

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppiseaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geoloogia osakond

Richard Pihel

## **Aseri fosforiidimaardla geoloogiline 3D modelleerimine**

Bakalaureusetöö 12 EAP

Juhendaja: Johannes Vind

Kaitsmisele lubatud .....

Juhendaja .....

Allkiri, kuupäev

Tartu 2023

## **Aseri fosforiidi-maardla geoloogiline 3D modelleerimine**

Fosforiiti kasutatakse väetiste tootmiseks. Uuringus töötatakse Eestis asuva Aseri fosforiidimaardlaga. Uurimistööl on kaks eesmärki. Esimene eesmärk on Aseri maardla fosforiidi kihindite ruumiline analüüs ajalooliste andmete põhjal. Teine eesmärk on Aseri maardla fosforiidi varude hindamine mudeli põhjal. Uuringu algandmeteks on Eesti Geoloogiateenistuse poolt digitaliseeritud puuraukude info ning Aseri maardla mudeli loomiseks kasutati Seequenti programmi Leapfrog Geo. Tulemustena leiti, et Aseri fosforiidimaardla fosforiid kihistik on võrreldes teiste Eestis asuvate maardlatega suhteliselt õhuke ja madala kvaliteediga, kuid asub maapinnale lähemal. Fosforiidi varud on registrikaardis olevate hinnangutega ligikaudu võrdsed ning maavara plokkide siseselt jaguneb fosforiit suhteliselt vähe ümber. Järeldati, et konventsionaalsetel maa alusel või karjääri viisidel Aseri maardla fosforiiti ei saa kaevandada. Ühtlasi võiks Aseri maardla maavara plokkide ehituse üle vaadata ning vajadusel ümber ehitada.

Märksõnad: Fosforiit, modelleerimine, kaevandamine, Aseri.

CERCS kood: P430 Maavarad, majandusgeoloogia

## **Geological 3D modelling of Aseri phosphorite deposit**

Phosphorite is used for the production of fertilizers. The study focuses on the Aseri phosphorite deposit located in Estonia. The research has two objectives. The first objective is the spatial analysis of phosphorite layers in the Aseri deposit based on historical data. The second objective is the evaluation of phosphorite reserves in the Aseri deposit using a model. The initial data for the study consisted of drill hole information digitized by the Estonian Geological Survey, and the Aseri deposit model was created using Seequent's Leapfrog Geo program. The results show that the phosphorite layer in the Aseri phosphorite deposit is relatively thin and of lower quality compared to other deposits in Estonia, but it is closer to the surface. The phosphorite reserves are comparable to the estimates in the registry, and the distribution of phosphorite within the blocks undergoes relatively little redistribution. It was concluded that conventional underground or quarry mining methods can't be used for extracting phosphorite from the Aseri deposit. Additionally, the construction of the deposit blocks should be reviewed and potentially rebuilt if necessary.

# Sisukord

Sissejuhatus .....	5
1. Geoloogiline taust .....	6
1.1. Põhja-Eesti geoloogiline tüüpläbilõige .....	6
1.2. Fosforiidi tekkimine.....	7
1.3. Eesti fosforiidi esinemine .....	8
1.4. Fosforiidi kaevandamine Eestis .....	9
1.5. Graptoliitargiliit .....	9
1.6. Fosforiidi rikastamine ning kasutamine.....	9
1.6.1. Tehnoloogilised väljakutsed.....	10
1.6.2. Keskkonnaprobleemid.....	10
1.6.3. Majanduslikud väljakutsed.....	10
1.6.4. Sotsiaalsed väljakutsed.....	11
1.7. Aseri maardla .....	11
2. Materjal ja meetodika.....	12
2.1. Puuraugud .....	12
2.2. Maavarade registri andmed.....	12
2.3. 3D modelleerimine.....	12
2.3.1. Üldgeoloogilise mudeli koostamine.....	13
2.3.2. Aluspõhja reljeef .....	15
2.3.3. Maavara iseloomustamine.....	15
2.4. Ruumiline analüüs ja kahemõõtmeliste kaartide koostamine .....	20
3. Tulemused .....	20
3.1. Üldgeoloogiline mudel.....	20

3.1.1. Tüüpilised vead .....	22
3.2. Plokkimudel ja varude hinnang.....	22
4. Arutelu .....	24
4.1. Fosforiidikihi üldine koostis ja ehitus.....	24
4.2 Trendid .....	32
4.2.1 Lõuna-põhja-suunalised trendid .....	34
4.2.2 Lääne-ida-suunalised trendid .....	35
4.2.3 Sügavustrendid .....	36
4.3. Maavarade Registris arvel olevate plokkide ning uurimistöös koostatud plokkimudeli varude võrdlus.....	37
4.3.1. Maavara plokkide kivimi kogumassi muutused.....	37
4.3.2. Maavara plokkide P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> massi erinevused.....	41
4.3. Võimalik maardla kasutuselevõtt.....	45
5. Kokkuvõte .....	46
6. Summary.....	47
7. Kasutatud materjalid.....	49
8. Lisad .....	53

## Sissejuhatus

Fosforiiti kasutatakse põllumajanduses väetiste toorainena. Fosforiidis sisalduv  $P_2O_5$  suurendab taime bioloogilist aktiivsust ning viljasaaki. Kasvava maailma rahvaarvu ning elukvaliteedi tõusu tõttu suureneb ka vajadus fosfaadil põhinevatele väetistele. Tänapäeval kaevandatakse suurem osa maailma fosforiidist Sahara kõrbest, kuid ka Eestis leidub fosforiidi maardlaid (Eesti Geoloogiateenistus, 2022). Sahara regioon on poliitiliselt ebastabiilne ning kohaliku kodusõja või muu poliitilise probleemi tõttu võib fosforiidi tootmine Sahara regioonis väheneda. Fosforiit on paigutatud Euroopa kriitiliste toormete nimekirja, mis tähendab, et Euroopa Liidu hinnangutel on fosforiidi varustuskindlus Euroopa Liidu riikidele esmatähtis (Schoumans *et al.*, 2015).

Aastal 2018 taasalustati Eestis fosforiidiuuringud, mis peatusid 80ndate lõpus. Fosforiidi uuringud peatusid, sest sotsiaalne surve fosforiidi kaevandamise vastu oli suur. Tänapäeval on oluline hulk varasematest uuringutest saadud andmeid, digitaliseeritud. Fosforiiti uuriti Nõukogude Liidu okupatsiooni ajal Eestis üsna põhjalikult ning ajaloolist infot on nüüd võimalik kasutada. Digitaalsed mudelid võimaldavad ajaloolist infot uuesti töödelda ning seeläbi hinnata fosforiidi levikut ja kvaliteeti. (Joosu *et al.*, 2023)

Tööl on kaks peamist eesmärki. Esimene eesmärk on Aseri maardla fosforiidi kihindite ruumiline analüüs ajalooliste andmete põhjal. Ruumilise analüüsi kaudu saab näha fosforiidi kihi ehitust ja omadusi. Teine eesmärk on Aseri maardla fosforiidivarude hindamine mudeli põhjal. Varude hinnangut saab võrrelda ajalooliste hinnangutega ning uurida kui palju varasemalt läbi viidud uuring sarnaneb mudeli põhjal tehtud hinnangule.

# **1. Geoloogiline taust**

Eesti asub Ida-Euroopa platvormil ja koosneb kolmest kompleksist: kristalsest aluskorrast, settekivimilisest pealiskorrast ning pinnakattest. Kristalne aluskord on kujunenud Proterosoikumis ning pealiskord on kujunenud Ediacara kuni Devoni ajastutel. Pinnakatte kivimid ja setendid on moodustunud Kvaternaari ajastul. Pealiskorra settekivimid lasuvad 6-13 kraadiminutilise nurga all lõuna poole. (Raukas & Teedumäe, 1997)

## **1.1. Põhja-Eesti geoloogiline tüüpläbilõige**

Põhja-Eesti klindi tüüpiline ehitus on esitatud joonisel 1. Läbilõike alumises osas asub Kambriumi sinisavi, mille peal lasuvad purdsetted. Purdsetted on peamiselt liivakivid ja selles uuringus on kõige olulisem fosforiiti sisaldav oobulusliivakivi. Purdsetete kohal lasuvad lubjakivid erinevate lisanditega nagu raud, glaukoniit ja põlevkivi.

Q	LADE	KIHISTU	KIVIM
ORDOVITSIUM	KUKRUSE	VIIVIKONNA	LUBJAKIVI PÕLEVKIVI VAHEKIHTIDEGA
	UHAKU	KÕRGEKALDA	SAVIKAS LUBJAKIVI
	LASNAMÄE	VÄO	EHITUSLUBJAKIVI
	ASERI	ASERI	LUBJAKIVI RAUDOIIDIDEGA
	KUNDA	KANDLE	LUBJAKIVI RAUDOIIDIDEGA
		LOOBU	LUBJAKIVI
		SILLAORU	LUBJAKIVI RAUDOIIDIDEGA
	VOLHOVI	TOILA	LUBJAKIVI GLAUKONIIDIGA
	BILLINGENI		
	HUNNEBERGI VARANGU	LEETSE	GLAUKONIITLIIVAKIVI
PAKERORDI	TÜRISALU	DIKTÜONEEMAKILT	
	KALLAVERE	OOBOLUSLIIVAKIVI (FOSFORIIT)	
KAMBRIUM		ÜLGASE JA TSITRE	LIIVAKIVI DETRIIDIGA
	DOMINOPOLI	TISKRE	KVARTSLIIVAKIVI
		LÜKATI	SINISAVI KVARTSLIIVAKIVI VAHEKIHTIDEGA
	LONTOVA	LONTOVA	SINISAVI

Joonis 1. Põhja-Eesti klindi tüüpläbilõige (Põhja-Eesti Klindi Kivimitest, 2022)

## 1.2. Fosforiidi tekkimine

Fosforiit liigitatakse peamiselt kaheks erinevaks tüübiks: tardkivimiliseks ehk magmaliseks ja setteliseks.

Tardkivimiline fosforiit tekib magma jahtumisel kui keemiline fosfor kristalliseerub apatiidiks —  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$ . Magmalist päritolu fosforiit on seotud karbonaatsete kivimitega, milles on üle 50% karbonaatseid mineraale. Tardkivimiline fosforiit varieerub oma

morfoloogia, mineraloogia, keemilise koostise ja tektoonilise keskkonna poolest, mis muudab tardkivimilise fosforiidi kaevandamise võimaluste uurimise keeruliseks. Tardkivimiline fosforiit on tüüpiliselt 5%-15% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldusega. Suurimad tardkivimilise fosforiidi kaevandused asuvad Loode-Venemaal Koola poolsaarel kus kaevandatakse 58% maailma tardkivimilisest fosforiidist. (Pufahl & Groat, 2017)

Settelise fosforiidi tekkimine algab kui kontinentaalse tekkega kivimid erodeeruvad ning vabanenud fosfor liigub ookeani. Peamiselt liigub fosfor ookeani jõgede kaudu, kuid kuivades kliimades on oluline ka fosfori eolne transport. Suurem osa fosforist, mis jõuab ookeani, on lahustamatu ning selle tõttu fosforiringes ja fosforiidi tekkes ei osale. Lahustunud fosfor omandatakse mereelustiku poolt ning see suurendab mereelu bioloogilist aktiivsust. Suurem osa settelisi fosforiite tekib tingimustes, kus külmad fosforirikkad hoovused tõusevad ookeani põhjast mööda mandrišelfi madalmeres aladele ja sealsed fütoplanktonid selle omastavad. Fütoplankton hakkab madalmeres vohama ning surres moodustavad fütoplanktoni säilmed merepõhja orgaanikarikka muda. Orgaanikarikka muda peale ladestuvad muud setted ja rõhu suurenemisel hakkab mudakivimis fosfor kristalliseeruma apatiidiks või fluorapatiidiks. Settelised fosforiidid moodustavad 90%-95% kogu maailma kaevandatavast fosforist ning on väga olulised globaalse põllumajanduse jaoks fosfaatväetiste tootmisel. (Pufahl & Groat, 2017)

### **1.3. Eesti fosforiidi esinemine**

Eesti fosforiit on setteline fosforiit, mille algmaterjaliks on lingulaatsete brahhiopoodide ehk käsijalgsete kojad. Lingulaatide kojad on mineraliseerunud fluorapatiidiks (Nemliher *et al.*, 2004). Brahhiopoodide kojad moodustavad kivimist enamasti 5%-10% mõningatel juhtudel 80-90%. Kojad on üldiselt paar millimeetrit paksud kuid võivad ulatuda kuni 1 cm paksuseni. Fosforiit on tüüpiliselt ladestunud põimkihiliste 20 cm kuni 30 cm paksuste kihtidena. Tihti esineb ka 10 cm kuni 30 cm paksuseid läätsi (Bauert *et al.*, 2015).

Eesti fosforiiti nimetatakse kivimiliselt oobulus-liivakiviks, mis levib Ülem-Kambriumi ja Alam-Ordoviitsiumi ealistes kivimites, Kallavere kihistus. Kallavere kihistu koosneb Maardu, Rannu, Katela, Orasoja ja Suurjõe kihistikest (Heinsalu, 1981). Kallavere kihistus domineerivad nõrgalt tsementeerunud liivakivid, kus osades kihistikes esinevad paksemad (kuni 4-6 meetrit) fosfaatsete lingulaatide kodadega kihid. Fosforiit levib Põhja-Eestis, kus kaevandatava

fosforiidikihi paksus on 1-12 m ja kaevandatav fosforiit asub 5-200 m sügavusel (Raukas & Teedumäe, 1997).

Puhas fosforpentoksiid ehk  $P_2O_5$  moodustab 6-20% Oobulus-liivakivist. Fosfaatsed kivimid võivad väiksemal määral sisaldada ka dolomiiti, kaltsiiti, püriiti, glaukoniiti ja raua hüdroksiide. Eelnevaid mineraale on fosforiiti sisaldava apatiidiga võrreldes vähe, kuid neil on oluline mõju fosforiidi rikastamisele (Raukas & Teedumäe, 1997).

#### **1.4. Fosforiidi kaevandamine Eestis**

Suurimad fosforiidi leiukohad ja maardlad asuvad Põhja-Eestis. Eestis, Rakveres asub Euroopa suurim fosforiidimaardla, kus on umbes 700 miljonit tonni  $P_2O_5$ . Fosforiiti on Eestis kaevandatud alates 1924. aastast vaid Maardust. Nõukogude Liidu valitsuse all fosforiidi tootmine laienes. Eesti fosforiiti kasutati ebaefektiivse väetise tootmiseks. K ontsentreeritud fosforiiti lisati superfosfaadile happelise pinnase neutraliseerimiseks. Kaheksakümnendatel suurenes tähelepanu fosforiidi kaevandamisega seotud keskkonnaprobleemidele. Fosforiidi kaevandamine lõpetati 1991. aastal. Kokku kaevandati Maardust 25 miljonit tonni fosforiidi maaki. (Raukas & Teedumäe, 1997)

#### **1.5. Graptoliitargiliit**

Graptoliitargiliit lasub fosforiidikihi peal. See on orgaanikarikas (15%-20%) sette kivim, milles on ka kõrge väävl- ja püriidisisaldus, vastavalt 2%-6% ja 1,5%-9%. Argilliiti võib pidada ka potentsiaalseks maavaraks, sest see võib sisaldada kaevandatavas koguses metalle. (Eesti Geoloogiateenistus, 2022b)

#### **1.6. Fosforiidi rikastamine ning kasutamine**

Peamine fosforiidi rikastamise meetod on flotatsioon (Puura, 1987). Peamised kaasnevad ained, mis fosforiidi maagis leiduvad on räni, magneesium ja raud. Kaasnevate ainete sisaldusel võib olla suur mõju fosforiidist tehtava väetise kvaliteedile. Magneesiumi sisaldus tuleneb peamiselt dolomiidist, kuid majanduslikult mõistlikku viisi dolomiidi eemaldamiseks fosforiidist ei ole veel leitud. Rauda sisaldav püriit on lahustuv oksüdeerivas happes. Kvarts on suurima sisaldusega kõrvalprodukt fosforiidis (kuni 25%-26%). Laborikatsete põhjal on kindlaks tehtud, et kvaliteetse väetise tegemine Eesti fosforiidist on võimalik. (Raukas & Teedumäe, 1997)

Uute fosforiidi kaevanduste avamisest Toolse ja Rakvere maardlates on viimastel aastatel palju räägitud. Väljakutsed on jagatud nelja kategooriasse: tehnoloogilised, keskkondlikud, majanduslikud ja sotsiaalsed. (Raukas & Teedumäe, 1997)

#### 1.6.1. Tehnoloogilised väljakutsed

Peamine väljakutse on seotud fosforiidi rikastamisega. Fosforiit sisaldab mitmeid kaasnevaid aineid milleks on MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ja Cl. Aladel, kus kaasnevaid aineid on rohkem, on raskem fosforiiti rikastada.

