Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geoloogia osakond

Astrid Jõerand

Fosforiidikihindi mahukaalu määramine geofüüsikaliste meetoditega

Bakalaureusetöö 12 EAP

Juhendajad: Lauri Joosu, Siim Tarros ja Jüri Plado

Tartu 2025

Fosforiidikihindi mahukaalu määramine geofüüsikaliste meetoditega

Fosforiidi geoloogilistel uuringutel on üheks väljakutseks kivimite mahukaalu määramine, kuna nõrgalt tsementeerunud kivimi tõttu ei ole klassikalised laborimeetodid alati sobivad.

Käesoleva töö eesmärk oli hinnata fosforiidi ja selle kohal lasuvate kivimite mahukaalu gamma-gamma sondi andmete alusel ning võrrelda neid tulemusi laboratoorsete mõõtmistulemustega. Töö eesmärgiks oli hinnata geofüüsikalise meetofi kasutusvõimalusi fosforiidi geoloogilistel uuringutel. Analüüs tugineb nelja erineva puurkaevu/puuraugu sondiga mõõdetud andmetele ja laboratoorselt mõõdetud mahukaalu tulemustele.

Märksõnad: Geofüüsika, fosforiit, mahukaal

CERCS kood: P500 Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meregeoloogia

Determination of Bulk Density of the Phosphorite Layer Using Geophysical Methods

One of the challenges in geological studies of phosphotite is the determination of rock bulk density, as classical laboratory methods are not always suitable due to the weakly cemented nature of the rock.

The aim of this thesis was to estimate the bulk density of phosphorite and the overlying rocks using gamma-gamma log data and to compare the results with laboratory measurements. Another objective was to evaluate the potential for using geophysical methods in the geological study of phosphorite. The analysis is based on data from four different boreholes and bulk density values measured in the laboratory.

Keywords: Geophysics, phosphorite, bulk density

CERCS code: P500 Geophysics, physical oceanography, marine geology

Sisukord

1. Sissejuhatus 4

2. Geoloogiline taust 5

2.2 Laboratoorne mahukaalu mõõtmine 7

3. Gamma-gamma sond 8

3.1 Gamma-gamma karotaaži tööpõhimõte 9

3.3 Varasemad metoodika kasutused 10

4. Materjal ja metoodika 12

4.1 Andmete kogumine 13

4.2 Laboratoorsed analüüsid mahukaalu määramiseks 15

5. Tulemused ja arutelu 16

5.1 Manteltoru mõju gamma-gamma mõõtmistele puurkaevus PRK0073545 16

5.2 Parandi rakendamine teistes puuraukudes 17

6. Kokkuvõte 21

Tänuavaldused 23

Kasutatud materjalid 24

1. Sissejuhatus

Eestis on ühed Euroopa suuremad fosforiidivarud, mille võimalik kasutamine on taas muutunud aktuaalseks (Eesti Geoloogiateenistus, 2022). Fosforiiti kasutatakse peamiselt väetiste toorainena. Alates 2018 aastast teostab Eesti Geoloogiateenistus fosforiidiuuringud, et hinnata, kas Eesti fosforiidi kasutamine oleks majanduslikult otstarbekas.

Fosforiidi geoloogilistel uuringutel on mahukaalu määramine klassikaliste meetoditega keeruline, kuna kivim on nõrgalt tsementeerunud. Samas on mahukaalu määramine maavarauuringutes väga oluline, sest see võimaldab hinnata kasuliku komponendi massi. Teisisõnu: mida suurem on maavara mahukaal seda rohkem väärtuslikku tooret on võimalik samast ruumalaast saada.

Üks võimalus mahukaalu hindamiseks on kasutades gamma-gamma sondi, mis sisaldab tehislikku gammakiirgusallikat. Sellel seadmel on gammakiirgust emiteeriv allikas ja detektor, mis mõõdab kivimist tagasi peegeldunud kiirgust. Mida rohkem kiirgust jõuab detektorisse, seda suurema mahukaaluga on ümbritsev kivim.

Käesoleva töö peamine eesmärk on hinnata fosforiidi ja selle kohal lasuvate kivimite mahukaalu geofüüsikaliste meetodite abil ning võrrelda tulemusi laboratoorsete mõõtmistega.

2. Geoloogiline taust

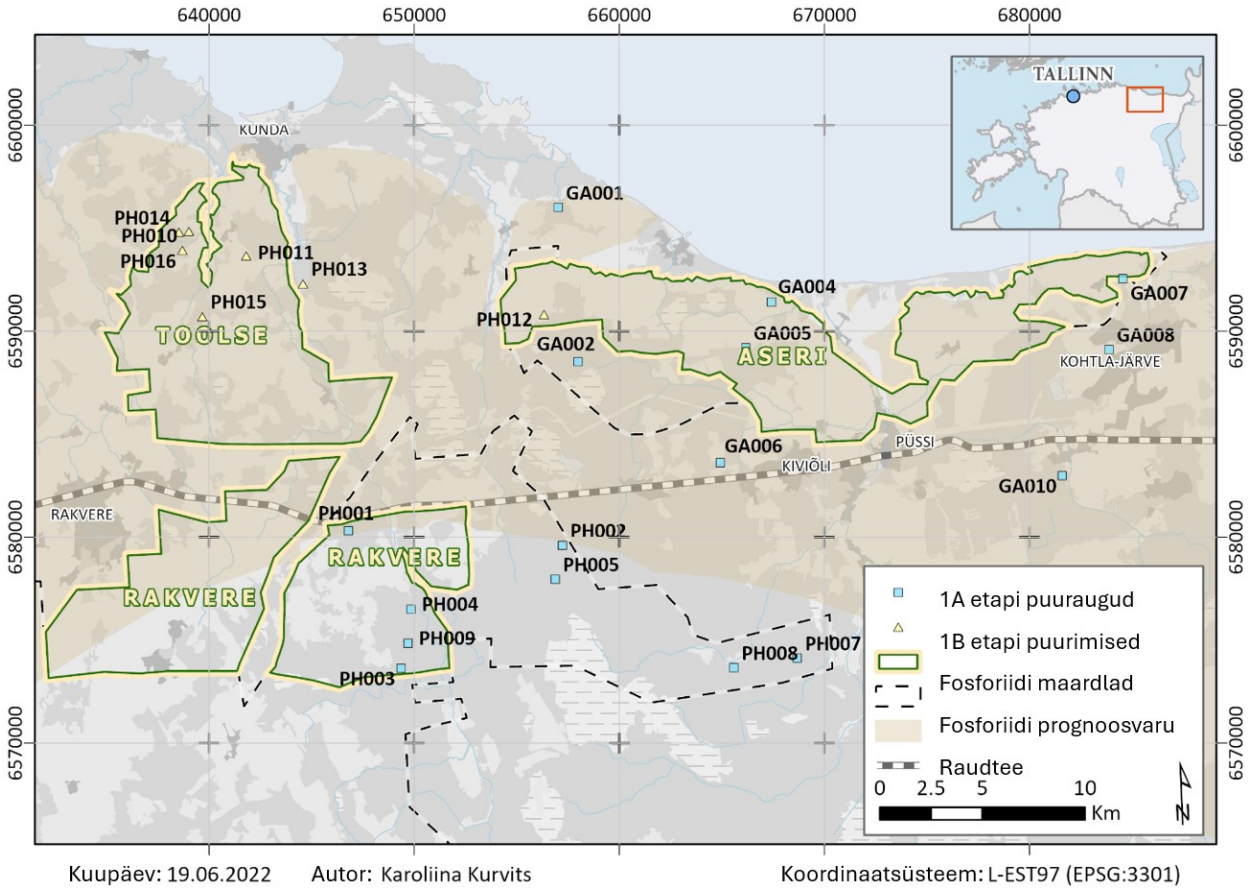
Eesti asub Balti kilbi lõunapoolsel mattunud alal. Kristalset aluskorda katavad Ediacara kuni Devoni ladestu settekivimid, mille paksus on 100–800 meetrit (Raudsep, 2008). Kristalne aluskord, mis on tekkinud Proterosoikumis, koosneb moonde- ja süvakivimitest ning rabakivigraniitidest (Raukas & Teedumäe, 1997). Ediacara, Kambriumi ja Devoni ajastute settekivimite koosseisu kuuluvad liivakivid ja savi (Raudsep, 2008). Lubjakivi, dolokivi ja merglit leidub Ordoviitsiumis ja Siluris (Raudsep, 2008). Samuti katavad jääajal ja pärast seda tekkinud Kvaternaari setted aluspõhja (Raudsep, 2008).

