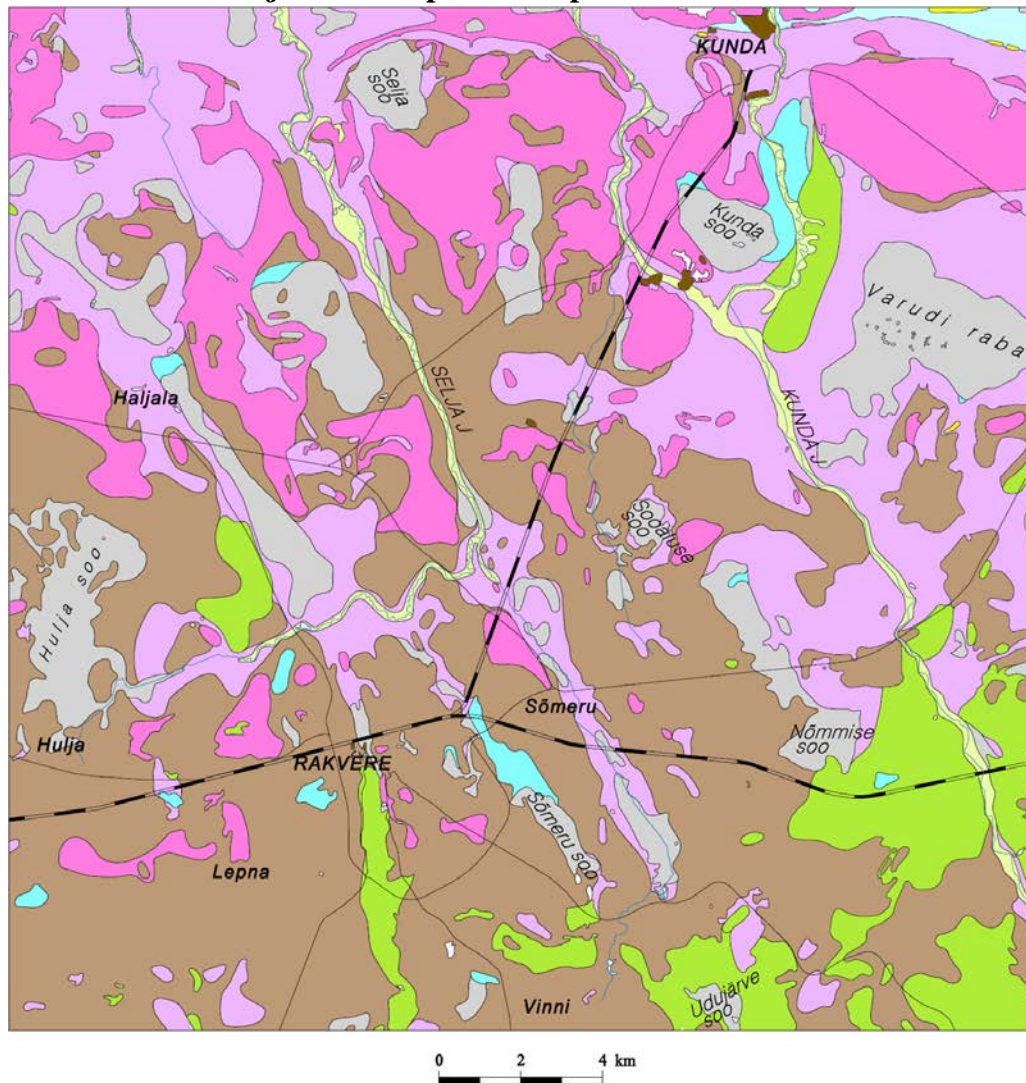
	Vilgugneiss <i>Mica gneiss</i>		Kvarts-pärvakivigneiss <i>Quarz-feldspar gneiss</i>		Graniit <i>Granite</i>
	Biotiitgneiss <i>Biotite gneiss</i>		Amfiboolgneiss ja anfibiolit <i>Amphibole gneiss and amphibolite</i>		-190 Aluskorra reljeef <i>Relief of the basement</i>
	Aluspõhja puurauk <i>Drill hole in basement</i>		Murrang <i>Fault</i>		

Joonis 2. Kristalse aluskorra skemaatiline kaart (Suuroja jt., 2006).





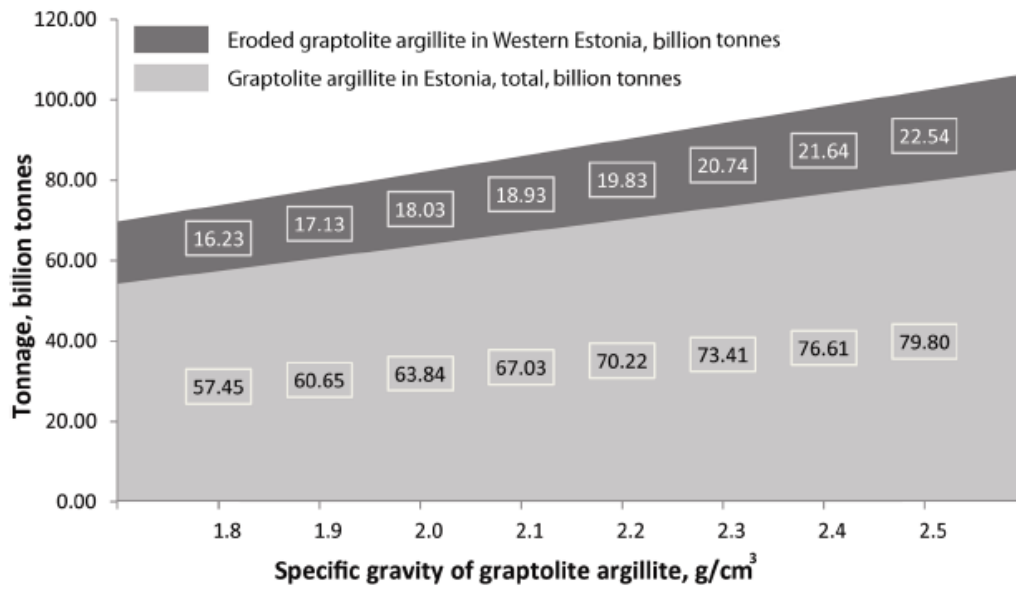
#### Lisa 4. Uurimisala ja Rakvere piirkonna pinnakatte kaart



	Tehnogeensed setted <i>Technogeneuous deposits</i>		Tuulesetted <i>Aeolian deposits</i>
	Soosetted <i>Peat deposits</i>		Jääjärvelised setted <i>Glaciolacustrine deposits</i>
	Järvesetted <i>Lacustrine deposits</i>		Glatsiofluviaalsed setted <i>Glaciofluvial deposits</i>
	Jõesetted <i>Alluvial deposits</i>		Moreen <i>Till</i>
	Balti mere setted <i>Deposits of the Baltic Sea</i>		Õhukese pinnakattega ala <i>Thin Quaternary cover</i>

Joonis 4. Pinnakatte skemaatiline kaart (Suuroja jt., 2006).