Rakvere maardlas asub fosforiit sügavusel, kus on võimalik vaid maa-alune kaevandamine. Toolse ja Aseri maardlad on ainukesed, kus karjääriviisiline kaevandamine on võimalik. Oluline on fosforiidil lasuva graptoliitargilliidi kasutamine või ohutu eemaldamine. (Raukas & Teedumäe, 1997)

#### 1.6.2. Keskkonnaprobleemid

Maardu fosforiidikaevanduses eemaldati fosforiidil lasuv graptoliitargiliit. Argilliidi puistangud süttivad iseenesest püriidi oksüdatsiooni kaudu ning graptoliitargilliidis sisalduv orgaanika käitus kütusena põlemisele. Väevli sisalduse (2%-3%) tõttu sattus atmosfääri kahjulik vääveldioksiid. Kuumuse tõttu lahustusid raske- ning radioaktiivsed metallid ja imbusid põhjavette. Viis graptoliitargilliidist vabanemiseks on oluline kui soovitakse hakata kaevandama Toolse või Aseri maardla fosforiidi maardlas.

Rakvere maardla asub tihedalt asustatud regioonis. Fosforiidi maa-alusel kaevandamisel on vajalik põhjavee pumpamine kaevandusest. Põhjavee pumpamine põhjustaks regioonis märkimisväärse põhjavee taseme languse ja osade põhjaveekihtide kuivamise. (Raukas & Teedumäe, 1997)

#### 1.6.3. Majanduslikud väljakutsed

Senise teadmise alusel ei tasu Toolse ega Rakvere maardlast kaevandamine ennast majanduslikult ära (Adamson, 1997), kuid tasuvusuuringuid on taas alustatud (Joosu *et al.*, 2022). Kaevandamise tasuvust parandaksid madalamad elektri hinnad ning odavam tööjõud (Raukas & Teedumäe, 1997).

Fosforiidi kasutuselevõtu küsimustega kaasaegses kontekstis tegeleb käesoleval ajal Eesti Geoloogiateenistus ning Eestis asuvad ülikoolid. Hetkel on käimas Eesti Geoloogiateenistuse

poolt Nõukogude Liidu ajal tehtud statigraafia andmestiku ning geokeemiliste ja füüsikalismehaaniliste analüüside andmete korrastamine (Joosu *et al.*, 2023). Ühtlasi kogutakse uut infot Aseri, Rakvere ning Toolse maardlate kohta. Andmete põhjal luuakse maardlate geoloogilised ruumimudelid. (Eesti Geoloogiateenistus, 2022)

#### 1.6.4. Sotsiaalsed väljakutsed

Maardlate kaevandamisel on suur osa sotsiaalsetel faktoritel. Kohalikule rahvaarvule on mõju väike juhul kui palgatakse kohalikud töölised. Kui kaevandamise jaoks on vaja rohkem tööjõudu kui kohalikul rahvastikul võimalik pakkuda on, siis tuuakse sisse tööjõudu välismaalt. Fosforiidisõdade ajal oli üks suurimaid vastuolusid võõrtööjõu sissetoomine (Paat *et al.*, 2021). Eeldatav on osade inimeste elamiskohtade liigutamine. Otseselt mõjutatud perekondade arvu saab teada alles siis, kui on koostatud kaevandamisplaan (Raukas & Teedumäe, 1997).

### 1.7. Aseri maardla

Aseri fosforiidimaardla mis asub Ida-Viru maakonnas, on mahult Eesti kolmas fosforiidimaardla. Geoloogiliselt asub Aseri maardla Ordoviitsiumi ladestu Pakerordi lademes. Aseri maardlat pole Eestis kaevandatud. Maardla läänepoolset osa käsitlevad peamiselt kaks aruannet: „Aruanne geoloogilistest uuringutöödest ja varude arvutamisest seisuga 1/1 1957. a. Aseri fosforiidimaardlas 1954.-1956. a.“ (Stuomov *et al.*, 1956) ja „Aruanne Aseri maardla fosforiidide järeluuringu tulemustest ja nende tehnoloogiliste omaduste hindamisest 1974.-1977. a.“ (Mardiste, 1977). Maardla idapoolset osa käsitleb peamiselt „Aruanne geoloogiliste uuringutööde tulemustest 1955.-1962. a Saka fosforiidimaardlas Eesti NSV-s“ (Petersell & Petersell, 1963). Nagu aruannete pealkirjadest näha, siis on varasemalt Aseri maardla läänepoolset osa nimetatud algselt Aseri maardlaks ning idapoolset osa Saka maardlaks. Aseri ja Saka maardlate osasid eraldab Purtse jõe org.

Aseri fosforiidimaardla registrikaardis on passiivse tarbevaruna arvel 311,521 tuhat tonni fosforiiti ning prognoosvaruna on arvel 76,229 tuhat tonni fosforiiti. Maardla varude hinnangu põhjal on arvele võetud 24809 kt P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ehk puhast kasulikku ainet (*Maavarade Register, Maa-Amet*, 2023). Täiendavad maardla põhiparameetrid on välja toodud tabelis 1. Maardla keskmine P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus on 7,96% ning ülejäänud keemilised koostisosad on näidatud tabelis 2.

Tabel 1. Aseri fosforiidimaardla põhiparameetrid registrikaardi andmetel (Maavarade Register, Maa-Amet, 2023)

Aseri maardla põhiparameetrid	
Maardla pindala	12205,67 ha
Kasuliku kihi sügavus	5m-36m
Katendi paksus	5m-36m

Tabel 2. Aseri fosforiidimaardla keemiline koostis registrikaardi andmetel (Maavarade Register, Maa-Amet, 2023)

Aseri maardla keemiliste komponentide sisaldus			
	minimaalne	maksimaalne	keskmise
SiO <sub>2</sub>	38,3%	80,65%	57,33%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,3%	17,43%	7,96%
MgO	0,1%	5,05%	0,74%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27%	4,41%	1,85%

## 2. Materjal ja meetodika

### 2.1. Puuraugud

Töös kasutatud andmed pärinevad Eesti Geoloogiateenistuse materjalidest (Vind *et al.*, 2023). Aseri maardla mudelialale on puuritud 1268 puurauku ning puuraukude andmed sisaldavad puuraukude asukohti, sügavusi, litostratigraafilise kirjeldusi ja keemilise koostise analüüside tulemusi. Keemilises koostises on mõõdetud CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, ja P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldused. Fosforiidi proove on kokku 6835. Modelleerimisala edelaosas paiknevad puuraugud on rajatud Rakvere maardla uurimise eesmärgil, kuid neid on samuti mudeli koostamisel kasutatud.

### 2.2. Maavarade registri andmed

Aseri fosforiidimaardlat iseloomustavad andmed, peamiselt varuplokkide piirjooned ning registrikaardid, saadi Maavarade registrist (Maavarade Register, Maa-Amet, 2023).

### 2.3. 3D modelleerimine

Modelleerimiseks kasutati tarkvara *Leapfrog Geo* versiooni 2022.1.1. Leapfrog Geo on Seequenti poolt loodud geoloogilise 3D-modelleerimise tarkvara. Leapfrog Geo võimaldab sisestada puuraugu ruumilised ja keemilised andmed ning andmestiku alusel saab koostada ala 3D mudeli. *Leapfrog* kasutab modelleerimisel Seequenti loodud süsteemi „*Implicit modelling*“. *Implicit modelling* kasutab süsteemi, kus puuraugu andmete põhjal saab luua pinnad. Pinnad

saavad põhineda näiteks litoloogial, keemilisel koostisel või mõnel muul mõõdetud omadusel. Traditsiooniline meetod 3D modelleerimiseks on „*explicit modelling*“, mis nõuab karkasside (*wire frame*) loomiseks rohkem käsitsi joonestamist (*Implicit Modelling | Geological Modelling- Seequent, 2023*). Loodud mudel põhineb puuraukude suudmete koordinaatidel maapinnal, puuraugu kogusügavusest, litoloogiliste üksuste piiridest ja CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, ja P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> protsentuaalset koostisest fosforiidi kihtides.

### 2.3.1. Üldgeoloogilise mudeli koostamine

Ajaloolised stratigraafilised üksused jaotati 15-neks modelleeritavaks geoloogiliseks üksuseks (tabel 3). Ajalooliste stratigraafiliste andmete ühildamine kaasagse stratigraafilise skeemiga on mõnevõrra raskendatud, sest ajalooliselt püüti kronostratigraafilised (ajalised) üksused viia vastavusse litostratigraafilisega (kivimilised), kuid tegelikkuses ei lange nende piirid sageli kokku (Meidla *et al.*, 2017). Mudeli mõõtmed on X (põhi-lõuna) 658000-6604000 (24 km), Y (ida-lääs) 648000-689000 (41k m), Z (sügavus) -50-200 (250 m).

Tabel 3, Ajalooliste stratigraafiliste üksuste jaotamine Leapfrog geoloogiliseks mudeliks

Stratigraafiline liigestus (lademed)	Stratigraafiline kirjeldus vanades fosforiiduuringutes	Leapfrog-i geoloogiline mudel
	Kvaternaar	Kvaternaar
Oandu	Oandu	Hirmuse
Keila	Keila	Kahula2
Jõhvi	Jõhvi	Kahula1
Idavere	Idavere	Tatruse-Vasavere
Kukruse	Kukruse	Viivikonna
Uhaku	Uhaku	Väo-Kõrgekalda
Lasnamäe	Lasnamäe	
Aseri	Aseri	Kandle
Kunda	Kunda	Sillaoru-Loobu
Volhov	Volhov	
Billingen	Latrop	Toila
	Varangu	Leetse
Pakerort	Türisalu	Varangu
	Suurjõe_ ja_ Maardu (Kallavere)	Türisalu
Dominopol	Tiskre	Kallavere
		Tiskre ja Kambriumi setendid

Algandmetes antud stratigraafilised üksused jaotati ümber, sest ajaloolistes uuringutes oli antud samadele stratigraafilistele üksustele erinev nimi. Teine põhjus ümber jaotamiseks oli, et mitmed üksused ei olnud antud uurimuses olulisel kohal ja üksused liideti vahetult ülal või all paiknevate sarnaste omadustega üksustega, näiteks Vasavere ja Tatruse kihistikud ühendati. Kõikide üksuste algsed paksused ning kontaktid säilitati uues jaotuses. Tiskre kihistu liivakivi ja kõik üksused Tiskre kihistust sügavamal nimetati selle uuringu raames ühtseks kihiks nimega „Tiskre

kihistu ja Kambriumi setendid“, sest need geoloogilised üksused enam märkimisväärselt fosforiit ei sisalda (Joosu *et al.*, 2023).

Aseri rikke integreerimiseks geoloogilisse mudelisse lisati Aseri rikke murdjoon (*polyline*). Aseri rikke murdjoon sisaldas rikke asukohta ja omadusi. Murdjoone abil muudeti üldgeoloogilist mudelit Aseri rikkega vastavaks.

Eelnevalt defineeritud geoloogiliste üksuste põhjal koostati ala geoloogiline mudel. Iga geoloogilist üksust kujutas ruumiline karkass. Geoloogilisest mudelist otsiti visuaalsel võrdlusel välja vead. Vead esinesid ebaloomulike lasumustena modelleeritud kihtides. Vigade all mõisteti puuraugu infot, mis võis uuringu tulemust muuta. Algandmete põhjal võrreldi puuraugu infot. Kui puuraugu info osutus valeks, siis puurauguga seotud faktiline info parandati või puurauk eemaldati mudelist. Vead puuraukude andmetes võivad esineda puurimisel tehtud vigadest või andmete digitaliseerimise käigus andmete valesti sisestamisel.

### 2.3.2. Aluspõhja reljeef

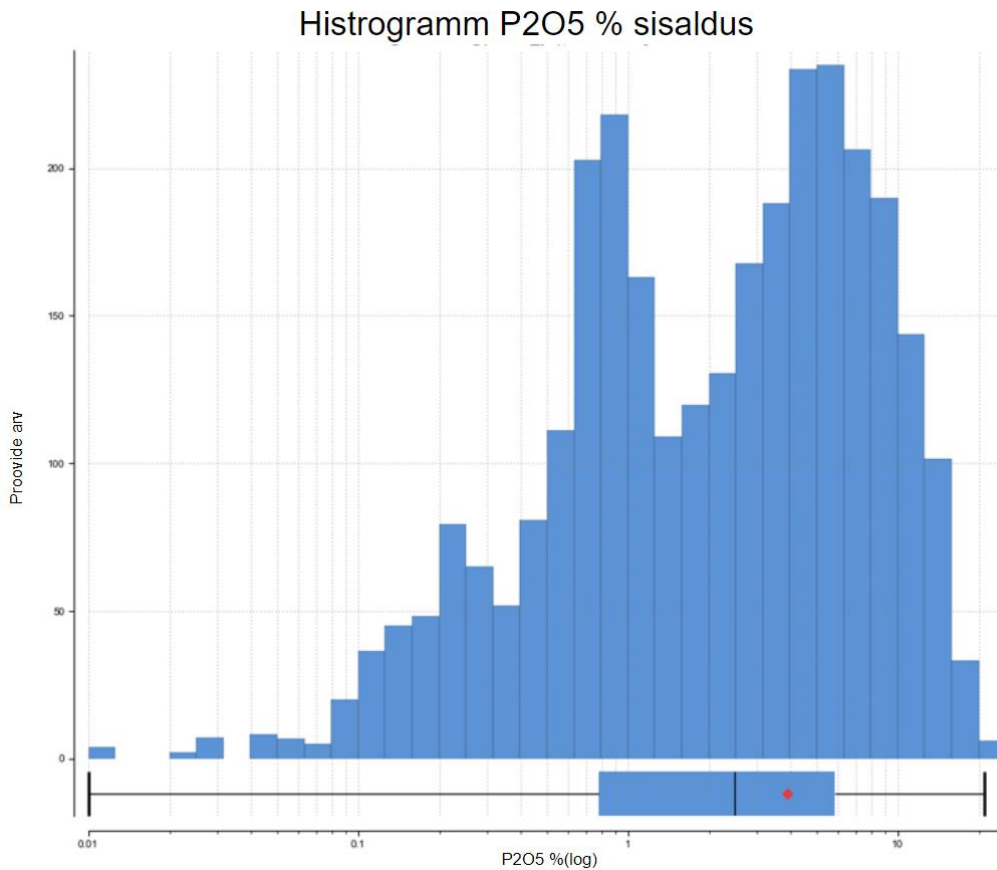
Aluspõhja reljeefi samakõrgusjooned saadi 1:50 000 geoloogiliselt baaskaardilt (*Eesti Geoloogiateenistus*, 2023) ning need lisati mudeli Kvaternaari setendite ja aluspõhja kivimite kontaktile. Aluspõhja reljeefi samakõrgusjooni muudeti kohtades, kus mudeli loodud reljeefi hinnati ebatäpseks. Purtse jõe oru vahetus läheduses on kaks puurauku, mis ulatuvad Tiskre kihistuni ning on täidetud põhjani Kvaternaari setetega. Puuraukude asukohas lõikas kvaternaari setteid kujutav kiht läbi pealiskorra, tekitades kaks sügavat ja järsku auku. Hinnati, et tegemist on tegelikult Purtse jõe oru mattunud osaga. Aluspõhja reljeefi muudeti nii, et kvaternaari setteid sisaldavad sügavad puuraukud oleksid osa mattunud jõe orust (Lisa 7).