Fosforiit esineb Põhja-Eestis Kallavere kihistus, mis asub Ordoviitsiumi ja Kambriumi piiril (Raukas & Teedumäe, 1997). Kallavere kihistu moodustavad heledavärvilised kuni tumehallid, nõrgalt kuni keskmiselt tsementeerunud peened kvartsliivad (Bauert et al., 2020). Need sisaldavad fosfaatseid lukuta brahheopoodide kodasid (Bauert et al., 2020). Fosforiit on tekkinud 480–490 miljonit aastat tagasi Paleobalti meres, Furongi–Tremadoci ajastul (Bauert et al., 2020).

Eesti fosforiit on settekivim, mille P_2O_5 sisaldus ületab 3% (Petersell, 2015). Eesti fosforiidi peamised mineraalid on kvarts ja biogeenne fosfaat (Raukas & Teedumäe, 1997). See koosneb lingulaatide ehk brahhiopoodide kodadest ja kojatükkidest, mille fosforisisaldus on 35–37% (fluorapatiit), kuid kogu fosforikihil aga 6–20% (Raukas & Teedumäe, 1997).

Eesti fosforiidimaardlate kaadmiumi, uraani ja strontsiumi sisaldus on madal või mõõdukas, mis suurendab fosforiidi potentsiaalset väärtust (Paat et al., 2021) ning sobib hästi väetiste tootmiseks (Eesti Geoloogiateenistus, 2022).

Kallavere kihistu levib suurel osal Eestist, kuid peamised fosforiidi maardlad on koondunud Kirde-Eestisse (joonis 1). Sealne fosforiidi kihi paksus on 1–12 meetrit ja lasub 5–200 meetri sügavusel. (Raukas & Teedumäe, 1997)



Joonis 1. Eesti fosforiidi maardlad (muudetud 24.05. 2025, Joosu et al., 2023)

Fosforiit võib tekkida nii magmaliselt kui ka setteliselt (Pufahl & Groat, 2017). Magmakivimilised fosforiidid on levinud just karbonaatsete kivimitega. Magmakivimiline fosforiit sisaldab tüüpiliselt 5–15% P_2O_5-te. Setteline fosforiit sisaldab aga 18–35% fosforit. Setteline fosforiit tekib mandriliste kivimite lagunemisel, mis liigub ookeani peamiselt jõgede kaudu (Pufahl & Groat, 2017).

Fosfor on elusloodus jaoks asendamatu element ja geoloogilises ajaskaalas bioproduktsiooni piirav (Schoumans et al., 2015). Enamik kaevandatud fosforiiti on settelist päritolu (Schoumans et al., 2015) ning kasutatakse väetise tootmises (Cordell et al., 2009). Euroopa Liit on fosfori nimetanud kriitiliseks toormeks, eelkõige selle olulisuse tõttu põllumajandusele (Eesti Geoloogiateenistus, 2022). Hetkel on Euroopas vaid üks toimiv fosforiidi kaevandus – Siilinjärvi Soomes.

Eestis fosforiiti hetkel ei kaevandata, kuid käivad uuringud võimalikuks kaevandamiseks tulevikus. Fosforiidi uuringuid teeb 2018 –2025 Eesti Geoloogiateenistus. Esialgu tegeleti andmete kontrollimise ja korrastamisega, seejärel keskenduti majanduslikele ja väärindamise võimalustele ning samuti põhjaveele ja keskkonnamõjudele. (Eesti Geoloogiateenistus, 2024)