**Lisa 5. Eesti graptoliitargilliidi tonnaaž**



Joonis 5. Eesti ala graptoliitargilliidi tonnaaž (Hade&Soesoo, 2014).



**Lisa 6. Eesti ala graptoliitargilliidi makrokomponentide sisaldus**

Komponent	Lääne-Eesti (Haldna jt., 1984)	Lääne-Eesti (Petersell, 1997)	Maardu (Kirret jt., 1959)	Toolse (Raudsep, 1987)	Kilda klark
SiO <sub>2</sub>	50,06	48,92	52,09	51,15	50,93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,89	13,09	13,09	9,76	19,75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,04	5,61	5,68	8,03	5,23
CaO	0,82	0,49	0,82	2,82	3,54
MgO	1,38	1,49	1,42	1,08	2,24
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,08	0,56	0,09	0,89
K <sub>2</sub> O	7,65	7,89	7,47	5,73	2,75
TiO <sub>2</sub>	0,71	0,73	0,64	0,73	0,77
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,20	0,23	0,39	0,16
K.K.	20,92	21,39	17,83	20,6	

Tabel 1. Makrokomponentide sisaldused Eesti graptoliitargilliidis (Niin jt., 2008).

**Lisa 7. Eesti graptoliitargilliidi mikroelementide keskmised sisaldused eri tsoonides**

Element	Lääne-Eesti (g/t)	Maardu (g/t)	Toolse (g/t)	Kilda klark (g/t)
U	86	36	162	3,7
V	724	350	1040	130
Mo	162	53	406	2,6
Zn	222	220	170	95
Pb	130	98	120	20

Tabel 2. Mikroelementide keskmised sisaldused graptoliitargilliidi eri tsoonides (Niin jt., 2008).



**Lisa 8. Eesti karbonaatsete kivimite kasutamine maavarana**

Maavara	Mõõtühik	Kaevandamine (kaod) 2015.a	Maavaravarud seisuga 31.12.2015		
			Aktiivne		Passiivne
			tarbevaru	reservvaru	
Tsemendilubjakivi	tuhat m <sup>3</sup>	157,5 (0,1)	57 879	76 141	50 994
Tehnoloogiline lubjakivi	tuhat m <sup>3</sup>	68,9 (2,1)	14 074	43 447	73 492
Ehituslubjakivi	tuhat m <sup>3</sup>	1 627,1 (3,9)	185 005	265 526	237 877
Tehnoloogiline dolokivi	tuhat m <sup>3</sup>	127,7	12 897	82 582	–
Viimistlusdolokivi	tuhat m <sup>3</sup>	5,6	2 832	20 603	2 261
Ehitusdolokivi	tuhat m <sup>3</sup>	544,9	64 152	98 728	82 384
Täitedolokivi	tuhat m <sup>3</sup>	7,9 (5,6)	1 134	–	–

Tabel 3. Karbonaatsete kivimite kasutamine maavarana (Roosalu, 2016).

## Lisa 9. Mõõtmispunktide jaotused ruumiliste andmete kogumisel

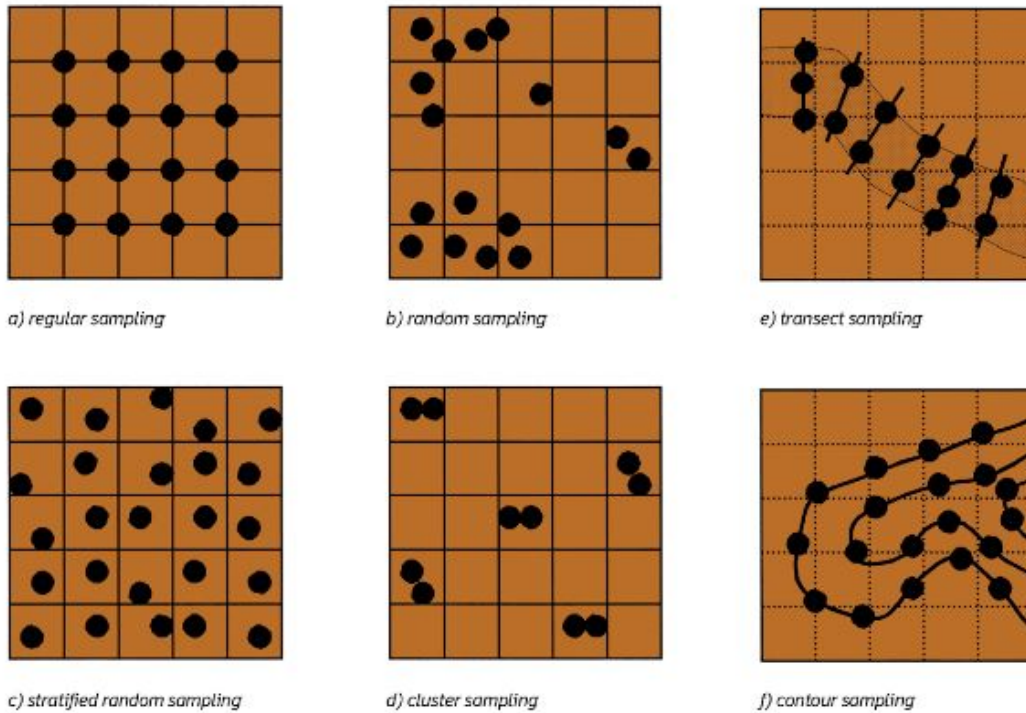
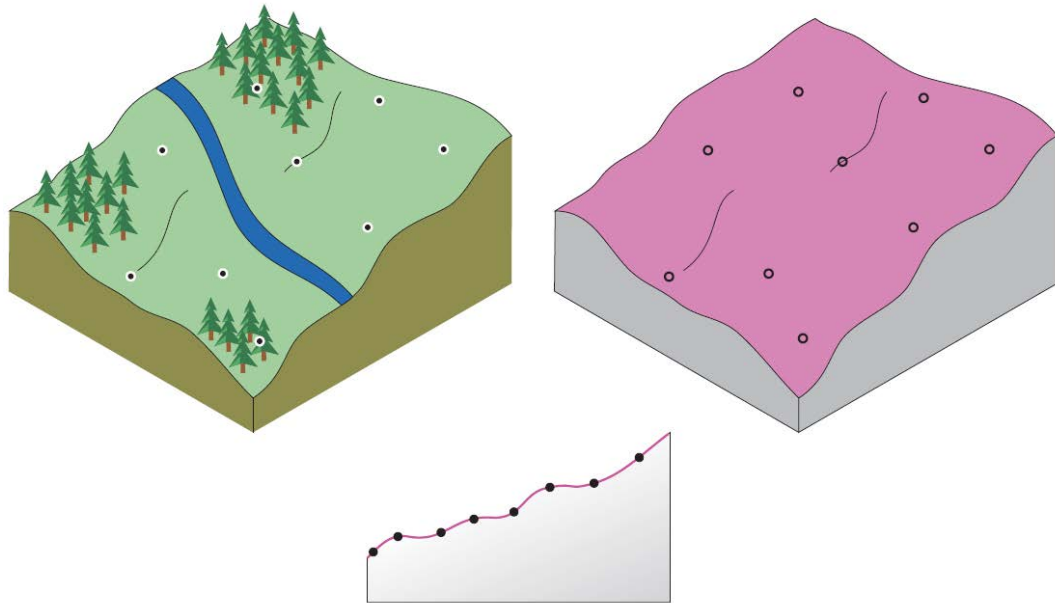


Figure 8.1 Different kinds of sampling net used to collect spatial data from point locations

Joonis 6. Geograafilistest punktidest ruumiliste andmete kogumisel kasutatavad jaotusmeetodid (Burrough jt., 2015).