### 2.3.3. Maavara iseloomustamine

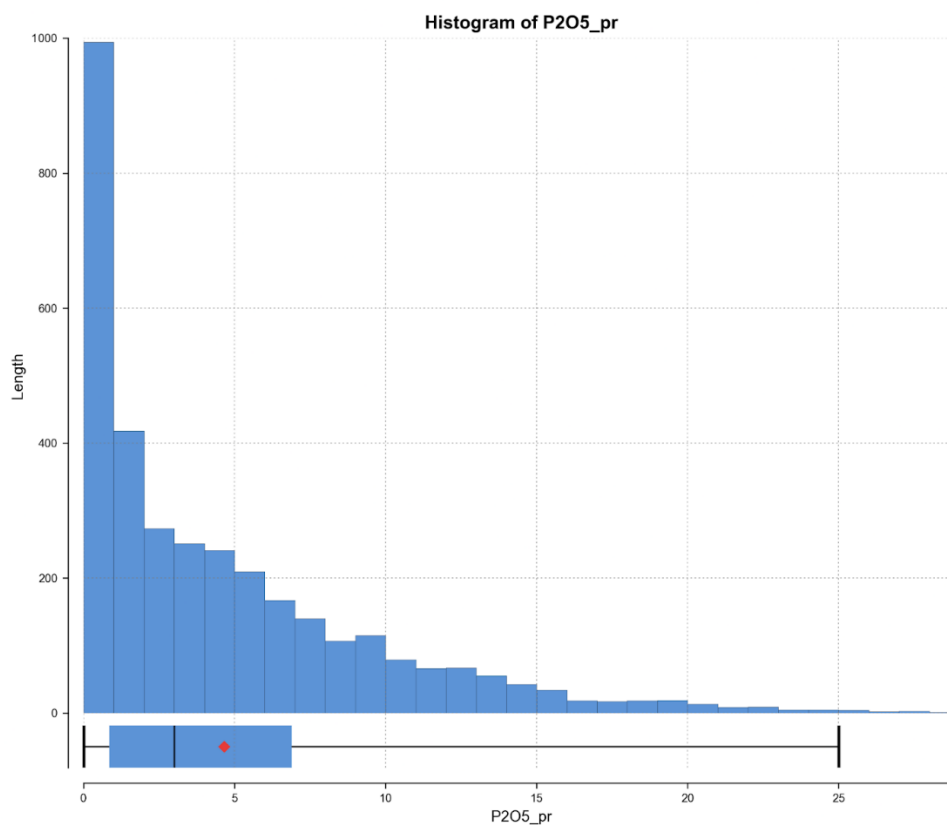
Fosforiit esines peamiselt Kallavere kihistut kujutavas karkassis, kuid ülemised fosforiidi proovid võisid ulatuda ka Türisalu kihistut kujutavasse karkassi ning alumised proovid Tiskre kihistut ja Kambriumi setendeid kujutavasse karkassi.

Seaduslikult võib fosforiiti maavarana arvele võtta alles siis kui  $P_2O_5$  sisaldus on vähemalt 4%. Antud uuringus modelleeriti väiksemate  $P_2O_5$  sisaldustega kivimeid ja arusaadavuse nimel viidati sellele kui fosforiidile. (Riigiteataja, 2018)

Aseri maardla fosforiidilasund jagati  $P_2O_5$  sagedusjaotuse põhjal kolmeks kihiks: 0%-3%, 3%-9% ja >9%. Lasundi protsentuaalne jagamine tehti maavara kasuliku komponendi ruumilise interpoleerimise eesmärgil. Normaaljaotusest erineva sagedusjaotuse või mitmete populatsioonide esinemine ühe ruumilise karkassi piires võib interpoleerimisel anda ebakorrekse tulemuse. Jagamise aluseks olid  $P_2O_5$  sagedusjaotuses tuvastatud eristuvad proovipopulatsioonid (Joonis 2, joonis 3).



Joonis 2. Logaritmiline histogramm ja karpdiagramm Aseri maardla mudeliala proovide fosforiidi proovide  $P_2O_5$  protsentuaalse sisaldusena.



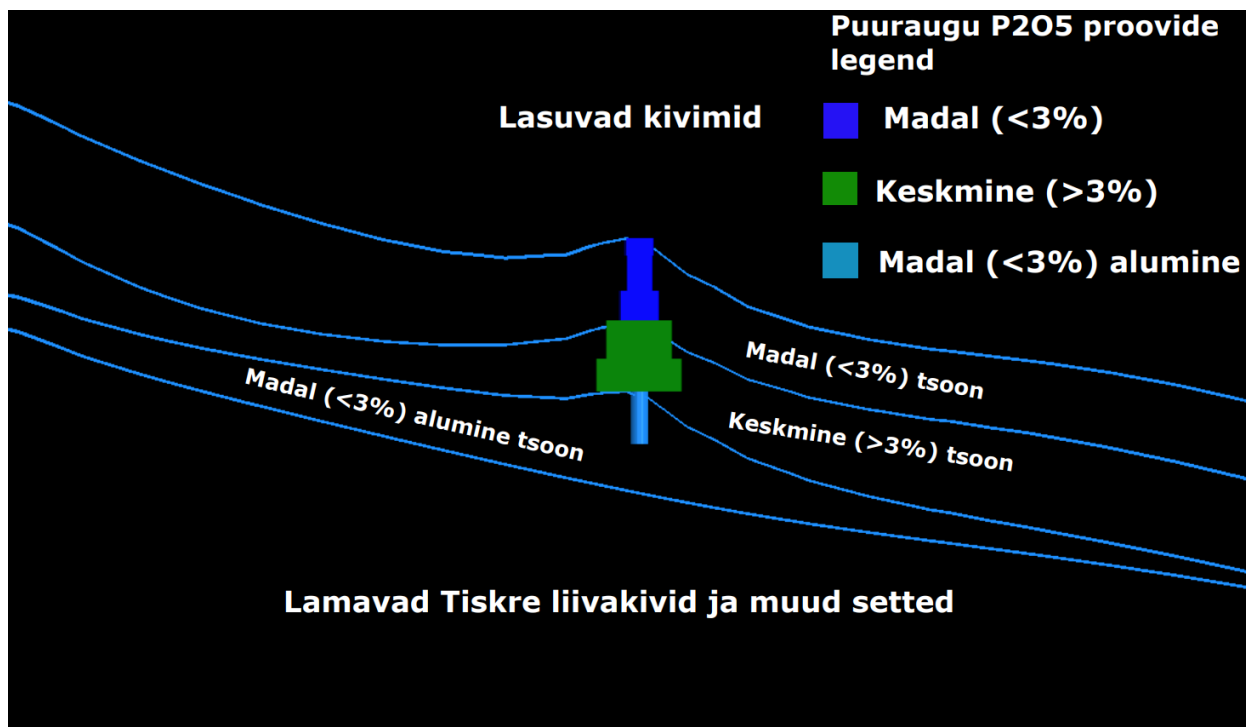
Joonis 3. Histogramm ja karpdiagramm Aseri maardla mudeliala proovide fosforiidi proovide P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> protsentuaalse sisaldusena.

Fosforiit jagati kolmeks tüübiks P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisalduse põhjal: rohkem kui 3%, vähem kui 3% ja vähem kui 3% alumises kihis (joonis 4). Põhjus eraldamiseks on mudeli abistamiseks varude hinnangute tegemisel.

Loodi ka kiht, mis sisaldas rohkem kui 9% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Selle kihi paksust uuriti Aseri mudelialal. Üldistel fosforiidi varude hinnangutel eemaldati see kiht ning proovid sellest kihist liikusid rohkem kui 3% kihti.

Kõrge P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldusega fosforiidi hindamiseks loodi mudelis suurema kui 9% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldusega fosforiit maavara soonena. Maavara soon on *Leapfrog Geo*-s eraldi geomeetria tüüp, mis võtab arvesse puuraugust saadud info, nagu fosforiidi kihi paksus ja P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus, kuid eemaldab kõik

muu litoloogia soones. Soone ülemine ja alumine pind defineeritakse andmete kaudu ning kõik, mis ülemise ja alumise pinna vahele jääb, muutetakse soonele omaseks litoloogiaks.



Joonis 4. Näide, kuidas Leapfrog Geo moodustab etteantud reeglite põhjal puuraugu andmete alusel fosforiidi kihtide pindasid. Joonis sisaldab Keskmise (>3%)  $P_2O_5$  sisaldusega kihti, madala (<3)  $P_2O_5$  sisaldusega kihti ja madal (<3%) alumist  $P_2O_5$  sisaldusega kihti, mis on sama  $P_2O_5$  sisaldusega mis alumine kiht, kuid lamab keskmisest kihist allpool

Esines puurauke, kus kivimi keemiline sisaldus oli mõõdetud sügavamale kui Kallavere. Kihid, mis lasusid Kallavere kihistust allpool, olid võrreldes Kallaverega väga madalad  $P_2O_5$  sisaldusega. Tüüpiliselt olid  $P_2O_5$  protsentuaalsed sisaldused vahetult Kallavere kihistiku all umbes 3% ning sügavuse suurenedes 1-3 meetri võrra vähenes  $P_2O_5$  sisaldus alla 1%. Maavara varude täpsemaks hindamiseks filtreeriti välja  $P_2O_5$  proovid, mis asusid Kallavere kihist allpool ja sisaldasid vähem kui 1%  $P_2O_5$ .

Täiendavalt loodi mineralisatsiooni piiri tähistav murdjoon (*polyline*) ümber fosforiiti sisaldavate puuraukude. Piir hõlmab mudelis ala, kus  $P_2O_5$  sisaldus on fosforiidis tõendatud. Eelnevalt laienes fosforiidi kihistute mudel ulatuslikult aladele, kus polnud puurauke puuritud ehk polnud kindel, kui palju kivim reaalselt sisaldab mineraliseerunud fosforiiti. Piir määrati äärmiste puuraukude ümber ja piiri kaugus äärmisest puuraukust määrati pool sellest, mis oli

äärmisel puuraugul lähima teise puurauguni. Mineralisatsiooni piirist jäeti välja puuraugud, mis sisaldasid fosforiiti, kuid asusid teistest puuraukudest eraldatult.

#### *2.3.4. Kasuliku komponendi sisalduste interpoleerimine ja plokkumudeli koostamine*

Kasuliku komponendi ( $P_2O_5$ ) sisalduste interpoleerimiseks kasutati kolme meetodit: lähima naabri (*nearest neighbor, NN*), läheduskaalude (*inverse distance weighting, IDW*) ja tavakrigingu meetodeid (*ordinary kriging, Kr*) (Rossi & Deutsch, 2017). Erinevaid interpoleerimise meetodeid rakendati selle tõttu, et oleks võimalik leida sobivaim ja tegelikke olusid kõige paremini iseloomustav meetod.

Läheduskaalude (interpoleerimis-) meetod: meetod, kus punkti väärtuse hindamisel, mida lähemal asub puurauk punktile, seda rohkem mõjutavad puuraugu andmed punkti väärtust. Läheduskaalude meetod kasutab väärtuse hindamisel ka kaugemaid puurauke, kuid puuraugu kauguse suurenemisel mõju punkti väärtusele väheneb.

Lähima naabri/loomuliku naabri (interpoleerimis-)meetod: meetod, kus leitakse punktile lähimad puuraugud ning nende väärtused. Selle põhjal, kui kaugel punkt asub puuraugust, hinnatakse ka puuraugu väärtuse mõju punkti väärtusele.

Tavakriging (interpoleerimis-)meetod: meetod sarnaneb läheduskaalude meetodile, kus kaugemad puuraugud mõjutavad väärtust vähem. Tavakriging erineb läheduskaalude meetodist, sest arvestab puuraukude kogumike infot väiksema väärtusega puuraugu kohta kui üksikut puurauku. See ennetab asjaolu, et puuraukude kaugemal asuv puuraukude kogum mõjutab punkti väärtust rohkem kui lähemal asuv teise väärtusega üksik puurauk (lisa 4).

Kogu mudeliala jaotati  $100 \times 100 \times 0.5$  m (pikkus $\times$ laius $\times$ kõrgus) suurusteks plokkideks. Plokkumudeleid, mida nimetatakse ka vokselmudeliteks, kasutatakse maavarada varude hindamiseks (Rossi & Deutsch, 2017). Igale plokile määratakse tema omadused: katendi plokkides kajastub litostatigraafiline üksus ning statistilised parameetrid.

Maardla hindamisel ei kasutatud ala, mis jäi Aseri rikkest läände. Aseri rikke lääneplokk asub sügavamal kui idaplokk (Joosu *et al.*, 2023). Kuna Aseri rikkest lääne poole jääb vähe maavara iseloomustavaid puurauke, siis hinnati üksuse info ja maavara kontuurivad plokkide interpoleeritud komponentide sisaldusi ning leiti, et eelneva põhjuse tõttu ei lisa lääneploki hindamine uurimusele väärtust.

Üle 3% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldusega fosforiidikihi kohta arvutati välja selle ruumala ja fosforiidi kui kivimi kogumass tonnides ning P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus tonnides. Kõik arvutused põhinesid *Leapfrog Geo* mudelil. Kivimi tihedusena kasutati väärtust 2 g/cm<sup>3</sup> (Puura, 1987).

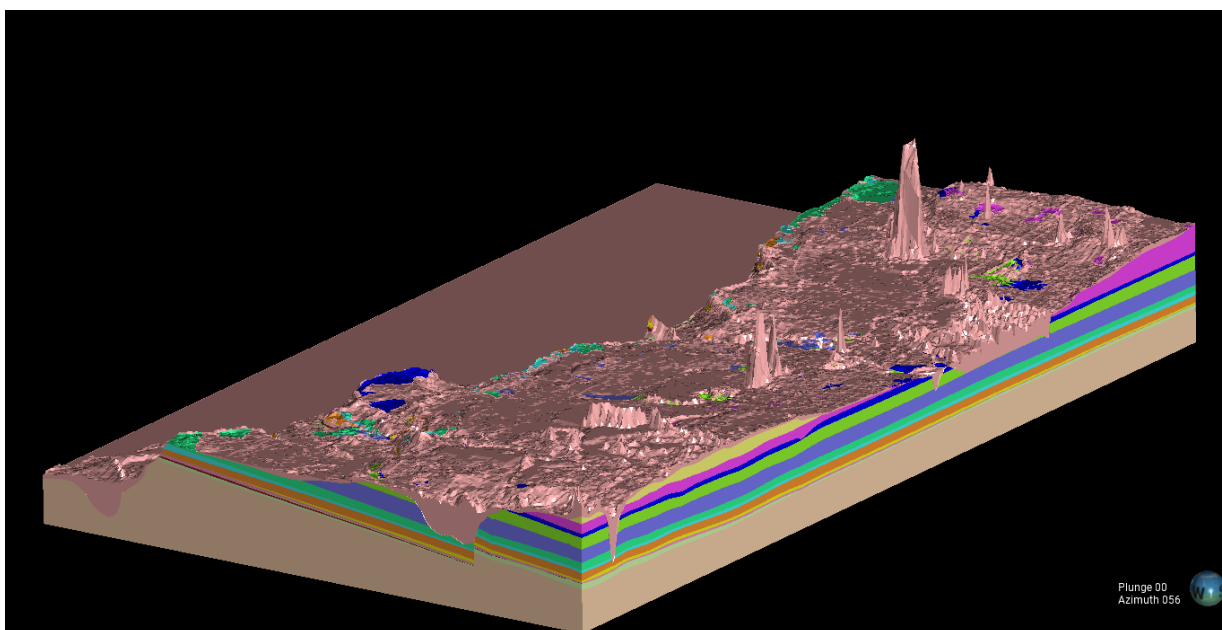
## 2.4. Ruumiline analüüs ja kahemõõtmeliste kaartide koostamine

Programmi ArcGIS Pro kasutati saadud tulemuste paremaks visualiseerimiseks. Aluskaardina kasutati Maa-Ameti geoportaalist pärinevaid andmeid (Maa-amet, 2023), andmeid Aseri fosforiidimaardla puuraukudest ning Leapfrog Geo poolt loodud mudeli andmeid.

## 3. Tulemused

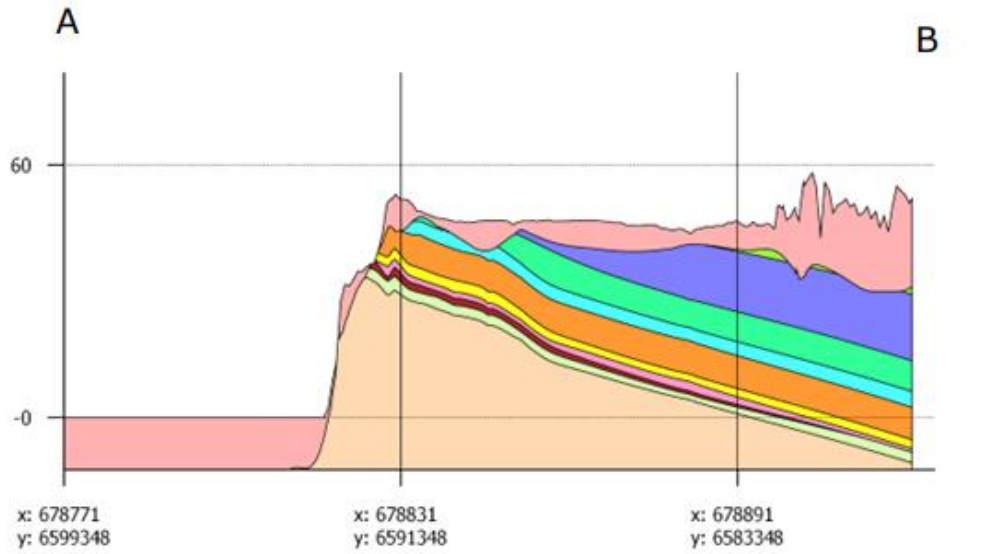
### 3.1. Üldgeoloogiline mudel

Aseri fosforiidimaardla üldgeoloogiline mudel sisaldab endas uurimuses kasutatud litostatigraafilisi üksuseid kujutavaid karkasse ja maapinna reljeefi (Joonis 5). Üldgeoloogilises mudelis olevad statigraafilised üksused alustades sügavamalt on järgmised: Tiskre ja Kambriumi setendid, Kallavere, Türisalu, Varangu, Leetse, Toila, Sillaoru, Kandle, Väo-Kõrgekalda, Viivikonna, Tatruse-Vasavere, Kahula1, Kahula2, Kvaternaar (Joonis 6). Üldgeoloogilisel mudelil on ida- ja lääneplokk, mida jagab Aseri rike.