2.2 Laboratoorne mahukaalu mõõtmine

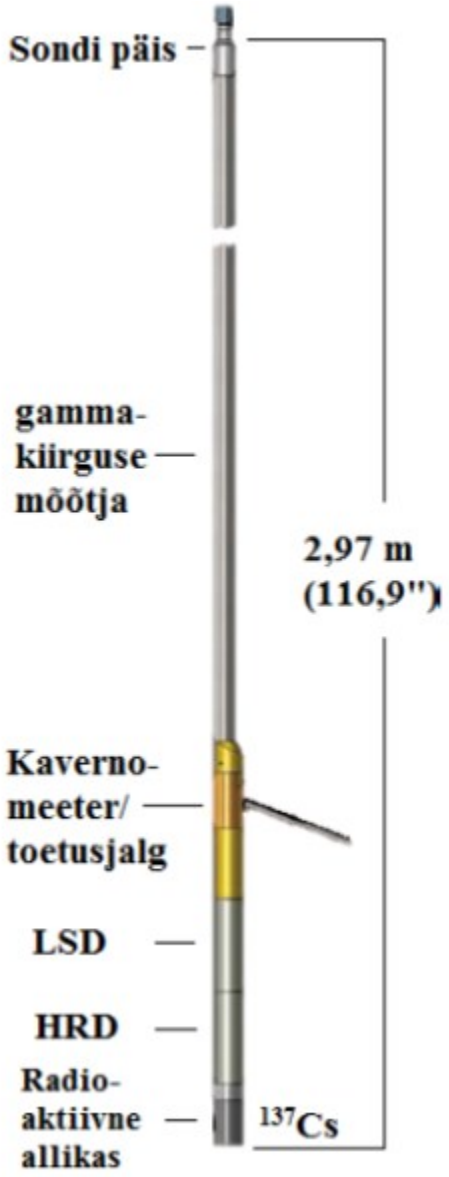
Kallavere kihistu liivakivid on väga nõrgalt tsementeerunud (Joosu et al., 2023). Üksikud mõõtetulemused näitavad, et ühetelgne survetugevus jääb alla 7 MPa, keskmisena 3 MPa (Talpsep et al., 2021).

Sageli on probleemiks, et kivim pudeneb enne, kui on võimalik mahukaalu mõõtmine teostada, ning osad intervallid on purunenud juba puurtoru sees. Sellest tulenevalt ei ole võimalik mahukaalu mõõta. Klassikalise mõõtmise puhul lõigatakse südamikust minimaalselt 10 cm pikkune silinder. Silindri ruumala mõõdetakse, proov kuivatatakse ja kaalutakse. Pärast kaalumist on võimalik välja arvutada kuivmahukaal. Käesoleva töö raames uurime, kas gamma-gamma karotaaži abil on võimalik Eestis kivimi (fosforiidi) kuivmahukaalu hinnata. Fosforiidi puhul teeb mõõtmise keerukaks asjaolu, et need tuleb teostada manteltoru sees. (Joosu et al., 2023)

Manteltoru on vajalik, et puurauk kokku ei variseks, kuid samas segab manteltoru mõõtmist. Hiljem on mõõtmistulemustele vajalikud täiendavad ümberarvutused, sest manteltoru ja selle taga olev tsement ja/või tühimikud võivad muuta mõõdetud mahukaalu tulemused väiksemaks või suuremaks tegelikkusest (Chatfield et al., 2009).

3. Gamma-gamma sond

Gamma-gamma sond ehk tiheduse sond kasutab radioaktiivset allikat ^{137}Cs, mille nominaalne aktiivsus on 3,7 GBq (Robertson-Geo, 2021). Sondi kasutatakse moodustiste/kehade kogutiheduse määramiseks puuraugus (Chatfield, 2014).



Joonis 2. Gamma-gamma sond (Robertson-Geo, 2021).

Reobertson-Geo firma sond on 2,97 meetrit pikk, selle diameeter on 51 mm ning see kaalub 21 kg. Sondiga on võimalik mõõta temperatuuridel vahemikus 0–70°C. Kavernomeetri mõõtevahemik on 50–300 mm, kalibreeritud tiheduse mõõtevahemik 1,1–2,95 g/cm³. (Robertson-Geo, 2021)

U.S. Environmental Protection Agency (2024) andmetel võimaldavad tera- ja vedeliku tiheduse andmed koos arvutada ka kivimikehade poorsust. Sond kasutab gammakiirgust, mida ebastabiilsed isotoobid radioaktiivse lagunemise ajal eraldavad. Gammakiired on väga head materjalist läbitungijad. Selle tõttu saab tihedust mõõta ka puuraukudes, mis on vee või mudaga täitunud ja toestatud nPCV (plastifitseerimata polüvinüülkloriid) või terasest torudega. Siiski just ilma manteltoruta puuraukudest saab parimaid uuringutulemusi. (U.S. Environmental Protection Agency, 2024)

Chatfieldi (2009) sõnul on heades puuraugu tingimustes gamma-gamma sondiga mahukaalu mõõtmine täpne võrreldes klassikaliste meetoditega.. Kuid varisemisohtlikud, läbimõõdu muutustega (kavernidega), kõrge loodusliku gammakiirgusega kivimid, vedelikutaseme erinevustega puuraugud vähendavad mõõtmiste täpsust. Sellisel juhul tuleks parandit kasutades mõõtmistulemused kompenseerida, sõltuvalt kas tulemused on üle- või alahinnatud. (Chatfield et al., 2009)

3.1 Gamma-gamma karotaaži tööpõhimõte

Gammakiirgus emiteeritakse sondist ja see tungib puuraugu ümber olevatesse kivimitesse (Chatfield, 2014). Kivimites põrkub kiirgus sealsete elektronidega, mille tulemusel gammakiirgus hajub ja selle energia väheneb (Robertson-Geo, 2021). Seda nähtust nimetatakse Comptoni efektiks (Rider et al., 2011). Comptoni hajumise puhul kaotavad gammakiired osa oma energiast ja muudavad suunda, kui nad põrkuvad kivimikihi elektronidega (Rider et al., 2011).

Sondi külge kinnitatud gammakiirguse allikas aktiveerib kivimeid umbes 15 cm raadiuses puuraugu seinast. Sondis olevad detektorid mõõdavad hajunud gammakiirte hulka, mis sõltub kivimite elektrontihedusest. (Rider et al., 2011)

Kui gammakiir tabab gamma-detektorites kasutatavat kristalli, näiteks naatrium- või tseesiumjodiidi kristalli (U.S. Environmental Protection Agency, 2024), tekitab see valgussähvatuse, mis muundatakse elektriliseks impulsiks (Chatfield, 2014). Sondis olev mikroprotsessor loendab kõik impulsid, mis ületavad 60 keV energia (Chatfield, 2014).

Puuraukude seinad on sageli ebaühtlased või neile võib olla ladestunud puurmuda, mis võib mõjutada mõõtmistulemusi ja muuta kivimi näivat tihedust. Seetõttu on tihedussondides tavaliselt

kaks kuni kolm erinevat detektorit. Standardlahenduses kasutatakse kahte detektorit: üks on mõeldud tiheduse mõõtmiseks pikema vahemaa pealt (LSD – long spaced density) ja teine suurema eraldusvõimega mõõtmiseks (HRD – high resolution density). LSD-sensor annab täpsema hinnangu homogeense kivimi tihedusele, kuid kihipiiride eraldusvõime on madalam. HRD-sensor võimaldab paremini tuvastada peenemaid kihte, kuid on tundlikum puuraugu defektide suhtes (Robertson-Geo, 2021).