## Lisa 10. Radial Basis Functions meetod



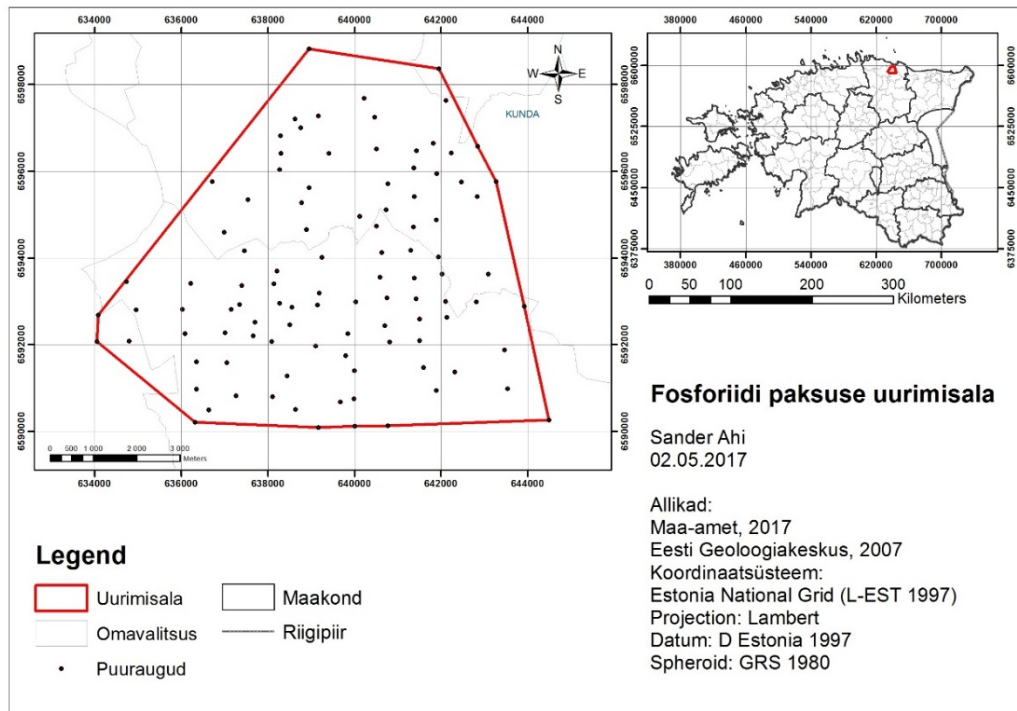
Joonis 7. RBF pinnalaotus (ESRI, 2001, 2003).

**Lisa 11. Keemilise muutlikkuse mudelite loomisel kasutatud meetodid**

<b>Keemiline komponent/element</b>	<b>Interpoleerimisel kasutatud meetod</b>	<b>Piksli suurus</b>	<b>Interpretatsioonipunktide arv</b>
Molübdeen	Kriging (ordinary)	30 × 30 m	2-5
Vanaadium	Natural Neighbour	30 × 30 m	-
Uraan	Kriging (ordinary)	30 × 30 m	12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Radial Basis Functions	35 × 35 m	10-15
MgO	Natural Neighbour	35 × 35 m	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Natural Neighbour	35 × 35 m	-

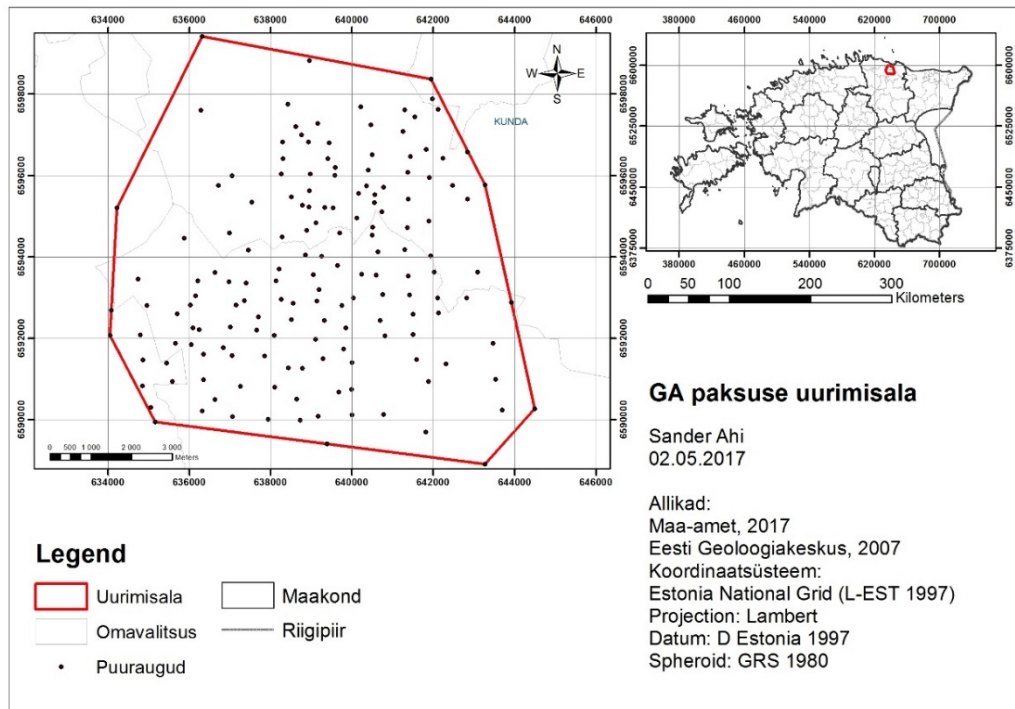
Tabel 4. Keemilise muutlikkuse mudelite loomisel kasutatud meetodid.