Joonis 5. Aseri fosforiidimaardla mudeliala üldgeoloogiline mudel 40-kordse ülekõrgendusega.

# Litoloogiline läbilõige

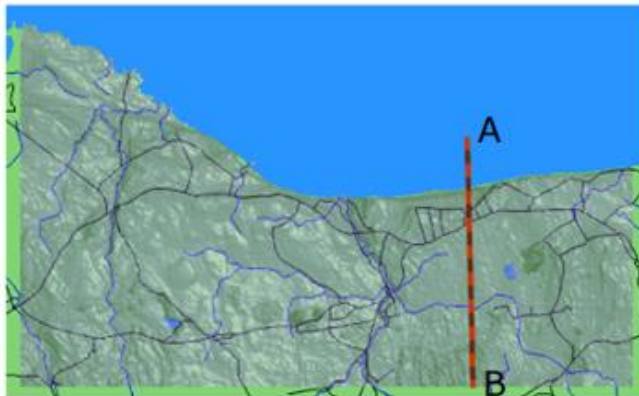


Ülekõrgendus: 100x



## Litoloogia

Kvaternaar	Kandle	Türisalu
Viivikonna	Sillaoru-Loobu	Kallavere
Vão-Kõrgekaldal1	Toila	Tiskre kuni AK
Vão-Kõrgekaldal2	Leetse	



## Asukoht

A: 678771, 6599348

B: 678927, 6578654

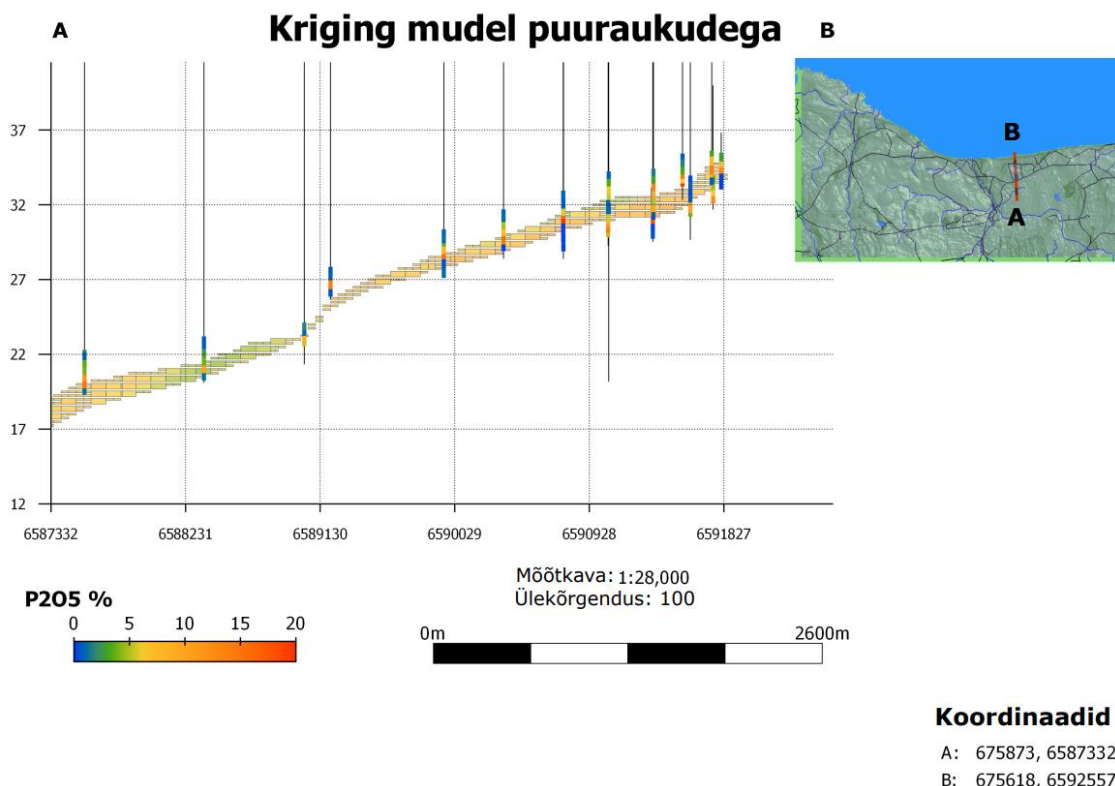
Joonis 6. Aseri fosforiidi maardla litoloogiline läbilõige

### 3.1.1. Tüüpilised vead

Teatud kohtades esinesid vastuolud, kus võis eeldada vigasid puuraugu asukohtade koordinaatides. Uuringu numbriga EGF 3348 (Eskel *et al.*, 1975) puuraugud olid eelnevalt teada kui nihkes koordinaatidega puuraugud (Vind *et al.*, 2023). Nihkes koordinaatidega puuraukude reaalselt asukohta ei olnud võimalik kindlaks teha ning need puuraugud ignoreeriti mudelis. Osades puuraukudes oli mitu statigraafilist üksust kokku liidetud, mis antud töö juures oleksid pidanud eraldi üksused olema. Üksuste täpseid paksuseid algandmete põhjal eraldada ei olnud võimalik ning liidetud üksustega kihid ignoreeriti. Algandmete automatiseeritud digitaliseerimise käigus võis juhtuda, et paber kandjalt loeti numbreid vigaselt maha ja puuraugu kihtide lasumi sügavus digitaliseeritud versioonis erines originaalist. Valesti digitaliseeritud arvud kontrolliti Eesti Geoloogiafondis leiduvate algandmete põhjal üle ning parandati digitaliseeritud versioonis (Eesti Geoloogiateenistus, 2022) (Vead puuraukudes ja muudatused, lisa 1).

### 3.2. Plokkimudel ja varude hinnang

Uurimistöö tulemusena valmis Aseri maardlat iseloomustav (voksel-) plokkimudel, mis on defineeritud 100×100×0.5 m suuruste plokkidena. Igale plokile on omistatud P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kontsentratsioon, mis on arvutatud (interpoleeritud) ploki läheduses olevate puuraukude andmete põhjal. Voksel-plokkimudeli abil tehakse fosforiidikihindite mudel kogu maardlale, mille abil saab varude hinnanguid teha. (Joonis 7)



Joonis 7. Aseri maardla kriging vokselmudel koos lähteandmeteks olevate puuraukudega.

Fosforiidi  $P_2O_5$  varude hinnang tehti modelleeritud üle 3%  $P_2O_5$  sisaldusega maavarasihindi piires. Täiendavalt võrreldi modelleeritud varude suurusi ametlikult Maavarade registris arvel olevate maavaraplokkide andmetega. Maavarade registri plokkide piirid on sätestatud Maa-ameti poolt hallatavas registris ning eelnevad mahuarvutused on samade plokkide põhjal tehtud.

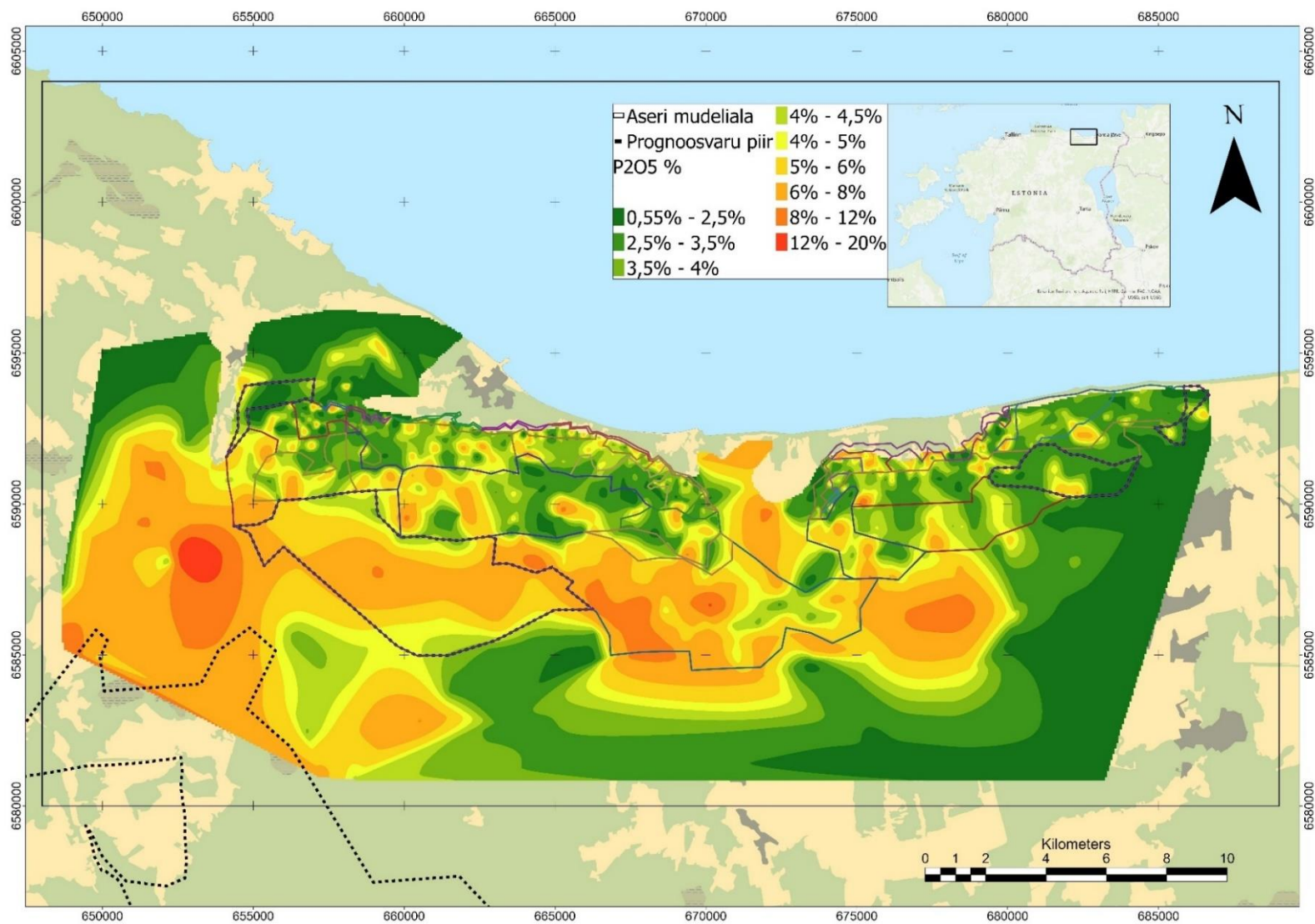
Uurimistöös koostatud mudeli põhjal on kokku fosforiidi maaki 433,566,250 tonni ning selle keskmine  $P_2O_5$  sisaldus on 7.3%. Kokku on puhast  $P_2O_5$  umbes 31,000,000 tonni. Võrreldes Aseri maardla registrikaardiga on see 200 kilotonni ehk ligikaudu 0,7% rohkem (*Maavarade Register, Maa-Amet 01.11.2022*) (Lisa 2, lisa 3).

Ametlikest maardla piiridest välja jäänud ala  $P_2O_5$  varu suurus on ligikaudu 8,400,000 tonni ning keskmine  $P_2O_5$  sisaldus fosforiidis on 7.9%. Maardla piiridest väljas olevaks varuks peeti kogu fosforiiti, mis registris arvel olevatest maavaraplokkide piiridest välja jäi. Ametlikest maardla piiridest väljas on 27.1% modelleeritud  $P_2O_5$  kogusest (Lisa 2, lisa 3).

## **4. Arutelu**

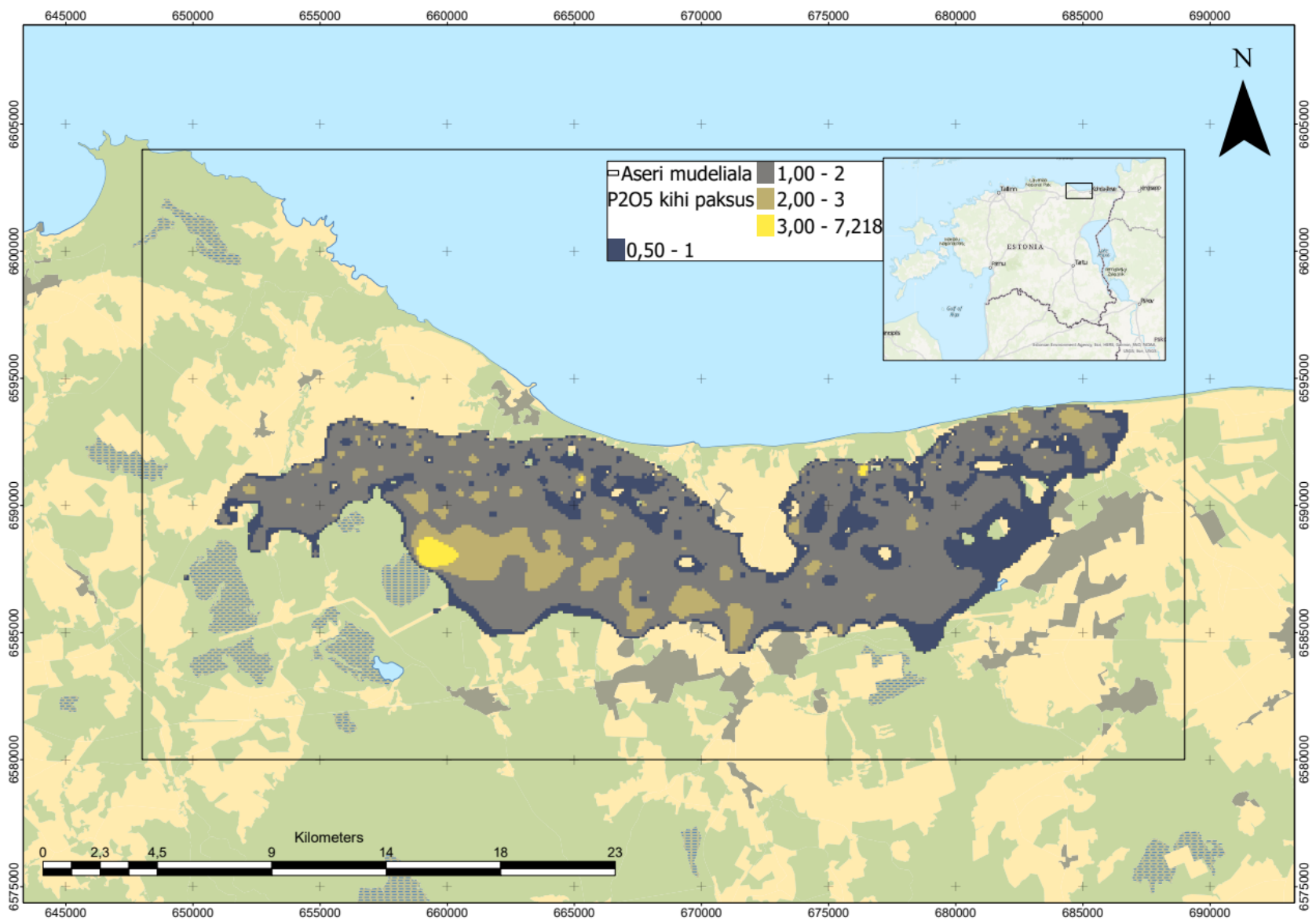
### **4.1. Fosforiidikihi üldine koostis ja ehitus**

Maardla lõunaosas on keskmiselt kõrgemad  $P_2O_5$  sisaldused võrreldes maardla põhjaosaga. Eriti kontsentreerunud  $P_2O_5$  sisaldused esinevad maardla edelapoolses ääres, kus suurim  $P_2O_5$  sisaldus on 20%. Seda ala mõjutab aga Rakvere maardla lähedus, mis on teadaolevalt kõrgemate  $P_2O_5$  sisaldustega ning paksema tootsa kihiga. Samuti ei ulatu Aseri maardla ametlikud piirid nimetatud kõrge  $P_2O_5$  sisaldusega piirkonda. Aseri maardla idapoolne osa on ala kõige madalamate  $P_2O_5$  sisaldustega. (Joonis 8)