Kahe detektoriga sonde nimetatakse kompenseeritud sondideks (U.S. Environmental Protection Agency, 2024). Need võrdlevad mõlema detektori andmeid ja määravad kivimi tiheduse (U.S. Environmental Protection Agency, 2024). Detektoritega mõõdetud elektrontiheduse põhjal saab logija hinnata kivimi tihedust, sest elektronide arvu kaudu saab järeldada nukleonite (prootonite ja neutronite) kontsentratsiooni (Chatfield, 2014). See kontsentratsioon on suurem just tihedamates kivimites (Chatfield, 2014).

Rider et al. (2011) märgib, et mida vähem gammakiirgust jõuab detektoriteni tagasi, seda tugevam on hajumine ja seda suurem on kivimi elektrontihedus. Registeeritav kiirgushulk on pöördvõrdeline kivimi tihedusega, sest kivimi elektrontihedus on seotud selle eritihedusega. Seega näitab väiksem tagasipeegeldunud kiirguse hulk tihedamat kivimit. (Rider et al., 2011)

Tiheduse sondi kasutusjuhendis (Robertson-Geo, 2021) rõhutatakse, et need gammakiirguse mõõtmised annavad kvalitatiivseid tulemusi. Kui on vaja täpsemaid kvantitatiivseid näite, saab sondi kalibreerida tööstusstandardi ühikutesse, näiteks g/cm³ või kg/m³. Eesti Geoloogiateenistuses kasutusel olevat sondi kalibreeritakse kahe standardi järgi – alumiinium ja vesi. (Robertson-Geo, 2021)

3.3 Varasemad metoodika kasutused

Esimene gamma-gamma sond kommerts kasutuseks mõeldud sond tuli turule juba 1950ndate keskpaigas Lane-Wells Company poolt (Labo, 1987).

Chatfield et al. (2009) järgi on sarnast metoodikat katsetatud 2008. aastal Namiibias, Skorpioni nime kandvas tsinkoksiidi avakaevanduses. Tavaliselt kasutatakse seal mahukaalu mõõtmiseks puursüdamike proove ja Archimedese meetodit. See klassikaline mahukaalu määramise meetod tekitas aga labori andmete kvaliteedikontrolli käigus kahtlusi. Antud uuringu eesmärgiks oli

parandada kaevandusmahu prognooside täpsust kasutades alternatiivseid tiheduse mõõtmise meetodeid. Selleks rakendati mitmeid geofüüsikalisi meetodeid sealhulgas gamma-gamma tiheduse sondi, fotoelektrilist tihedusandurit ja optilist kaamerat. Skorpioni kaevanduse puuraukude andmetes oli gamma-gamma meetodiga mõõtmise üldine täpsus hea, kuid teatud probleemid, näiteks puuraugu seinte varingud ja kuivad puuraugud, põhjustasid siiski ebatäpsusi. Mõjude vähendamiseks kasutati täiendavaid geofüüsikalisi logisid ja rakendati kompensatsioonialgoritme. Katse autorid järeldasid, et seda meetodit võiks potentsiaalselt kasutada ka teistes maardlates, kus traditsiooniline tiheduse määramine puursüdamikest ei anna usaldusväärseid tulemusi või on keeruline. (Chatfield et al., 2009)

4. Materjal ja metoodika

Käesoelvas töös kasutatakse nelja erineva puurkaevu/puuraugu sondeerimise andmeid ja kolme puuraugu laboratoorselt mõõdetud mahukaalu andmeid. Puurkaevude sondeerimistel on läbivalt kasutatud samu seadmeid ja metoodikat. Lõputöö koostamiseks saadi analüüsiks kasutatavad toorandmed Eesti Geoloogiateenistuselt.

Puuraukude ja -kaevude konstruktsioonid on erinevad. EGT0032 ja EGT0033 puhul on tegemist südamikpuurimise puuraukudega, PH001 on samuti südamikpuurimise puurauk, aga on ehitatud ümber puurkaevuks. EGT Arbavere uurimiskeskuses asub puurkaev PRK0073545. Puurkaevude info pärineb Eesti Looduse infosüsteemist ja puuraukude andmed Eesti Geoloogiatenistuselt.

Tabel 1. Puuraukude/Puurkaevude informatsioon.

Puurauk/ puurkaev	Sügavus (m)	Koordinaadid X; Y (L-EST97)	Toru materjal	Märkused
EGT0032*	28,0	640542.3 6593041	Teras (PQ-tüüpi puurtoru)	Mõõtmised kohe pärast puurimist, torud 3 m ja ühendatud keermetega
EGT0033*	28,3	640545.8 6593034	Teras (PQ-tüüpi puurtoru)	Mõõtmised kohe pärast puurimist, torud 3 m ja ühendatud keermetega
PH001**	89,5	6580307 646796	0-57,0 m:Teras, 57,0-61,0 m: Teras + PVC, 61,0-89,5 m: PVC	Terastoru tagune tsementeeritud, et vältida veekihtide segunemist
PRK0073545**	87,0	6590338 612473	0-59,0 m: Teras, 59,0-77,0 m: Roostevaba terasest pilufilter, 77,0-87,0 m: Roostevaba teras	Terastoru tagune tsementeeritud, et vältida veekihtide segunemist

*Eesti Geoloogiateenistus

**Eesti Looduse infosüsteem

4.1 Andmete kogumine

Uurimistöö raames sondeeriti gamma-gamma sondiga Eesti Geoloogiateenistuse Arbavere hüdrogeoloogia õppeväljakul paiknevat puurkaevu PRK0073545 (ehitatud 2024, sügavus 87 meetrit (tabel 1)) sondeerimine viidi läbi 18. märts 2025. Sama puurkaevu PRK0073545 kohta on varasemalt olemas gamma-gamma sondiga mõõdetud väärtused ilma manteltoruta. Uurimustöö jaoks oli vaja lisaks manteltoruga tiheduse andmeid võrdluseks, et saaks hiljem leida manteltoru mõju tiheduse andmetele. Mõõtmisteks kasutati Eesti Geoloogiateenistusele kuuluvat Robertson-Geo firma sondi. Kuna sondi üks osa on kiirgusallikas siis kalibreerimise ja sondi käsitlemise teostas Siim Tarros, kes on vastava väljaõppe saanud kiirgustöötaja.