## Lisa 12. Fosforiidi paksuse mudeli ulatus



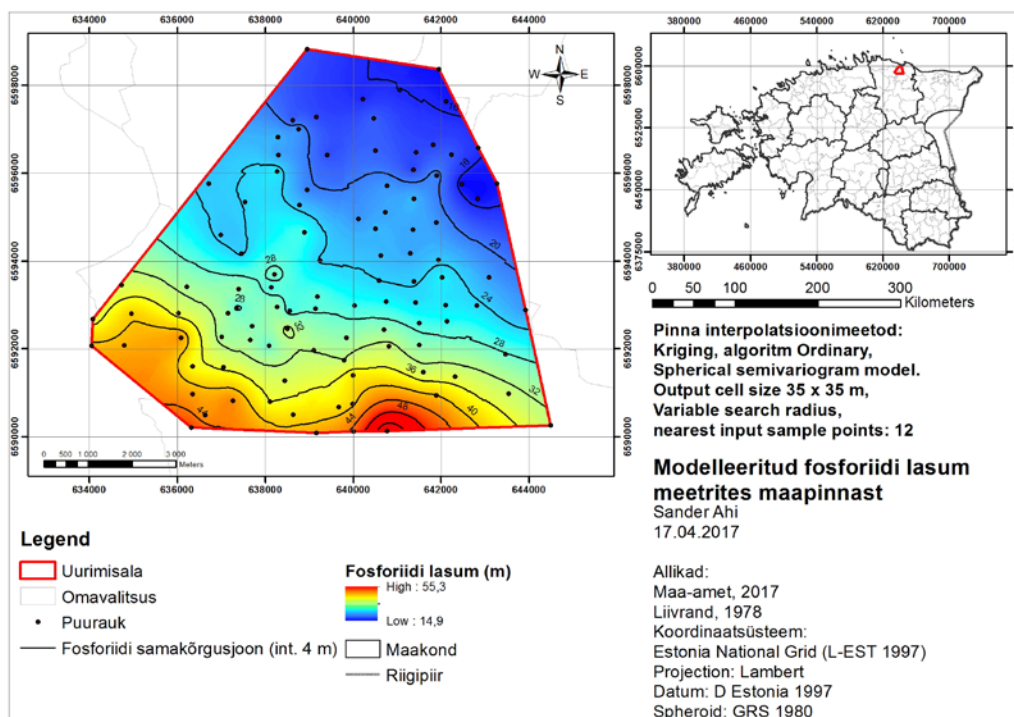
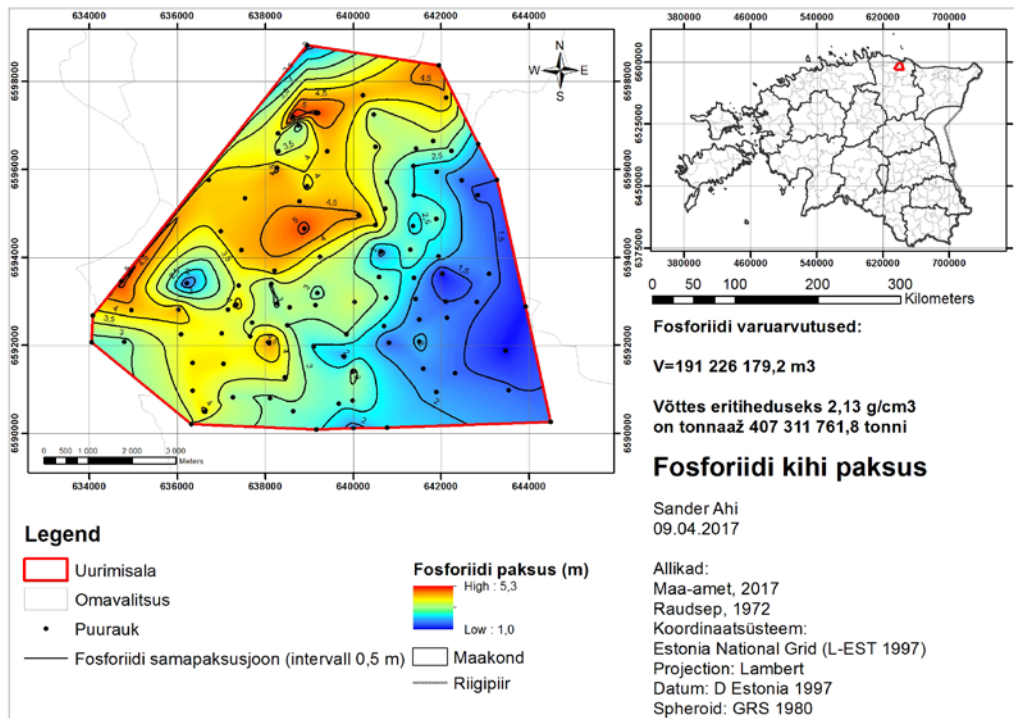
Joonis 8. Fosforiidikihi paksuse mudeli uurimisala.

### Lisa 13. Graptoliitargilliidi paksuse mudeli ulatus



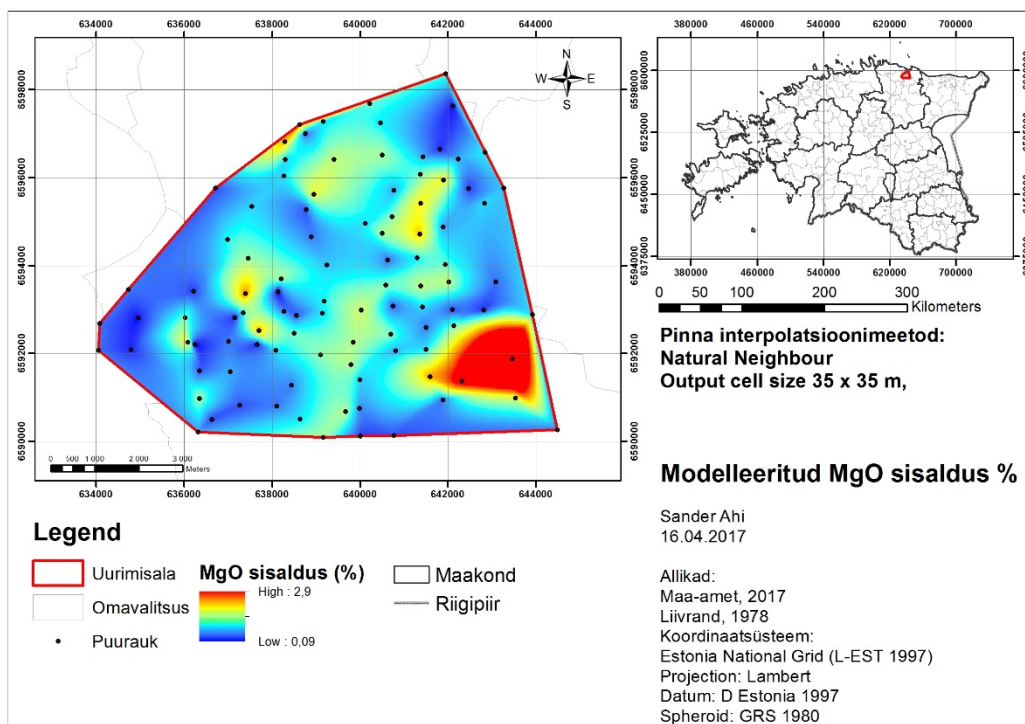
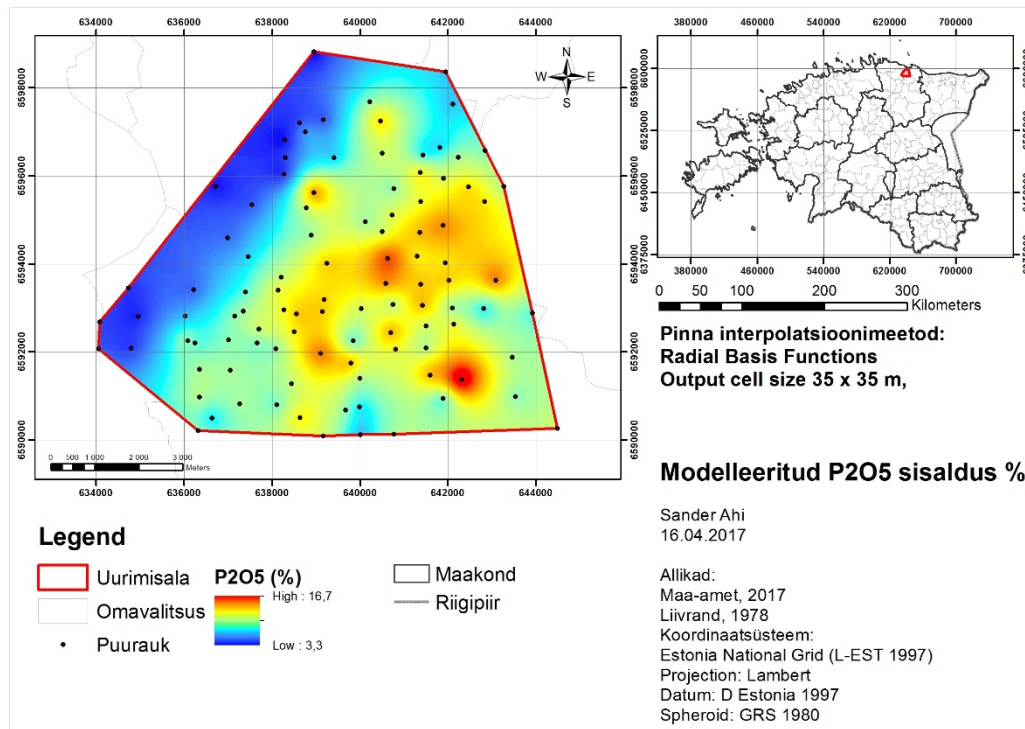
Joonis 9. Graptoliitargilliidi paksuse mudeli uurimisala.