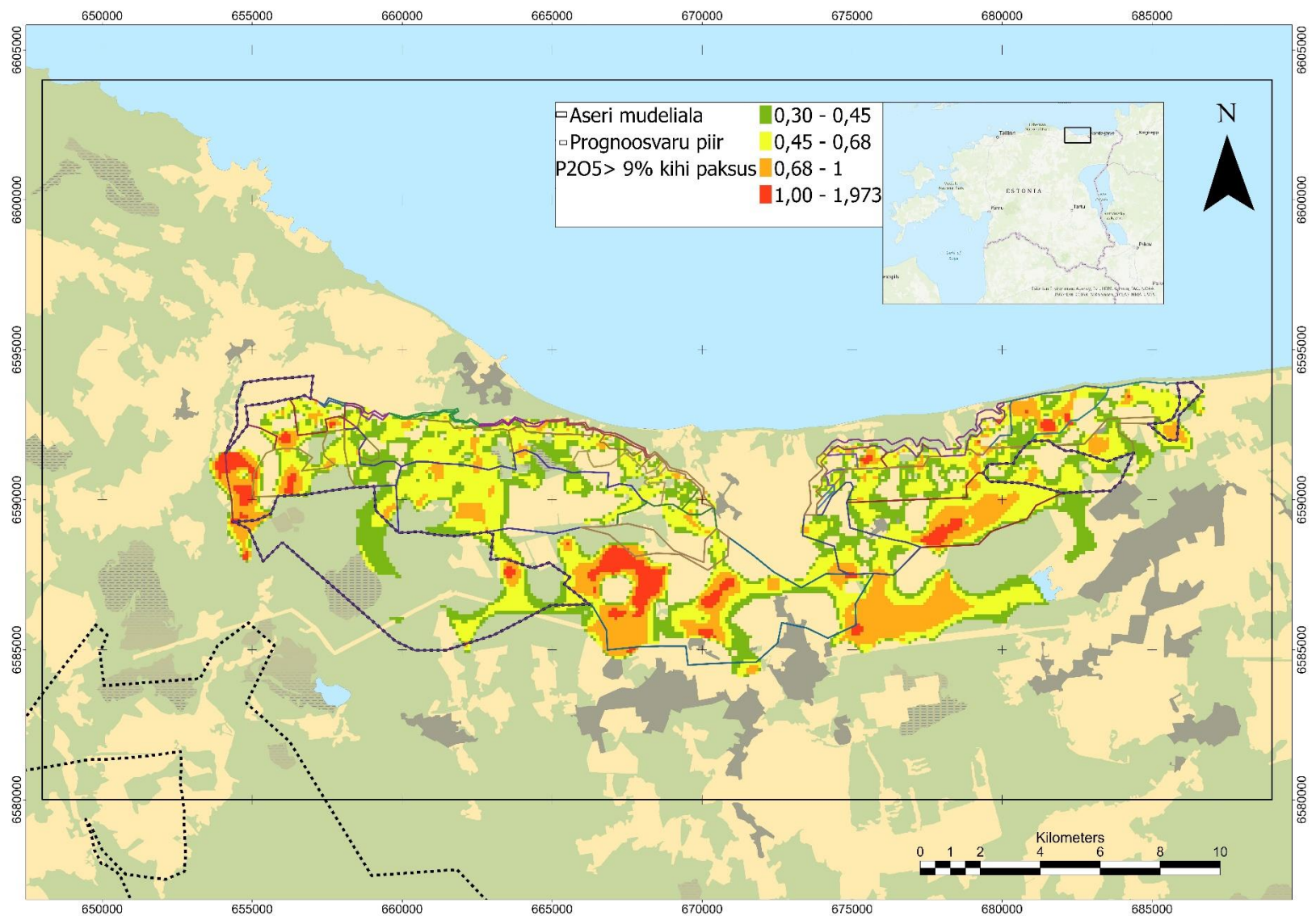
Joonis 8. Aseri fosforiidi maardla  $P_2O_5$  kontsentratsioon maavara plokkidega, interpoleeritud Lähima naabri meetodil. Lähteandmeteks on proovi pikkusega kaalutud keskmised  $P_2O_5$  sisaldused üle 3% sisaldusega fosforiidi kihindis

Kihi paksuste kaart tehti kõikide  $P_2O_5$  sisaldavate kihindite piires. Aseri  $P_2O_5$  sisaldusega fosforiidikihi paksused jäävad maardla piires enamasti 1-3 m vahemikku. Kihindi paksused on maardla lõunaosas suuremad kui põhjaosas, mis küll idaosas niivõrd hästi välja ei joonistu. Maardla edelapoolses ääres on modelleeritud paksem fosforiidikiht, mis ulatub kuni 7 meetrini. Kuigi mudeli järgi on seal 7 meetri paksune fosforiidikiht, siis reaalselt nii paksu kihti seal ei esine. Tõenäoliselt on mudel andmete puudumist valesti tõlgendanud kihi jätkumisena (Joosu *et al.*, 2023). (Joonis 9)



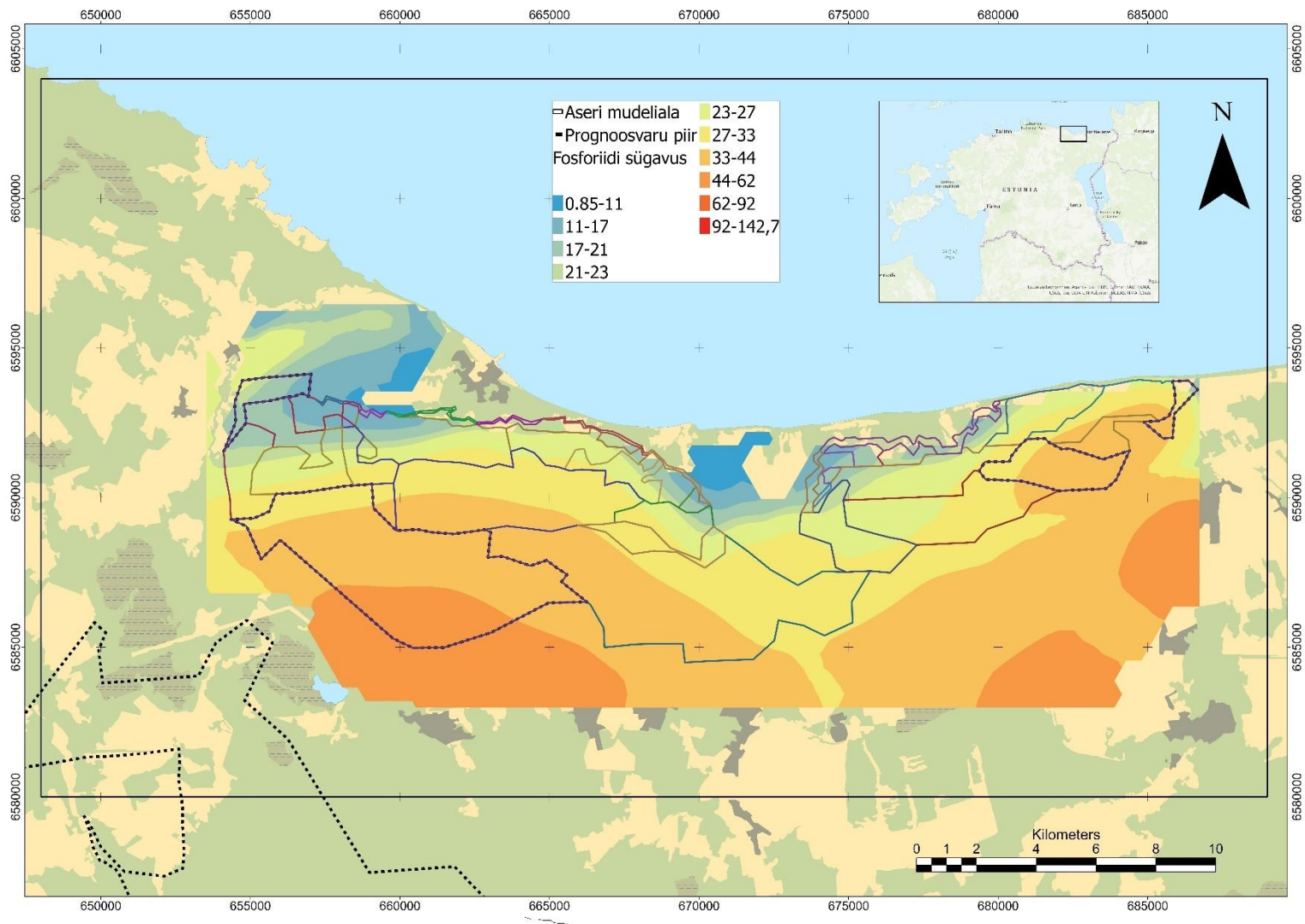
Joonis 9. Aseri fosforiidimaardla > 3% fosforiidikihindi paksus meetrites

Kõrge  $P_2O_5$ , ehk  $>9\%$   $P_2O_5$  sisaldusega fosforiidikihind on maardlas üldiselt õhuke, enamus kihist on vähem kui meetri paksune. Kõrge  $P_2O_5$  sisaldusega kihind on paksem maardla lõunaosas. Kõrge fosforiidisisaldusega kihind ei ole ruumiliselt pidev, selle sees leidub tühimikke. Sellest võib järeldada, et kõrgema  $P_2O_5$  sisaldusega alade paiknemine on mõnevõrra juhuslik ning ei saa välja pakkuda selget esinemise seaduspära. Võrdluseks võib tuua Rakvere fosforiidimaardla, kus üle maardla on reeglipäraselt kõrgema  $P_2O_5$  sisaldusega fosforiidikihid lasundi ülemises osas (Joosu *et al.*, 2023). Aukliku kihi ehituse tõttu ei ole võimalik teha usaldusväärseid mahuhinnanguid kõrge  $P_2O_5$  sisaldusega kihis. (Joonis 10)



Joonis 10. Aseri fosforiidimaardla kihindi paksus, kus  $P_2O_5$  on >9%. Sisaldab plokkide piire joonena ning prognosvaru piiri katkendjoonena

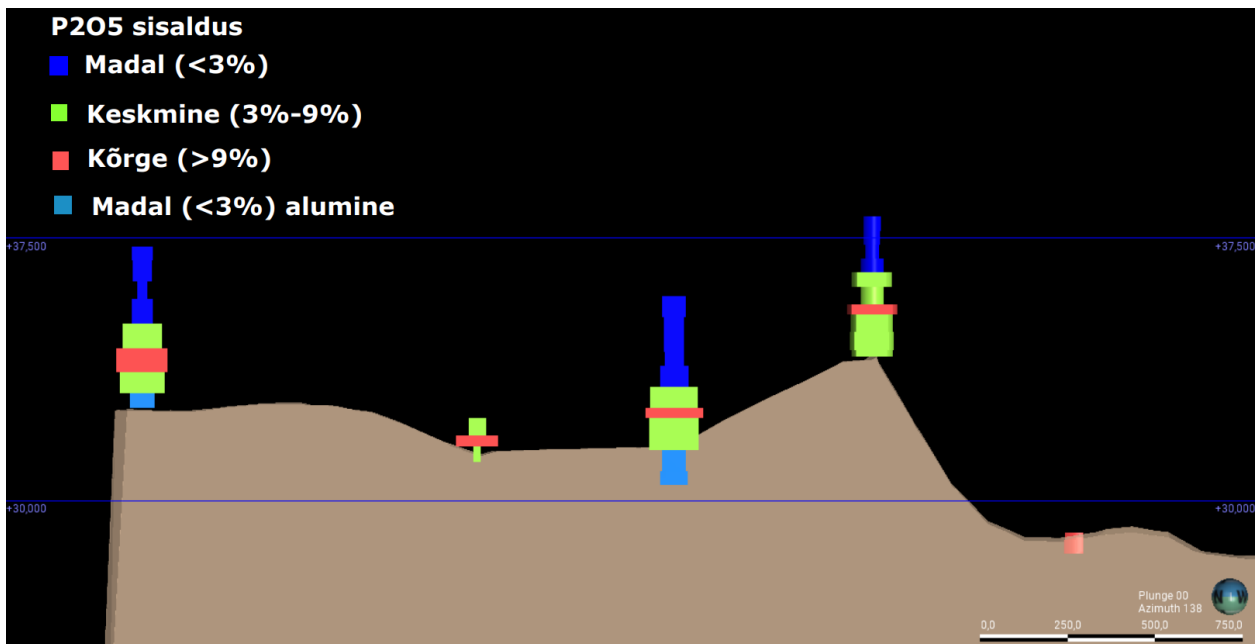
Aseri fosforiidi maardlas on fosforiidi kihid kaldu lõunasse. Maardla põhjaosas on fosforiit vaid meetri sügavusel kui maavara plokkide lõunapiiriks on sügavus kuni 62 meetrit. Prognoosvaru alad osaliselt ulatuvad kuni 92 meetrit. Suuremal osal maardla plokkidel lasub 21–44 meetrit settekivimeid. (Joonis 11)



Joonis 11 Fosforiidi kihi sügavus maapinnast Aseri fosforiitimaardlas, meetrites

## 4.2 Trendid

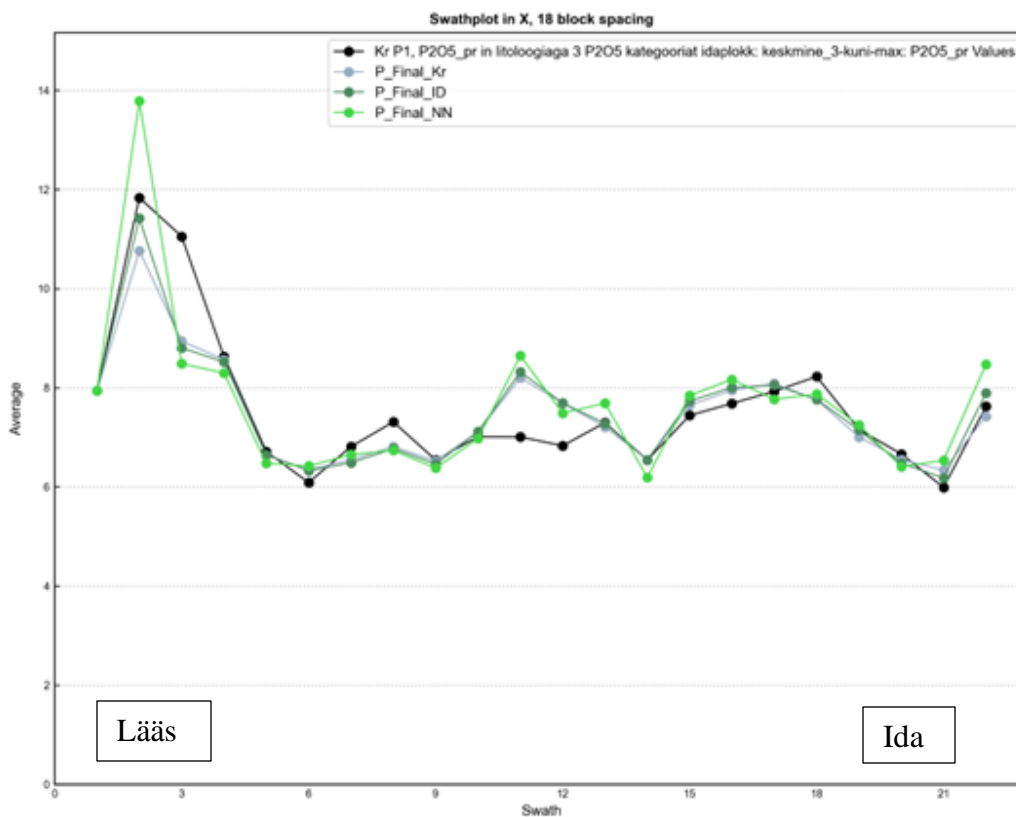
Fosforiidi protsentuaalne koostis esines tüüpiliselt nii, et kõige suurema  $P_2O_5$  sisaldusega fosforiit asus kihi keskel ning kõrguse muutudes muutus  $P_2O_5$  sisaldus väiksemaks (Joonis 12).