Enne mõõtmisi kalibreeriti sond kahe standardi suhtes. Kalibreeriti mõlemad tiheduse andurid LSD ja HRD alumiiniumi ja vee suhtes. Seejärel hakati sondeerima puurkaevu. Mõõtmised toimusid alt üles kiirusega 4m/min, mõõtesagedusega 1 cm.

Joonis 3. Gamma-gamma sondi kalibreerimine Arbaveres

Sond lasti puurauku selleks mõeldud vintsiga. Süsteemiga ühendati arvuti, mis võimaldas jooksvalt jälgida sondi sügavust ja mõõtetulemusi. Puuraugu kohale paigaldati kolmjalg alus, mida mööda tross stabiilselt liikuda saab ja mis hoiab sondi paigas. Kui sond on puuraugus, siis mõõdeti täpselt sondi alguspunkt maapinnast ja pandi arvutisse vastavasse programmi. Vintsi kiirust kontrolliti juhtkarbist, et see oleks ühtlane (4,0 m/min) kogu mõõtmise ulatuses, mis tehti suunaga altpoolt ülesse.

Välitööde raames sondeeriti puurauku kuni filtrini, mis algas 54,4 meetri sügavuselt. Filtrisse ei õnnestunutud sondi lasta, vaatamata korduvatele proovimistele. Selle põhjustas tõenäoliselt asjaolu, et filtri diameeter on natuke väiksem kui manteltorul ja puurkaev ei ole ideaalselt vertikaalne. Seetõttu sondi ots toetub vastu filtri ülemist serva ning sügavamale ei ole seda võimalik langetada.

Joonis 4. Arbaveres puurkaevu PRK0073545 sondeerimine

Lõputöös kasutati lisaks ise mõõdetud tulemustele ka EGT sondeerimise andmeid puuraukudest EGT0032, EGT0033 ja puurkaevust PH001. Gamma-gamma sondi andmed uuringupuuraugust PH001 on kogutud, siis kui see on ümberehitatud puurkaevuks. Andmeid analüüsisiti samade puuraukude laboris mõõdetud tulemustega.

4.2 Laboratoorsed analüüsid mahukaalu määramiseks

Lõputöö analüüsis kasutati Eesti Geoloogiateenistuse varem mõõdetud andmeid. Mahukaalu määramiseks lõigati puursüdamikust vähemalt 10 cm pikkune tükk. Sellelt mõõdeti pikkus ja läbimõõt, et arvutada ruumala. Seejärel kuivatati proov 12 tundi temperatuuril 105 °C ja kaaluti. Kuiva massi ja ruumala põhjal arvutati proovide kuivmahukaal.

Puuraukude andmete analüüsimiseks kasutati Microsoft Exceli tabelitöötlusprogrammi. Võrreldi sondeeritud andmeid puurkaevust PRK0073545, kus ei olnud puurtoru, ning välitöödel mõõdetud andmeid, kus kaevus oli metallist manteltoru. Andmeid võrreldi 10 cm või suuremate lõikude kaupa, arvutades keskmised väärtused ning määrates puurtoru mõju ehk paranduse vastavas puuraugus. Parandus leiti erinevate kivimitüüpide kaupa: karbonaatkivimi, glaukoniitliivakivi ja graptoliitargilliidi kohta.

Leitud parandust rakendati esialgu ka puurkaevule PH001, kasutades sama mõõdistusskeemi ja vahemaid nagu laboriandmete puhul. Manteltoru mõju kompenseerimiseks lahutati sondiga mõõdetud LSD-tiheduse väärtusest eelnevalt leitud parandus. Tähelepanu pöörati kivimitüüpide erinevusele, kuna parandused arvutati just karbonaatkivimi, glaukoniitliivakivi ja graptoliitargilliidi jaoks. Fosforiidikihile eraldiseisvalt parandust ei arvutatud, sest välitööde käigus ei jõutud selle kihini mõõtmisteni. Selle asemel arvutati kogu puurtoru keskmine mõju ning seda rakendati fosforiidile.

Sama protseduur viidi läbi ka puuraukude EGT0032 ja EGT0033 andmete puhul.

5. Tulemused ja arutelu

5.1 Manteltoru mõju gamma-gamma mõõtmistele puurkaevus PRK0073545

Puurtoru mõju mõõtmistulemustele hinnati, võrreldes andmeid, mis olid kogutud lahtisest puuraugust enne selle puurkaevuks ehitamist, ning andmeid, mis koguti käesoleva uurimistöö käigus. Selleks võrreldi LSD-tiheduse väärtusi, kuna need on vähem tundlikud manteltoru mõjule. Tulemusi analüüsiti kivimigrupi kaupa.

Kuna puurimise metoodikast tulenevalt ei olnud võimalik eristada üksikuid kihistuid, jagati läbilõige kolmeks osaks: (i) karbonaatsed kivimid, (ii) Leetse kihistu glaukoniitne liivakivi (iii) Türisalu kihistu graptoliitargilliit.Lamavaid kivimikihte (sealhulgas fosforiit) ei olnud võimalik mõõta, kuna sondi ei õnnestunud viia filtrisse.

Mõõtmistulemused keskmistati kivimigruppide lõikes, et vähendada juhuslike lokaalsete anomaaliate, näiteks kivimites esinevate lõhede mõju. Tulemused on esitatud tabelis 1.

Tabel 2. PRK0073545 manteltoru mõjuVahemaa (m)	Kivim	Mahukaal manteltorus (g/cm^3)	Mahukaal ilma manteltoruta (g/cm^3)	Mahukaalude erinevus (g/cm^3)
8,50-49,00	Lubjakivi	2,57	2,30	0,27
49,01-51,50	Glaukoniitliivakivi	2,40	2,10	0,30
51,51-54,40	Graptoliitargilliit	2,21	1,99	0,22

Tulemused näitavad, et manteltoru mõju on kõige suurem glaukoniitliivakivi puhul, kus mahukaal on 0,30 g/cm^3 võrra suurem võrreldes mõõtmistega ilma manteltoruta. Kõige väikseim mõju esineb graptoliitargiliidi kihis, kus erinevused on 0,22 g/cm^3. Sellise erinevuse põhjused ei ole üheselt selged. Võimalik, et manteltoru mõju on seotud tsemendi paksusega manteltoru ja kivimi vahel.