## Lisa 14. Fosforiidi ruumilise leviku mudelid

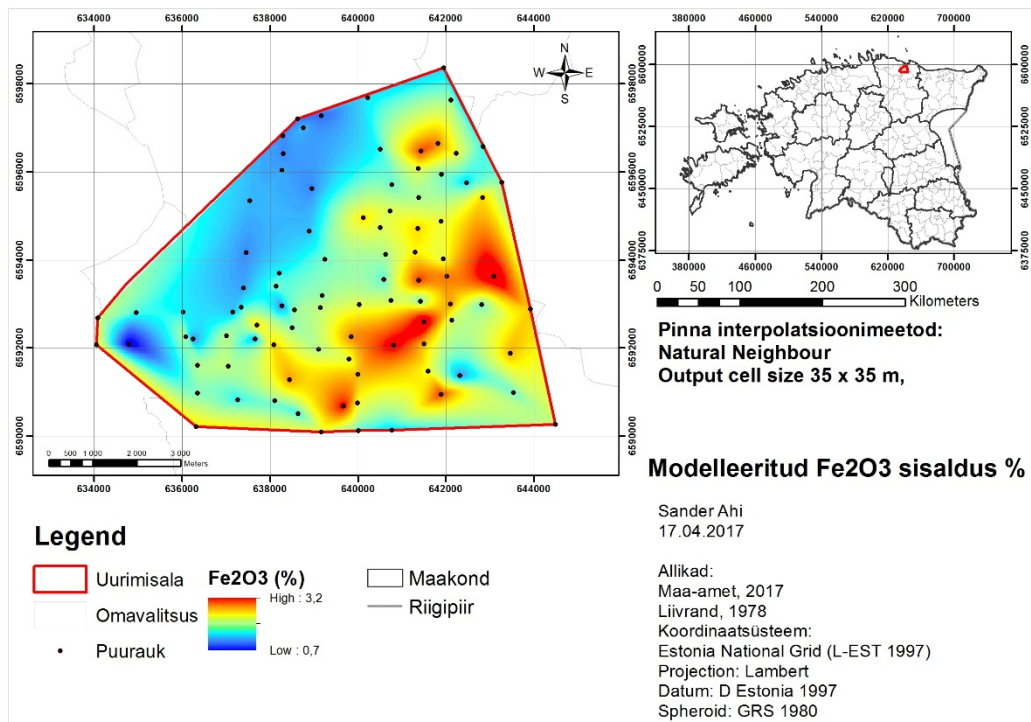


Joonis 10. Fosforiidi paksuse ja lasumi mudelid.