Joonis 12. Tüüpilised Aseri fosforiidimaardla puuraugud. Fosforiidi kihi keskel on suurima  $P_2O_5$  kontsentratsiooniga fosforiit ning kõrguse muutudes  $P_2O_5$  kontsentratsioon väheneb, pildil kujutatud kiht on Kallavere kihi all lamavad setted

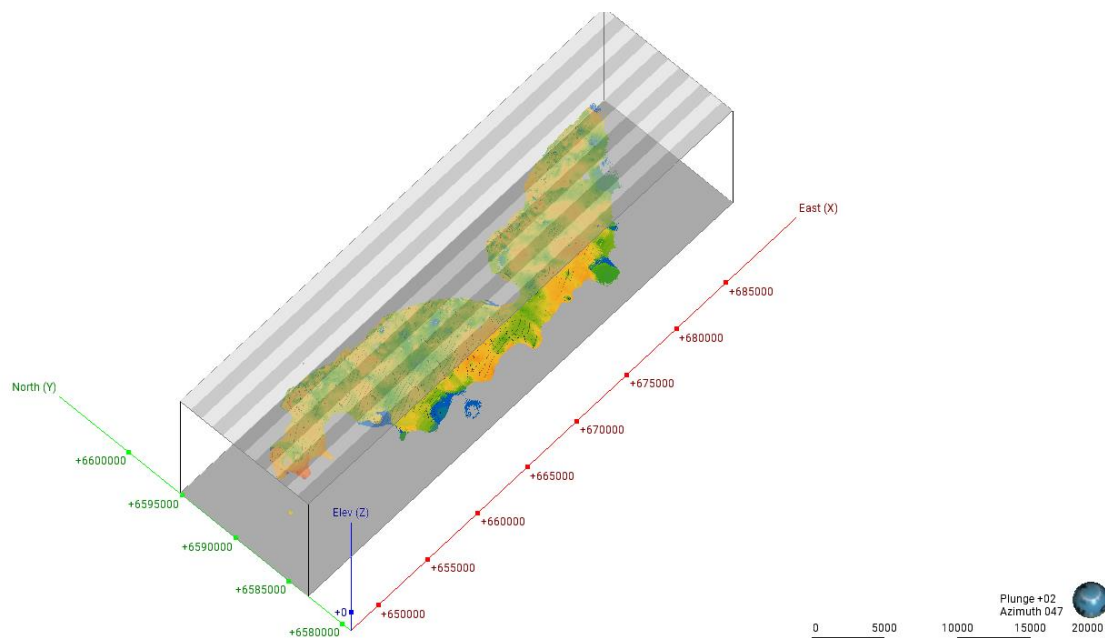
Plokkumodeli interpoleeritud sisalduste tulemusi võrreldi kasutades hinnatud  $P_2O_5$  sisaldusi graafikutel, mis olid orienteeritud põhja-lõuna, ida-lääne ja vertikaalsuunaliselt. Graafikutele lisati ka realselt mõõdetud puuraukude keskmised tulemused samal alal. Lähima naabri meetod hinnati selle põhjal ebatäpseks võrreldes teiste meetoditega ning selle põhjal

mahuhinnanguid ei tehta (joonis 13).



Joonis 123. Viildiagramm lääne-ida-suunas koos tavakrigingu [P\_Final\_kr], naturaalse naabri [P\_Final\_NN] ja läheduskaalude [P\_final\_ID] modelleeritud tulemustega ja puuraukude keskmine koostis samal distantstil (mustad täpid ja jooned)

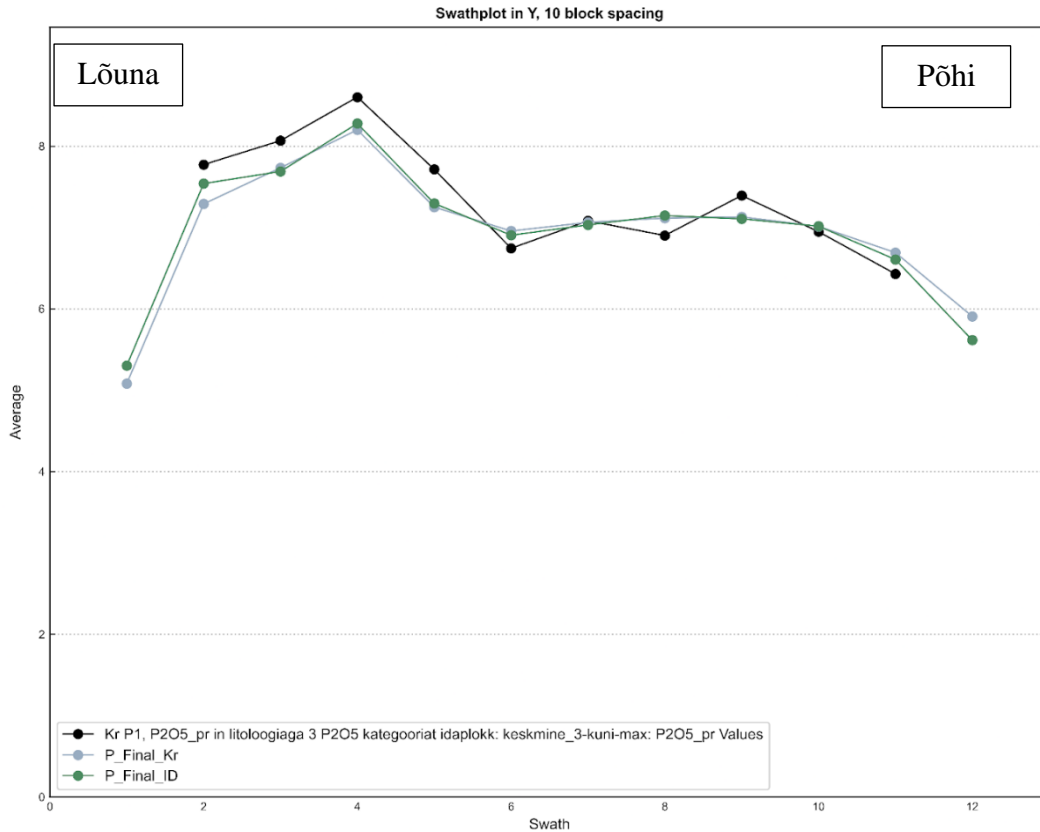
Trendid maardla P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> protsentuaalse koostise kohta on esitatud viildiagrammina (*swathplot*, samuti ka *drift/trend plot*). Viildiagramm jagab plokkmudeli valitud suunas võrdse laiusega lõikudeks (Joonis 14). Üks viil loob keskmise kõikidest tulemustest, mis selle alal on ning esitab selle andmepunktina. Selle abil on võimalik näidata, kuidas muutub P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> protsentuaalne koostis mingis suunas liikudes.



Joonis 134. Viildiagramm vaadatuna kaardil. Üks triip kaardi kohal esindab ühte viilu. Viilude all kujutatud kriging mudel Aseri fosforiidimaardlast

#### 4.2.1 Lõuna-põhja-suunalised trendid

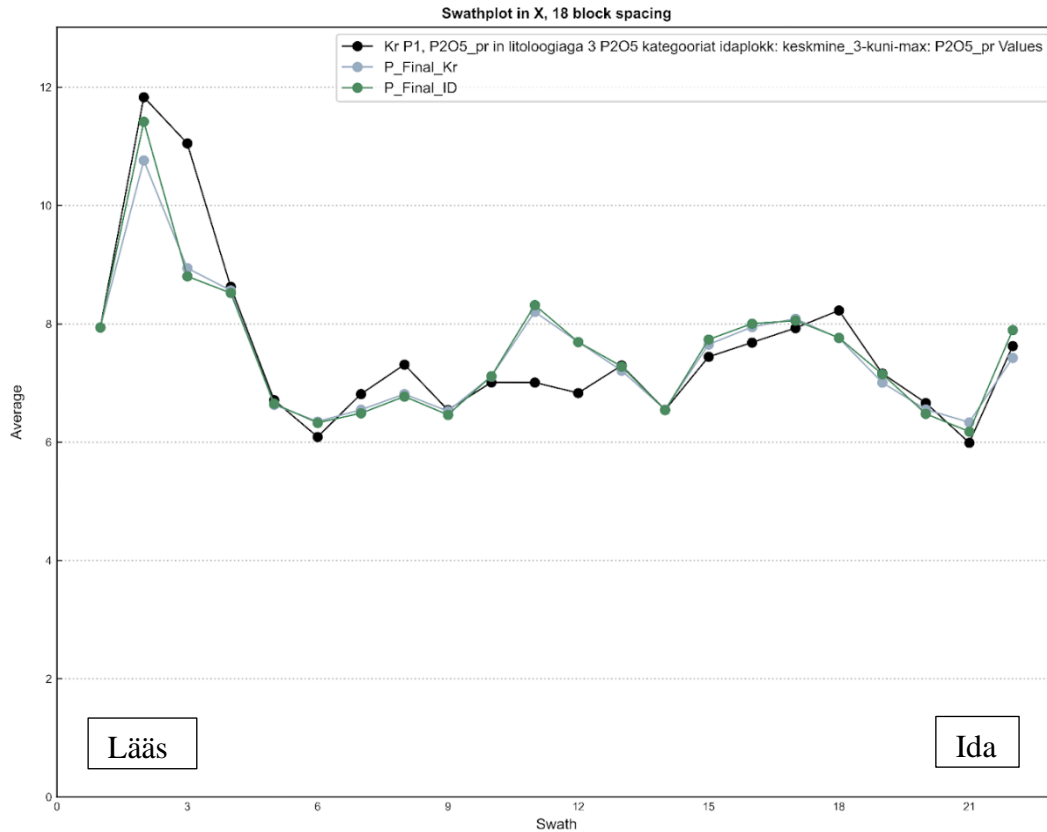
Aseri fosforiidimaardlas on näha fosforiidi kvaliteedi ehk  $P_2O_5$  protsentuaalse koostise langust lõunast põhja suunas. Esile võib tõsta ka maardla lõuna osast põhja poole liikudes 1%-1,5% suuruse languse  $P_2O_5$  sisalduses. Langusest lõunas on  $P_2O_5$  sisalduses platoo umbes 8% väärtuste juures ning põhja poole langusest esineb järgmine platoo umbes 7% juures. Nii põhja kui ka lõuna suuna otstes olevad madalad  $P_2O_5$  sisaldused märgistavad maardla ääri. Lõuna-põhja-suunalise viildiagrammi kõrged kontsentratsioonid lõunas on tingitud maardla lõunaosas olevast kõrge kontsentratsiooniga alast (Joonis 15) (lisa 5).



Joonis 15. Viildiagramm lõuna-põhja-suunas koos tavakrigingu [ $P\_Final\_kr$ ] ja läheduskaalude [ $P\_final\_ID$ ] modelleeritud tulemustega ja puuraukude keskmine koostis samal distant sil (mustad täpid ja jooned)

#### 4.2.2 Lääne-ida-suunalised trendid

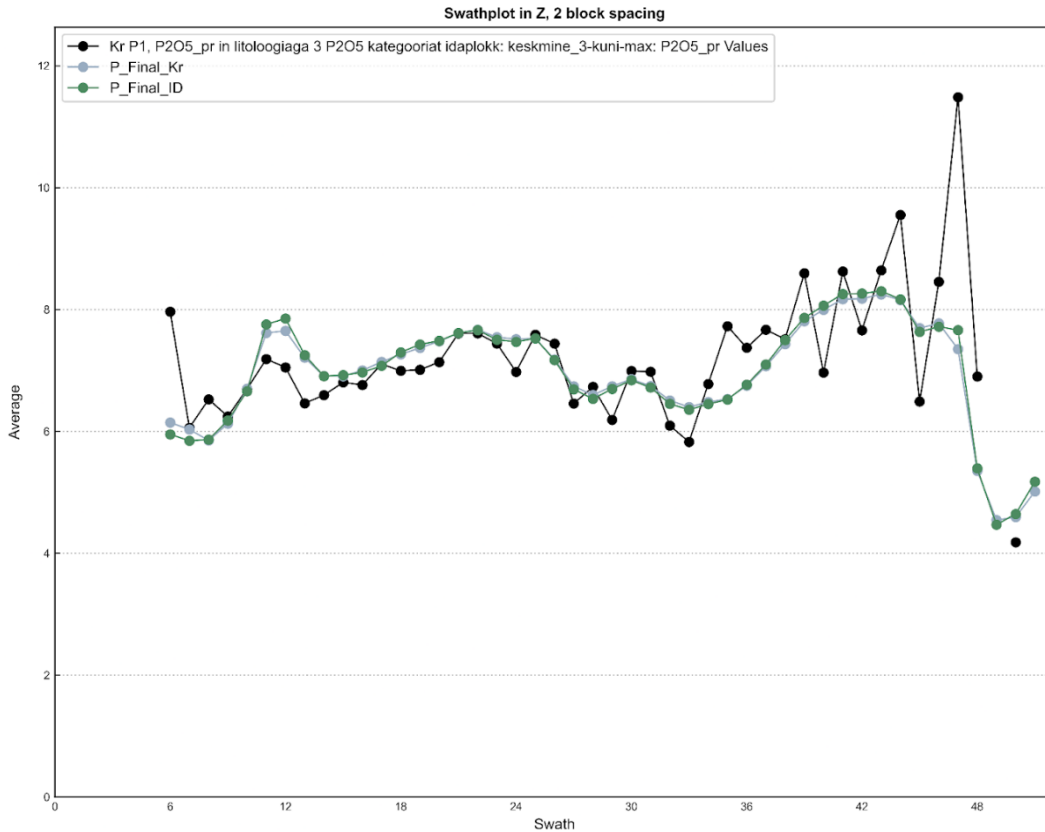
Fosforiidi  $P_2O_5$  sisaldus lääne-ida suunal on ebakorrapärane, kuid enamasti vahemikus 6-8%. Läänepoolses maardla osas on kõrgemad fosforiidi sisaldused. Kõrgeima  $P_2O_5$  väärtusega punktis on 10 proovi keskmine  $P_2O_5$  sisaldus 11.8%. Kõrged väärtused langevad viiendaks viiluks ning  $P_2O_5$  sisaldus ida suunal on 6%-8% kogu kivimi massist. Viil 11 juures hindab mudel sisaldusi üle võrreldes tegelikult puuraukudes mõõdetud sisaldustega (Joonis 16) (lisa 6).



Joonis 146. Viildiagramm lääne-ida suunas koos kirging [P\_Final\_kr] ja läheduskaalude [P\_final\_ID] mudeldatud tulemustega ja puuraukude keskmine koostis samal distantsil)

#### 4.2.3 Sügavustrendid

Sügavustrendid on esitatud absoluutkõrguste lõikes. Sügavuse suurenedes Kallavere kihistus on fosforiidi  $P_2O_5$  sisaldus platool 7% juures, kuid Kallavere kihi alumises otsas suureneb  $P_2O_5$  sisaldus hüppeliselt 8% juurde. Esinev väike platoo 8% juures, kuid sügavuse suurenedes Kallavere kihistu lõpeb ning fosforiidi proovid muutuvad järsult 4% juurde (Joonis 17).