Kuna antud puurkaevust ei olnud võimalik kivimi mahukaalu otse mõõta, siis võrreldi manteltoruta saadud väärtusi Joosu et al. (2023) andmetega. Selles uuringus olid keskmised kuivmahu kaalud

järgmised: lubjakivi 2,41 g/cm^3, glaukoniitliivakivi 2,18 g/cm^3 ja graptoliitargilliit 1,81 g/cm^3 (Joosu et al, 2023). Sellest võib järeldada, et geofüüsikaliste mõõtmistega, ilma manteltoruta otse kivimist saadud tulemused, on kooskõlas varasemalt teada laboratoorselt mõõdetud tulemustega.

Kuna tehniliste probleemide tõttu ei olnud võimalik sondiga fosforiidikihis mõõtmisi teha, kasutati fosforiidikihi tiheduse parandina järmistes arvutustes puuraugu keskmist väärtust, milleks on 0,264 g/cm3.

5.2 Parandi rakendamine teistes puuraukudes

Puurkaevust PRK0073545 leitud puurtoru mõju tihedusele rakendati PH001, EGT0032 ja EGT0033 mõõtmistulemustele (tabel 2). Selleks lahutati eelnevalt arvutatud manteltoru mõju (tabel 2: Mahukaalude erinevus) puuraukudest mõõdetud LSD-mahukaalude väärtustest ning tulemusi võrreldi laboratoorselt mõõdetud kuivmahukaaluga. Tulemused on esitatud tabelis 3.

Tabel 3. Kasutatud andmed ja tulemused

Puuraugu/ Puurkaevu nimi	Algus (m)	Lõpp (m)	Kivim	Kihistu	Kuiv mahukaal laboratoorselt (g/cm3)	Mahukaal LSD (g/cm3)	Korrigeeritud mahukaal (g/cm3)
PH001	54,80	54,90	Lubjakivi	Loobu	2,46	2,68	2,41
PH001	58,68	58,78	Lubjakivi	Sillaaru	2,60	2,21	1,94
PH001	60,25	60,35	Lubjakivi	Toila	2,70	2,30	2,03
PH001	62,00	62,10	Glaukoniit-liivakivi	Leetse	2,13	1,72	1,42
PH001	63,82	63,92	Fosforiit	Kallavere	2,15	1,96	1,70
PH001	64,68	64,78	Fosforiit	Kallavere	2,11	1,97	1,71
PH001	65,77	65,87	Fosforiit	Kallavere	2,15	1,92	1,66
PH001	66,75	66,85	Fosforiit	Kallavere	2,03	1,91	1,65
PH001	68,00	68,10	Fosforiit	Kallavere	2,02	1,98	1,72
PH001	68,83	68,93	Fosforiit	Kallavere	1,91	1,93	1,67
EGT0032	14,85	14,98	Glaukoniit-liivakivi	Leetse	1,33	2,71	2,41
EGT0032	15,84	16,00	Glaukoniit-liivakivi	Leetse	2,03	2,63	2,33
EGT0032	19,34	19,55	Graptoliit-argilliit	Türisalu	1,80	2,14	1,92
EGT0032	21,14	21,24	Fosforiit	Kallavere	1,75	2,60	2,33
EGT0032	21,61	21,75	Fosforiit	Kallavere	2,01	2,67	2,40
EGT0032	22,98	23,08	Fosforiit	Kallavere	1,98	2,63	2,37
EGT0033	15,36	15,57	Glaukoniit-liivakivi	Leetse	2,20	2,69	2,39
EGT0033	19,18	19,31	Graptoliit-argilliit	Türisalu	1,79	2,08	1,88
EGT0033	20,00	20,16	Fosforiit	Kallavere	1,77	2,47	2,21
EGT0033	21,20	21,33	Fosforiit	Kallavere	1,88	2,65	2,39
EGT0033	22,63	22,75	Fosforiit	Kallavere	1,96	2,65	2,39
EGT0033	23,22	23,33	Fosforiit	Kallavere	1,97	2,60	2,34

Graafiliselt on laboratoorselt ja gamma-sondiga mõõdetud mahukaalud esitatud joonisel 5. Järgnevalt kirjeldatakse erinevusi kivimitüüpide kaupa.

Karbonaatsete kivimite puhul on kokku kolm mõõtmistulemust. Ühe proovi (Loobu kihistu proov) puhul on kokkulangevus hea, kuid kahe teise puhul on gamma-sondiga mõõdetud mahukaal märkimisväärselt väiksem, jäädes umbes 2 g/cm^3 juurde See on selgelt väiksem kui kirjandusest teada olev karbonaatsete kivimite mahukaal (2,7-2,8 g/cm^3) (Jõeleht, Kukkonen 2002).

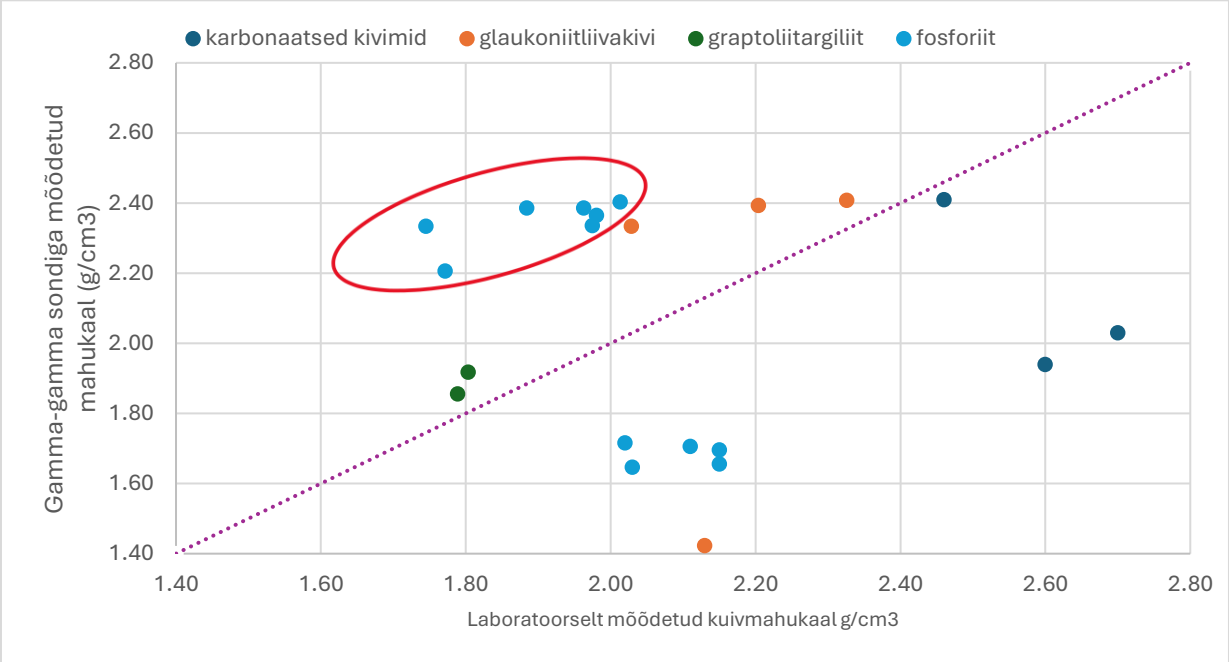
Glaukoniitliivakivi puhul hinnatakse kolmel proovil mahukaalu kõrgemaks, kuid ühel juhul on see ebarealistlikult madal (1,42 g/cm^3).