## Lisa 15. Fosforiidi keemilise muutlikkuse mudelid

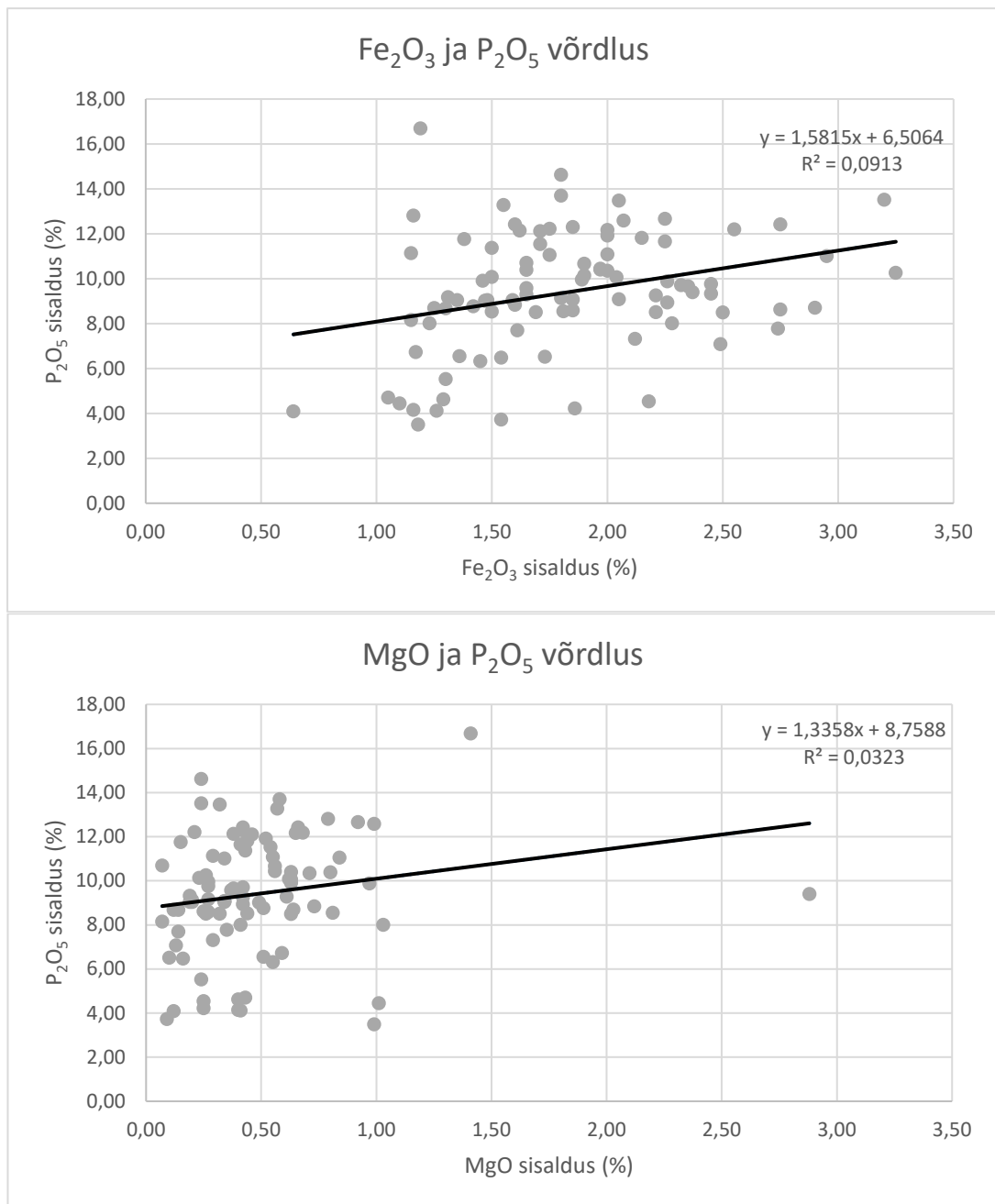






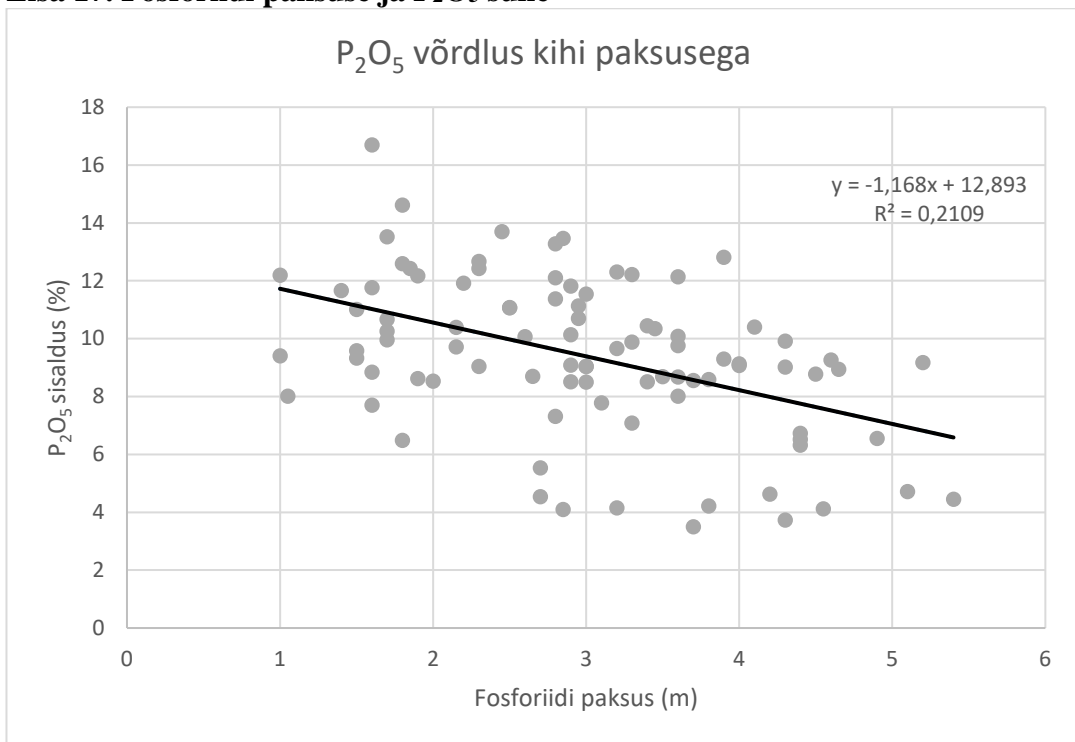
Joonis 11. Fosforiidi keemilise muutlikkuse mudelid.

## Lisa 16. Fosforiidi keemiliste ühendite sisalduste võrdlus



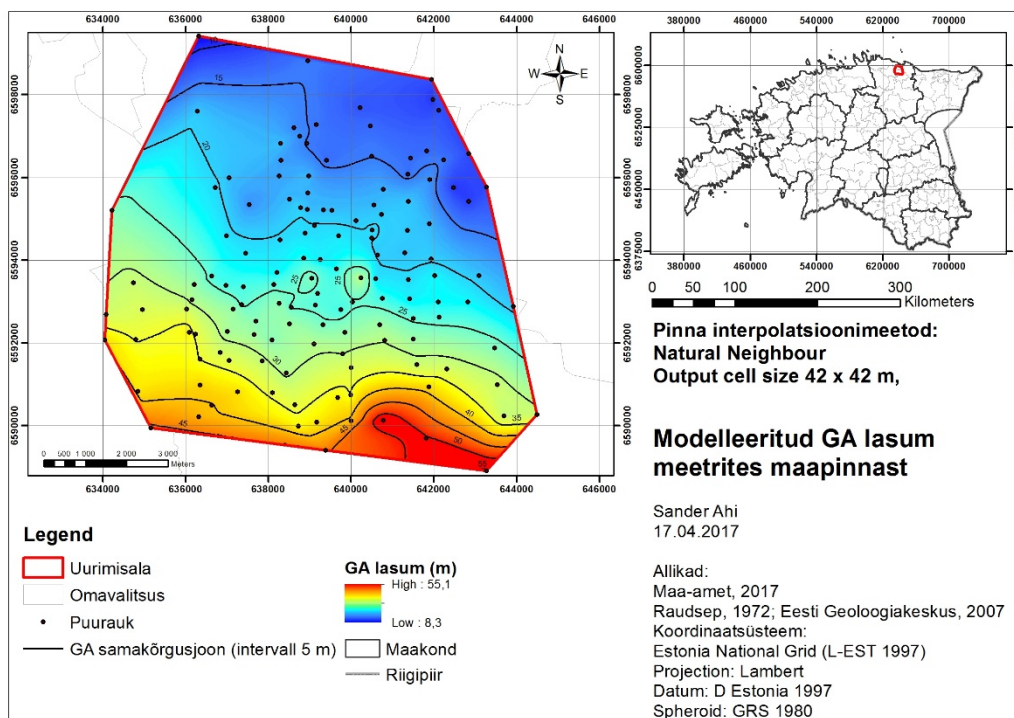
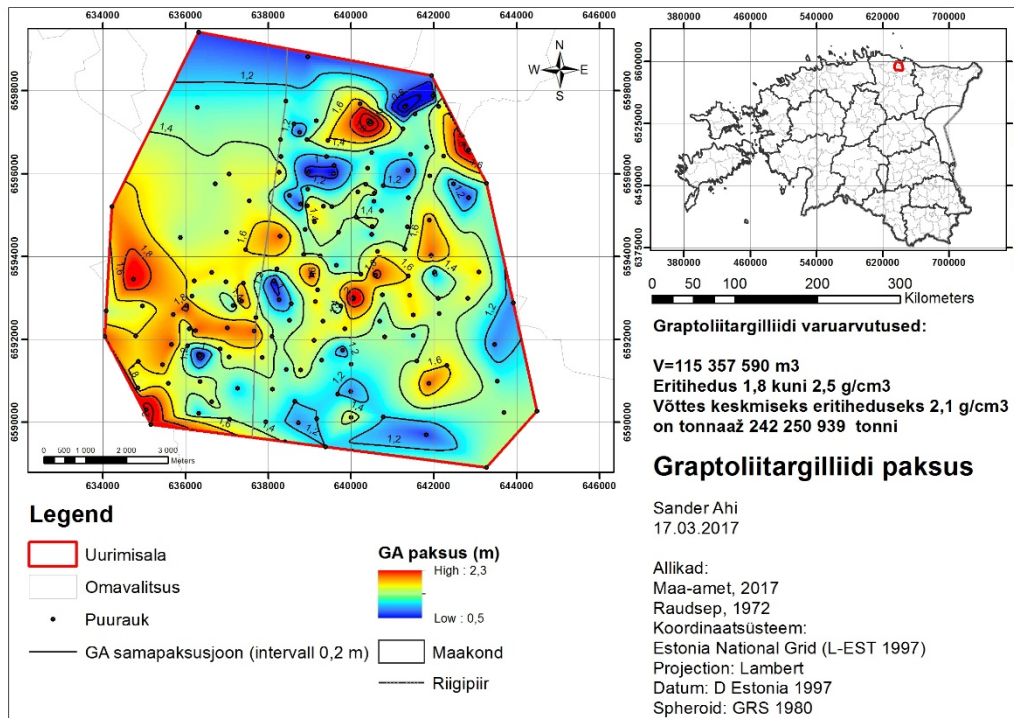
Joonis 12. Keemiliste ühendite sisalduste võrdlus.