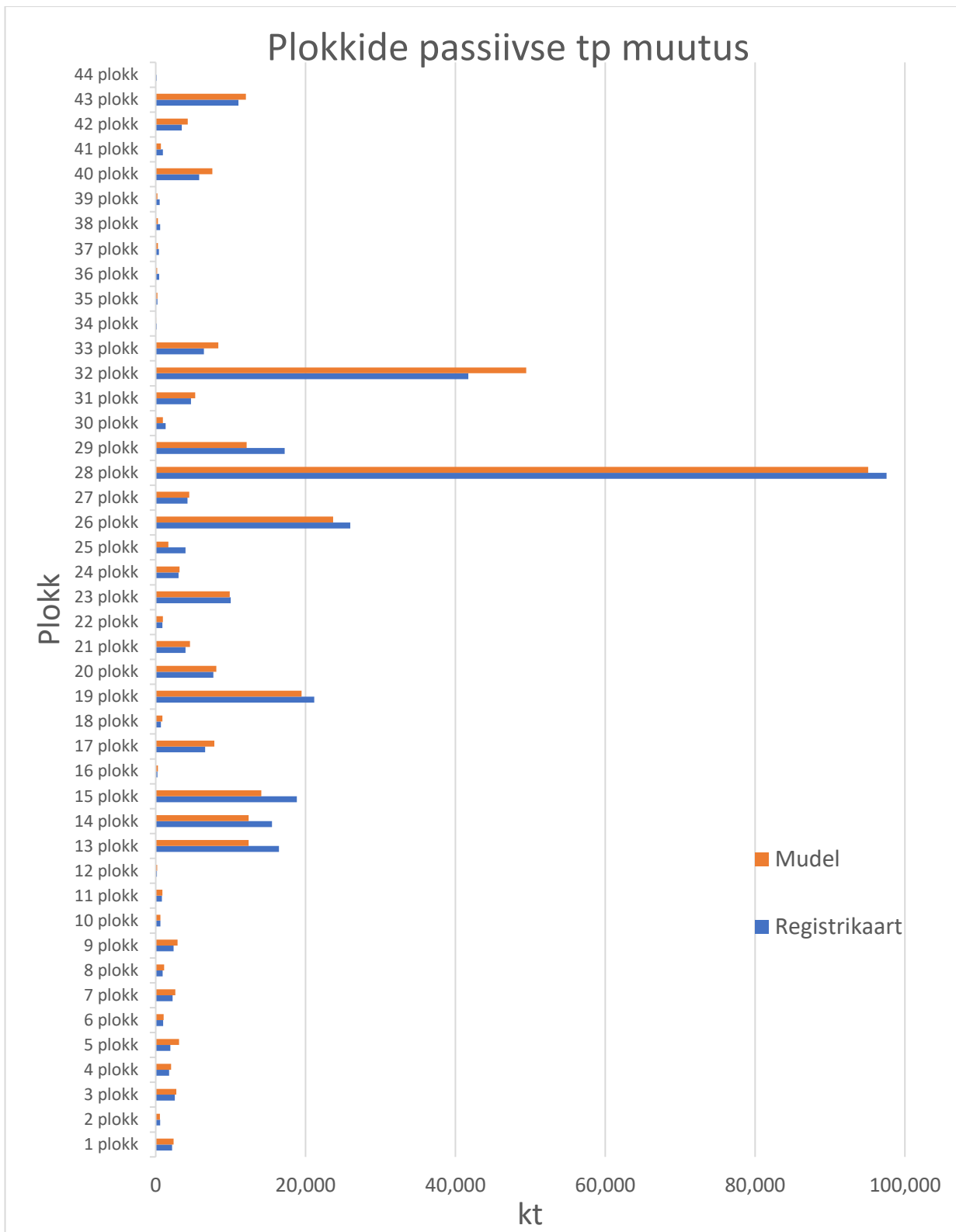
Joonis 17. Viildiagramm sügavuse suurenedes koos kirging[*P\_Final\_kr*] ja läheduskaalude [*P\_final\_ID*] mudeldatud tulemustega ja puuraukude keskmine koostis samal distantstil (mustad täpid ja jooned)

### 4.3. Maavarade Regstris arvel olevate plokkide ning uurimistöös koostatud plokkumudeli varude võrdlus

Maavarade registri andmeid Aseri fosforiidimaardla plokkidest võrreldi mudeli arvutatud andmetega. Tulemusi näidatakse eraldi väikestes plokkides, sest suurte plokkide kõrval pole võimalik näha erinevusi väikeste plokkide massides. Eristus väikeste plokkide ja suurte plokkide vahel tehti umbes 5000 kilotonni alusel.

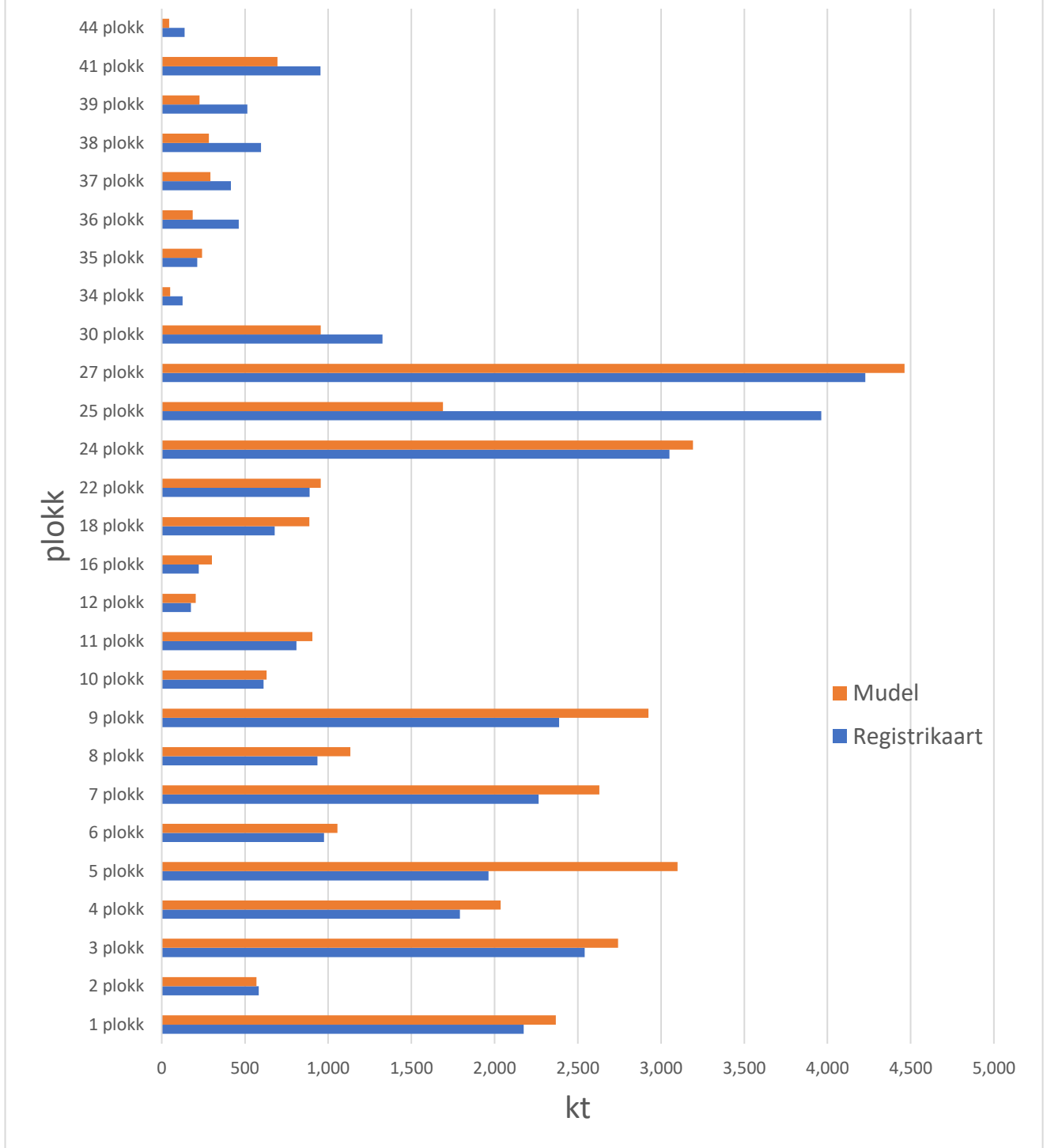
#### 4.3.1. Maavara plokkide kivimi kogumassi muutused

Aseri fosforiidimaardla plokkide kogumass tonnides erineb märkimisväärselt vähestes plokkides. Maagi kogumass vähenes märkimisväärselt mudelis järgnevates plokkides: 13, 14, 15, 25, 29 ja 30. Maagi kogumass suurenes märkimisväärselt mudelis järgnevates plokkides: 5, 7, 9, 32. (Joonis 18, Joonis 19, Joonis 20)

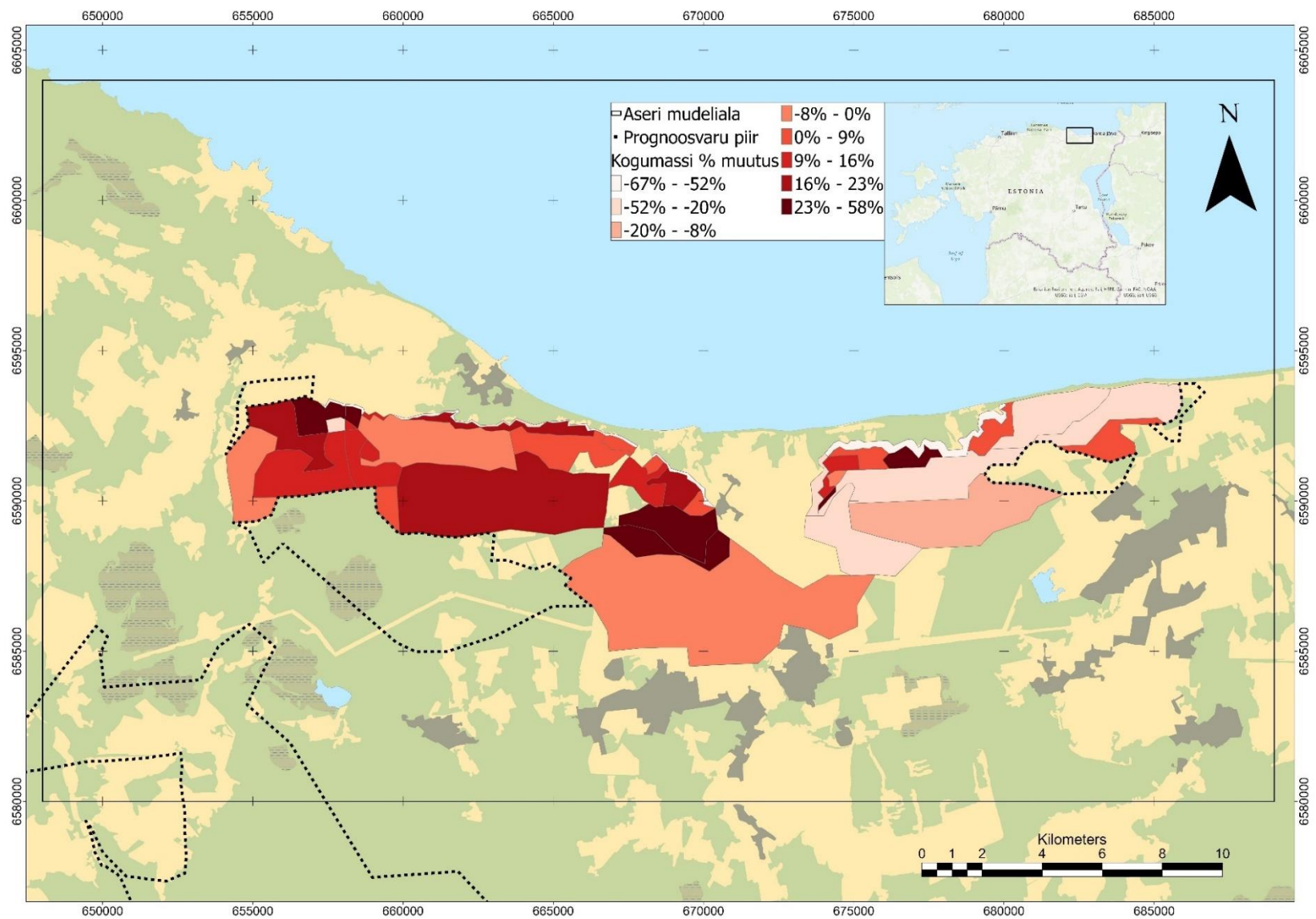


Joonis 158. Aseri fosforiidimaardla fosforiidi kogumassi muutus tonnides kõikides plokkides

## Väiksete plokkide passiivse tp muutus



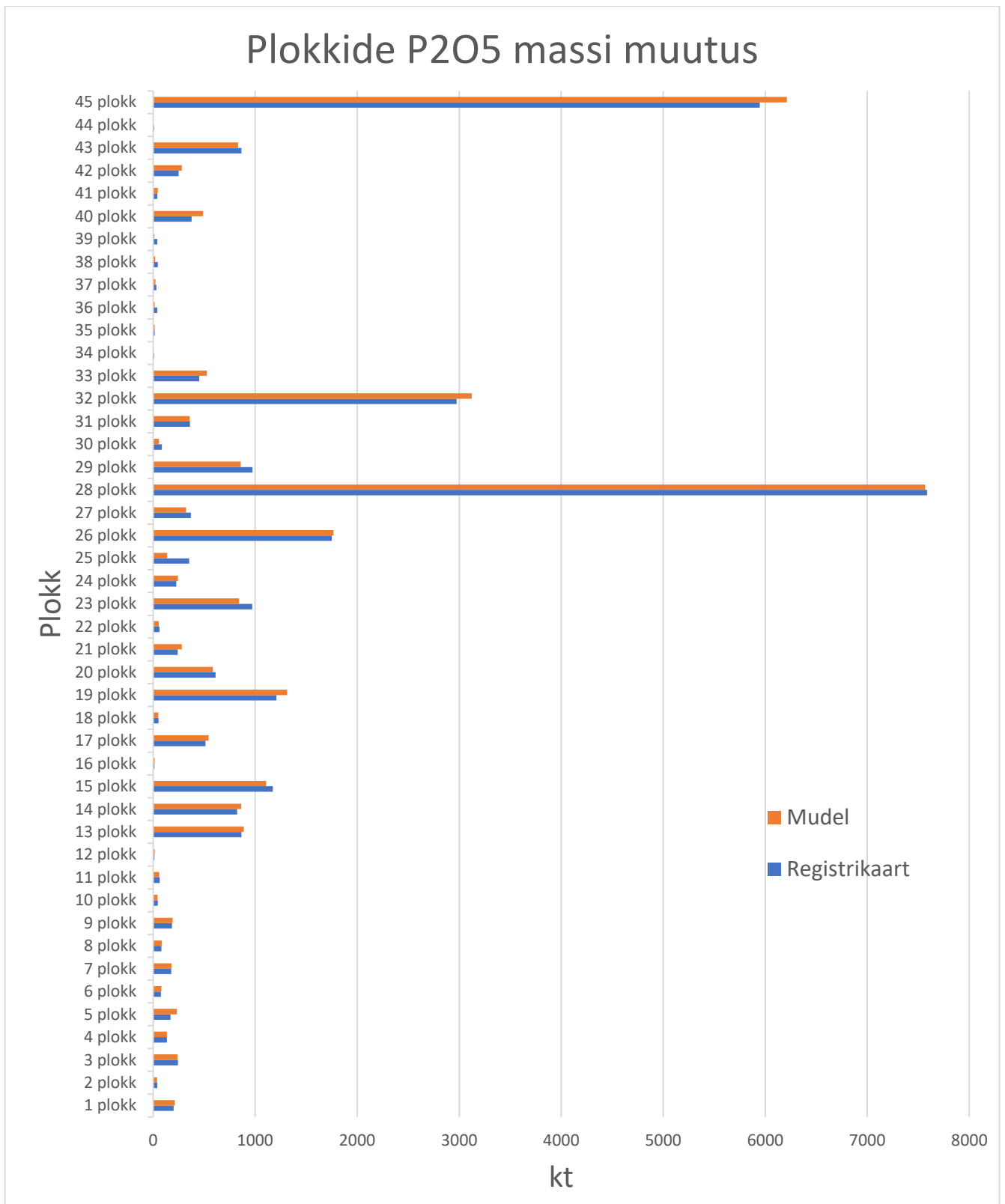
Joonis 1916. Aseri fosforiidimaardla fosforiidi kogumassi muutus tuhandetes tonnides väikestes plokkides