Graptoliitargilliidil on kaks mõõtmistulemust. Mõlemad neist on üksteisele lähedal aga ikkagi kõrgemad kui laboratoorselt mõõdetud mahukaaluga (1,88 g/cm^3 ja 1,92 vs 1,79 g/cm^3). Üldiselt on graptoliitargilliidi puhul tulemuste kokkulangevus teiste kivimitüüpidega võrreldes parem.

Fosforiidi kivimite puhul, kus kasutati keskmise väärtusega parandit, esineb kaks olulist erinevust. Puuraukude EGT0032 ja EGT0033 väärtused on märkimisväärselt ülehinnatud, samas kui puurkaevu PH001 puhul on mahukaalu väärtuseid alahinnatud. Näiteks ühes punktis on laboratoorselt mõõdetud väärtus 2,15 g/cm^3, kuid korrigeeritud väärtus on vaid 1.66 g/cm^3.

Vaadeldes tulemusi puuraukude kaupa, selgub, et ühe erandiga on kõigis PH001 puurkaevu mõõtmistest gamma-meetodil saadud tulemused alahinnanud mahukaalu. Fosforiidi puhul võib alahindamist põhjustada plastmassist filter, mis mõjutab tulemusi vähem kui metalltoru, kuid arvutuslikult hinnati selle mõju tõenäoliselt üle. Samas ei selgita see madalamaid väärtusi lubjakivide intervallis, mis on mõõdetud läbi metallist manteltoru, mille taga peaks asuma tsement. Kui puurkaevu metalltoru taga on tühimikud, võib see selgitada gamma-sondiga saadud anomaalselt madalaid väärtusi. Lisaks võib üheks põhjuseks olla tsemendi puudumine puuraugu manteltoru taga. Kui seal esineb tühimik, siis on gamma-sondiga mõõdetud mahukaalu väärtused alahinnatud. Välistada ei saa kalibratsiooni viga enne mõõtmiste tegemist. Seda oleks võimalik täpsemalt selgitada, kui puuraugus tehakse kordusmõõtmisi, kuid käesoleva uurimustöö raames ei olnud seda võimalik teostada.

EGT0032 ja EGT0033 puuraukude andmetes on näha, et kõigil kivimitüüpidel, välja arvatud graptoliitargilliit, esineb tugev ülehindamine. Üheks põhjuseks on erinev puurtoru paksus ja diameeter võrreldes koefitsienti väljatöötamisel kasutatud puurkaevu PRK0073545-ga. Seda oletust toetab ka fosforiidiproovide mõõtmistes esinev korrelatsioon – laboratoorselt suurema mahukaaluga proovide korral saadakse gamma-sondiga samuti kõrgemaid väärtusi.



Joonis 5. Tulemused

Üldistades võib järeldada, et gamma-gamma sondiga mõõdetud mahukaalud erinevad märkimisväärselt laboratoorsetest tulemustest. Tõenäoliselt on peamiseks põhjuseks erinevad mantel- ja puurtorude tüübid, mis mõjutavad mõõtmistulemusi erinevalt. Kokkuvõttes põhjustavad need erinevused nii suuri variatsioone, et mantel- või puurtoru kaudu mõõdetud gamma-sondi tulemused ei ole maavarade uuringutel usaldusväärselt kasutatavad. Parema korrelatsiooni saavutamiseks laboratoorsete ja sondi andmete vahel võiks kasutada metalltorude asemel PVC-torusid, mis aitaksid toestada pudedaid setteid, kuid ei moonutaks mõõtmistulemusi samal määral. Selline lähenemine eeldaks aga teistsugust puurimismeetodit maavarade uuringutel.

6. Kokkuvõte

Käesolevas bakalaureusetöös uuriti kivimite mahukaalu määramise võimalusi geofüüsikaliste meetoditega. Töö raames mõõdeti gamma-gamma sondiga kivimite mahukaalu puurkaevus PRK0073545. Kasutati võrdlemiseks samas puurkaevus tehtud tiheduse mõõtmisi ilma manteltoruta ning arvutati välja manteltoru mõju mahukaalu mõõtmisel. Lisaks kasutati puuraukude EGT0032, EGT0033 ja PH001 sondiga mõõdetud mahukaalu andmeid, korrigeerides neid saadud parandiga. Tulemusi võrreldi laboratoorselt mõõdetud mahukaalu andmetega.

Uuringus leiti, et gamma-gamma sondiga mõõdetud tulemused erinevad märkimisväärselt laboratoorselt mõõdetud tiheduse andmetest. Erinevad puuraukude manteltorud mõjutavad sondi mõõtmistulemusi. Lisaks mõjutavad mõõtmistulemusi ka litoloogiline varieeruvus– glaukoniitliivakivil oli sondiga mõõdetud mahukaalu ja laboratoorselt mõõdetud mahukaalu erinevus kõige suurem, ning graptoliitargilliidil kõige väiksem. PH001 puuraugus alahindas gamma-gamma meetod mahukaalu väärtuseid peaaegu kõigis intervallides, võimalikeks põhjusteks võivad olla plastmassist või metallist torude mõjud ja tühimikud puuraugu ümbruses. EGT0032 ja EGT0033 puuraukudes esines üldiselt mahukaalu väärtuste ülehindamist, välja arvatud graptoliitargilliidi kihis, kus mõõdetud väärtused olid laboritulemustele kõige lähemad. Seetõttu ei ole mantel- või puurtoru kaudu mõõdetud gamma-gamma sondi tulemused usaldusväärsed maavara uuringutel.

Determination of Bulk Density of the Phosphorite Layer Using Geophysical Methods

Astrid Jõerand

Summary

One of the challenges in geological studies of phosphotite is the determination of rock bulk density, as classical laboratory methods are not always suitable due to the weakly cemented nature of the rock.