**Lisa 17. Fosforiidi paksuse ja P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> suhe**



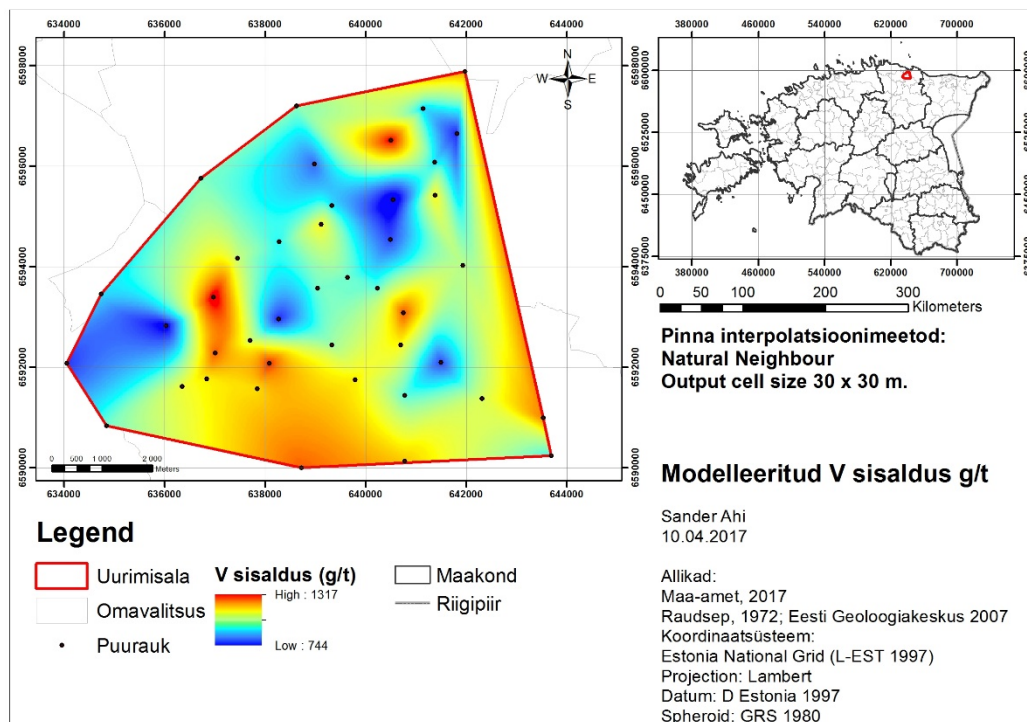
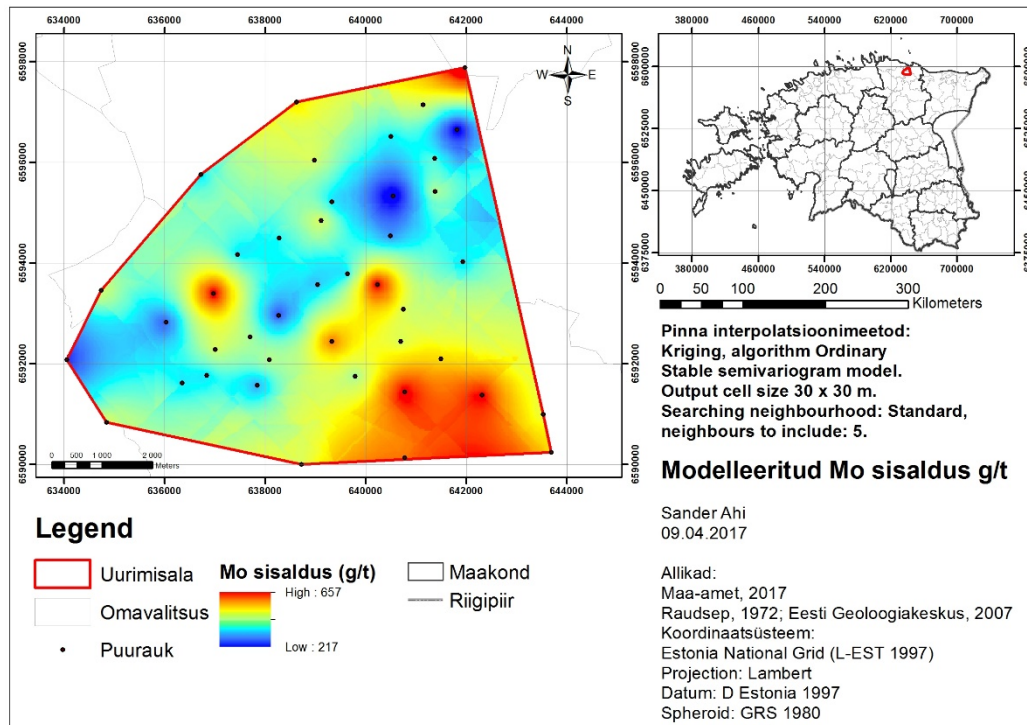
Joonis 13. Fosforiidi paksuse suurenemusega toimub üldjuhul P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kontsentratsiooni langus.