This bachelor's thesis investigated the possibilities of determining rock bulk density using geophysical methods. The analysis is based on data from four different boreholes and bulk density values measured in the laboratory. Bulk density was measured with a gamma-gamma probe in borehole PRK0073545. For comparison, density measurements without the casing in the same borehole were used to calculate the casing's influence on bulk density measurements. Additionally, bulk density data measured with probes in boreholes EGT0032, EGT0033, and PH001 were corrected using the obtained adjustment factor. The results were compared with laboratory-measured bulk density data.

The study found that gamma-gamma probe measurements differ significantly from laboratory density data. In borehole PH001, the gamma-gamma method generally underestimated bulk density values across almost all intervals. Possible reasons for this may include the effects of plastic or metal casing and voids behind the borehole casing. In boreholes EGT0032 and EGT0033, bulk density values were generally overestimated, except in the black shale layer, where the measured values were the closest to laboratory results. Different casing types in the boreholes affect the probe results, and the effect also varies with rock type. Therefore, gamma-gamma probe results obtained through casing or borehole pipes are not reliable for mineral resource investigations.

Tänuavaldused

Töö autor tänab oma juhendajaid Lauri Joosut, Siim Tarrost ja Jüri Pladot, kes aitasid töö valmimisele kaasa ja aitasid nõuannetega.

Kasutatud materjalid

Bauert, H., Joosu, L., Vind, J. (2020). The Furongian–Lower Ordovician shelly phosphorites in north Estonia

Chatfield, M. (2014). A bimonthly bulletin for wireline loggers and geoscientists engaged in mining and mineral exploration. *WIRELINE WORKSHOP*, (3). http://wirelinechronicle.com/bulletin/downloads/Wireline_bulletin_January_2014.pdf

Chatfield, M., Trofimczyk, K., Harney, D., & Kachigunda, T. (2009). Downhole wireline density versus drill core density measurements in porous and vuggy rocks. *11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition*. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.241.chatfield_paper1

Cordell, D., Drangert, J. O. & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009

Eesti Geoloogiateenistus. (2022). Fosforiit ja kaasnevad ressursid. https://www.egt.ee/tegevusvaldkonnad-ja-eesmargid/maapoueressursid/fosforiit-jakaasnevad-ressursid (Viimati vaadatud 21.05.2025).

Joosu, L., Vind, J., Lumiste, K.,Polikarpus, M.,Tarros, S., Pärn, J., Kansi, K., Tamm, K., Bauert, H., Kaasik, T., Kurvits, K., Nemliher, J., Kuldkepp. R. (2023). Fosforiidi ja graptoliitargilliidi üldgeoloogilised uuringud Kirde-Eestis. Eesti Geoloogiateenistus. https://fond.egt.ee/fond/egf/9594 (Viimati vaadatud 19.05.2025).

Jõeleht, A., & Kukkonen, I. T. (2002). Physical properties of Vendian to Devonian sedimentary rocks in Estonia. *GFF*, *124*(2), 65–72. https://doi.org/10.1080/11035890201242065

Labo, J. (1987). 8. Density Log Principles. *A Practical Introduction to Borehole Geophysics*, 139–178. doi:10.1190/1.9781560802587.ch8

Paat, A., Roosalu, T., Karu, V., & Hitch, M. (2021). Important environmental social governance risks in potential phosphorite mining in Estonia. *The Extractive Industries and Society*, 8(3), 100911. https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.100911

Petersell, V. (2015). Fosfor, fosforiit, Keskkond Ja inimene: *Bulletin of the Geological Survey of Estonia* 12/1. Geological Survey of Estonia, p. 10. https://files.geocollections.info/f1/d0/f1d07297-58a0-4c2f-8f61-17f13722891b.pdf

Pufahl, P. K., & Groat, L. A. (2017). Sedimentary and Igneous Phosphate Deposits: Formation and Exploration: An Invited Paper. *Economic Geology*, 112(3), 483–516. https://doi.org/10.2113/econgeo.112.3.483

Raudsep, R. (2008). Estonian georesources in the European context. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 57, 80–86. https://doi.org/10.3176/earth.2008.2.03

Raukas, A., & Teedumäe, A. (1997). *Geology and Mineral Resources of Estonia*. (Elektrooniline väljaanne). https://geoloogia.info/geology/ (Viimati vaadatud 28.03.2025).

Rider, M., & Kennedy, M. (2011). *The Geological Interpretation of Well Logs* (3rd ed.). Rider-French Consulting Ltd.

Robertson-Geo LTD. (2021). *User manual for Formation Density Probe* (versioon 3.4.

Schoumans, O. F., Bouraoui, F., Kabbe, C., Oenema, O., & Van Dijk, K. C. (2015). Phosphorus management in Europe in a changing world. AMBIO, 44(S2), 180–192. https://doi.org/10.1007/s13280-014-0613-9

Talpsep, A., Talviste, P., Sedman, P. (2021). Fosforiidi uuendatud geotehniline mudel Toolse ja Rakvere testaladel. Eesti Geoloogiateenistus. https://fond.egt.ee/fond/egf/9530 (Viimati vaadatud 24.05.2025).

Tarros, S., Kebbinau, K., Erg, K., Häelm, M. (2017). Hüdrogeoloogilis-geofüüsikaliste mõõteseadmete kasutamise meetodiline juhend. Eesti Geoloogiateenistus. https://fond.egt.ee/fond/egf/9670 (viimati vaadatud 13.05.2025).

U.S. Environmental Protection Agency. (2024, March 7). *Gamma-Gamma Density Logging*. https://www.epa.gov/environmental-geophysics/gamma-gamma-density-logging (Viimati vaadatud 08.04.2025).

Eesti Looduse infosüsteem, VEKA. (n.d.). https://veka.keskkonnainfo.ee/veka.aspx?type=artikkel&id=757660072 (Viimati vaadatud 25.05.2025).

Eesti Looduse infosüsteem, VEKA. (n.d.). https://otsi.eelis.ee/PRK0072130 (Viimati vaadatud 25.05. 2025)

Eesti Looduse infosüsteem, VEKA. (n.d.). https://otsi.eelis.ee/PRK0073545 (Viimati vaadatud 25.05. 2025)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Astrid Jõerand,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

   Fosforiidikihindi mahukaalu määramine geofüüsikaliste meetoditega,

mille juhendajad on Lauri Joosu, Siim Tarros ja Jüri Plado,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Astrid Jõerand

25.05.2025