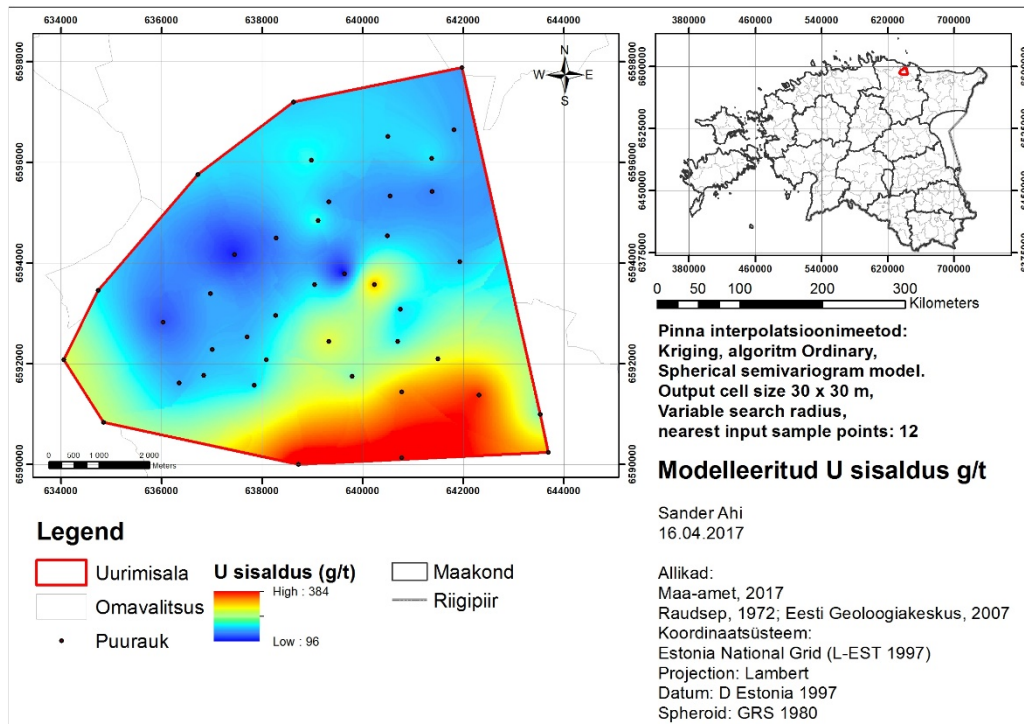
## Lisa 18. Graptoliitargilliidi ruumilise leviku mudelid



Joonis 14. Graptoliitargilliidi paksuse ja lasumi mudelid.

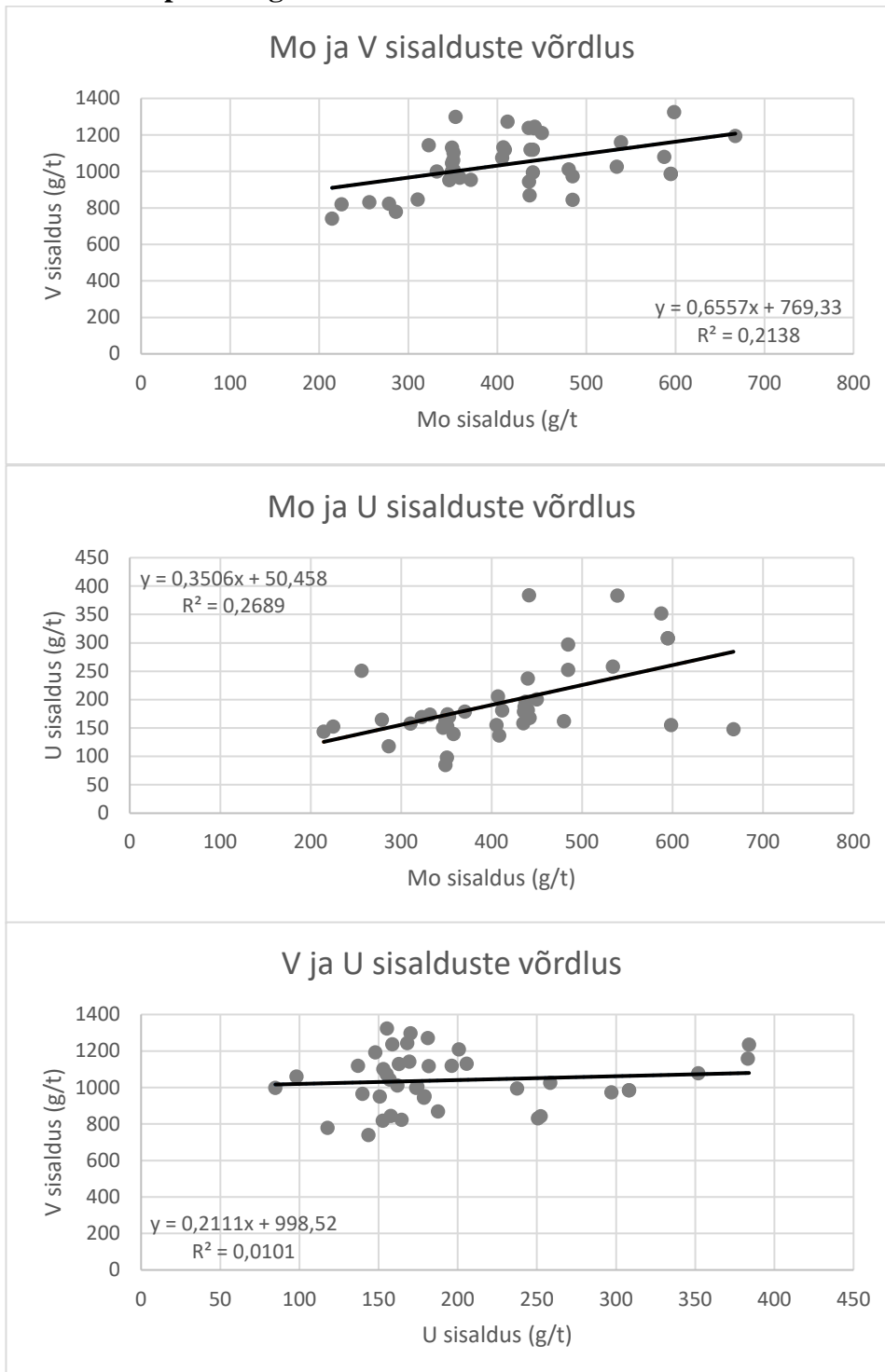
## Lisa 19. Graptoliitargilliidi keemilise muutlikkuse mudelid





Joonis 15. Graptoliitargilliidi keemilise muutlikkuse mudelid.

**Lisa 20. Graptoliitargilliidis leiduvate metallide sisalduste võrdlus**



Joonis 16. Haruldaste muldmetallide kontsentratsioonide võrdlus.