Joonis 20. Aseri fosforiidimaardla tarbevaru massi muutus

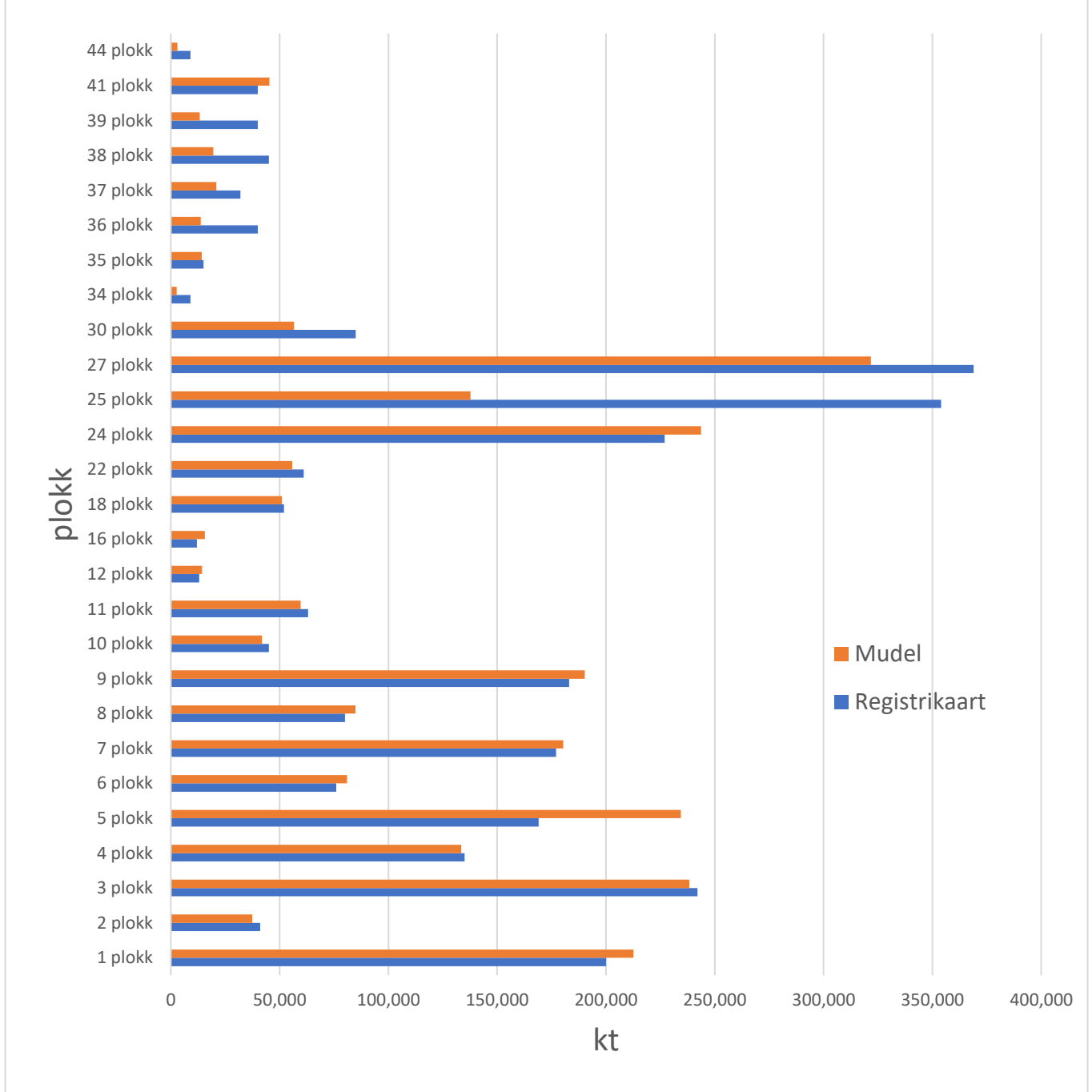
#### 4.3.2. Maavara plokkide P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> massi erinevused

Aseri fosforiidimaardla plokkide kogumass erineb märkimisväärselt vaid väikestes plokkides. Maagi kogumass vähenes märkimisväärselt mudelis järgnevates plokkides: 25, 27, 30, 34, 36, 37, 38, 39 ja 44. Maagi kogumass suurenes märkimisväärselt mudelis plokis 5. (Joonis 21, Joonis 22, Joonis 23)

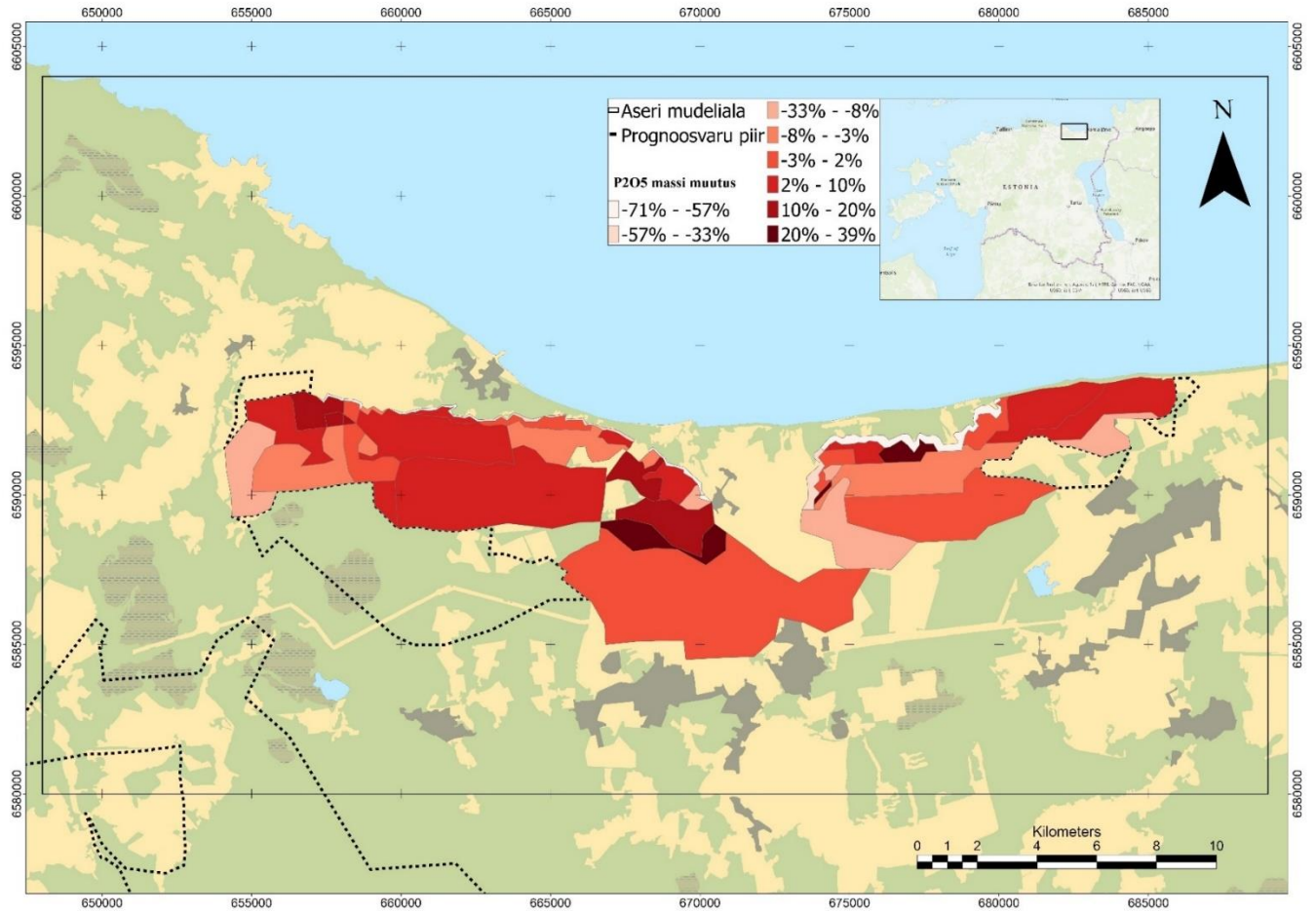


Joonis 171. Aseri fosforiidimaardla fosforiidi P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> massi muutus tonnides kõikides plokkides

## Väiksete plokkide P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> massi muutus



Joonis 182. Aseri fosforiidimaardla fosforiidi P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> massi muutus tonnides väikestes plokkides



Joonis 193. Aseri fosforiidimaardla fosforiidi  $P_2O_5$  massi muutus tonnides väikestes plokkides

Maavarade registris plokk number 32 loeti valesti sisestatuks. Võrdlemisel mudeli tulemusega leiti, et 32. ploki kogumass peaks olema ühe suurusjärgu võrra suurem. Kogumassi korrutati 10-ga, et oleks võimalik võrrelda 32. ploki registrikaardi andmeid mudeli andmetega. (Tabel 4) (Maavarade Register, Maa-Amet 01.11.2022)

Tabel 4. Maavarade registrikaardi andmed 32. ploki kohta Aseri fosforiidimaardlas

			Kogumass tuhandetes tonnides	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mass tuhandetes tonnides
Kuupäev	Eraldise, välja või maavara nimetus	ühik	Passiivne Tp	Täiendavad andmed
01.01.2019	32 plokk	tuhat tonni	3872	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : Tp-varu 2761 tuhat tonni

Maavarade registris arvel olevad Aseri fosforiidimaardla maavara plokid vajaksid töötlemist. Aseri maardla põhjaosas on palju väikesed maavara plokkid, mis tuleks liita kokku suuremate plokkidega selleks, et maardla plokid paikneksid loogilisemalt. Maardla idapoolne osa ei ole praeguse mudeli järgi kõige perspektiivikam maardla osa, kuid asub plokkmudeli sees. Maardla läänepoolsel osal on potentsiaal kvaliteetsemale fosforiidi maagile. Plokkide paiknemisel saab edasi uurida, kas on võimalik maavara plokkid paigutada kvaliteetsema maagiga aladele.

### 4.3. Võimalik maardla kasutuselevõtt

Aseri fosforiidimaardla maavara kihid on küllaltki õhukesed ning P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldused pigem madalad, et konventsionaalsel viisil fosforiiti kaevandada. Maardla kõige kvaliteetsemad kihid asuvad maardla kõige sügavamas lõunapoolses osas. Karjääri meetodil kaevandamiseks tuleks liiga palju lasuvat pinnast eemaldada, et rikkale kihile ligi pääseda. Allmaa kaevanduse rajamise jaoks on samas kihid liiga õhukesed, et kaevandamistehnikat mahutada ning selle tõttu oleks vaja eemaldada fosforiidil lasuvad kihid või kihid, millel fosforiit lasub (Adamson, 1997).

Alternatiivne moodus Aseris fosforiidi kaevandamiseks oleks näiteks robotkaevandajad, mida arendatakse Robominers projektis. Robominers on Euroopa Liidu poolt rahastatud projekt, mis proovib luua roboteid, kes saaksid kaevandada maavarasid raskesti ligipääsetavates tingimustes (Robominers, 2023). Robotkaevurid saaksid õhukeses Aseri maardla fosforiidi kihis tegutseda ilma, et sinna oleks vaja mahutada konventsionaalseid kaevandamismasinaid (Paat *et al.*, 2021).

## 5. Kokkuvõte

Uurimistöö eesmärgid olid Aseri maardla fosforiidi kihindite ruumiline analüüs ajalooliste andmete põhjal ja Aseri maardla fosforiidi varude hindamine mudeli põhjal. Uuringu käigus loodi ka Aseri fosforiidimaardla üldgeoloogiline mudel, mis sisaldas 15 stratigraafilist kihti.

Fosforiidi kihindite ruumilise analüüsi käigus uuriti fosforiidi kihindi paksust ning  $P_2O_5$  protsentuaalset sisaldust Aseri maardla mudeliala sees. Fosforiidikihi paksus ja  $P_2O_5$  protsentuaalne sisaldus on suurem maardla lõunaosas võrreldes maardla põhjaosaga. Maardla kõige paksemad ja kvaliteetsemad fosforiidikihid asuvad maardla edelaosas. Fosforiidikiht on kaldu lõunasse ning Aseri maardla alal lõuna poole liikudes suureneb ka fosforiidi sügavus.

Aseri fosforiidimaardla varud hinnati kasutades voksel mudelit ning tulemused interpoleeriti kasutades kriging meetodit. Maavara plokkides leiti  $P_2O_5$  sisaldus maagis, mis sisaldab rohkem kui 3%  $P_2O_5$ . Kui kasutada maaki, kus  $P_2O_5$  sisaldus on üle 3%, siis  $P_2O_5$  kogumass mudeli põhjal oli põhimõtteliselt sama, mis Aseri maardla registrikaardis kirjas on. Fosforiidi maagi mass kasvas 24%. Kõrge (>9%)  $P_2O_5$  sisaldusega fosforiid maagi kihi paksus on ruumis suhteliselt ebakorrapärane ning auklik. Maardla lõunaosas on kõrge  $P_2O_5$  sisaldusega kihid paksemad kui põhjaosas, kuid suhteliselt väikesel määral. Plokkides olev fosforiidi mass ja  $P_2O_5$  mass erines vaid üksikutes plokkides, kui võrreldi registrikaardi plokkide sisaldust ja mudeliga arvutatud samade plokkide sisaldust.

Aseri maardla kaevandamine on konventsionaalsetel meetoditel ebamõistlik. Maa alune kaevandamine ei ole mõistlik, sest fosforiidi maak ei ole piisavalt kvaliteetne. Karjääri kaevandamise jaoks on fosforiidil lasuvaid kivimeid liiga palju ja fosforiit madala kvaliteediga, et sellel viisil kaevandamine ära tasuks. Uudsed tehnoloogiad, nagu robotkaevurid võivad muuta Aseri maardlas kaevandamise mõistlikuks. Robotkaevur saaks õhukese fosforiidi kihi kaevandada nii, et inimene ei peaks ise otseselt kaevandamist läbi viima.

Aseri maardla Maavarade registris arvel olevate plokkide ehitus vajab plokkide arvu vähendamist ehk peaks väiksemad plokid liitma suurematega. Maardla põhjapiiril asuvad mitmed väikesed maavara plokid, millega töötamine on keeruline. Väiksem plokkide arv muudaks Aseri fosforiidimaardla ehituse selgemaks.

## 6. Summary

The objectives of the study were the spatial analysis of phosphorite layers in the Aseri deposit based on historical data and the evaluation of phosphorite reserves in the Aseri deposit using a geological model. During the study, a general geological model of the Aseri phosphorite deposit was created, which included 15 stratigraphic layers. Some historical layers were combined due to having similar qualities and not affecting the study in a relevant manner. Some drillholes deemed inaccurate were removed to increase the study's accuracy. The model of the Aseri phosphorite deposit was created using Seequent software Leapfrog Geo version 2022.1.1.

In the spatial analysis of phosphorite layers, the thickness and percentage of  $P_2O_5$  content within the Aseri deposit model area were examined. The phosphorite layer thickness and  $P_2O_5$  percentage content are greater in the deposits Southern part than in the northern part. The thickest and highest-quality phosphorite layers are located in the southwestern part of the deposit. The phosphorite layer is inclined, and as one moves south within the Aseri deposit area, the depth of the phosphorite layer also increases.

A general model of the area was created, which featured 15 lithological layers. The general model depicted the geologic build of the Aseri phosphorite deposit. The evaluation of phosphorite reserves in the Aseri deposit was done using the Leapfrog Geo model, and the results were interpolated using the kriging and inverse distance methods. The natural neighbor method was also used, but it was assessed to be inaccurate. Within the ore blocks, areas containing more than 3%  $P_2O_5$  were identified as phosphorite ore. When considering ore with  $P_2O_5$  content above 3%, the total  $P_2O_5$  mass, according to the model, was essentially the same as recorded in the Aseri deposit registry. The mass of phosphorite ore increased by 24%. Areas surrounding the resource blocks had a  $P_2O_5$  content equal to 27.1% of what was in the resource blocks. Phosphorite ore layers with high  $P_2O_5$  content (>9%) exhibit relatively irregular and discontinuous spatial distribution. In the southern part of the deposit, layers with high  $P_2O_5$  content are thicker than in the northern part but to a relatively small extent. The mass of phosphorite and  $P_2O_5$  in the blocks differed only in a few cases when comparing the content of registry blocks with the content calculated by the model for the same blocks.

Conventional methods for mining the Aseri deposit are not feasible. Underground mining is not viable due to the insufficient quality of the phosphorite ore and a low phosphorite layer thickness. Quarry mining is not economically viable due to the excessive overburden and low quality of the phosphorite. Innovative technologies such as robotic excavators could make mining in the Aseri deposit economically viable. A robotic excavator could extract the thin phosphorite layer without the need for direct human involvement in mining operations.

The construction of blocks in the Aseri deposit needs to be revised by reducing the number of blocks, merging smaller blocks into larger ones. Several small ore blocks located at the northern boundary of the deposit pose challenges in research operations. A smaller number of blocks would make the constructing the Aseri phosphorite deposit clearer and more manageable.

## 7. Kasutatud materjalid

### Kaardid

1:50 000 geoloogiline baaskaart. (2023). [Map]. Eesti Geoloogiateenistus.  
<https://gis.egt.ee/portal/apps/webappviewer/index.html?id=a5d1134b615f4d2c9662a195e5dfb47f>

### Internetiallikad

Riigiteataja. (22.12.2018) Üldgeoloogilise uurimistöo ning maavara geoloogilise uuringu kord ja nõuded ning nõuded fosforiidi, metallitoorme, põlevkivi, aluskorra ehituskivi, järvelubja, järvemuda, meremuda, kruusa, liiva, lubjakivi, dolokivi, savi ja turba omaduste kohta maavarana arvelevõtmiseks

Robominers. (2023, May 4). *Robominers – Resilient Bio-inspired Modular Robotic Miners*.  
<https://robominers.eu/>

Eesti Geoloogiateenistus. (2022). *Fosforiit ja kaasnevad ressursid*.  
<https://www.egt.ee/tegevusvaldkonnad-ja-eesmargid/maapoueressursid/fosforiit-ja-kaasnevad-ressursid>

*Implicit Modelling / Geological Modelling- Seequent*. (2023).  
<https://www.seequent.com/community/learn-geoscience/implicit-modelling/>

*Põhja-Eesti klindi kivimitest*. (2022). <https://www.looduskalender.ee/klint/est/6.html>

*Maavarade register, Maa-amet* (2022).  
<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geoloogilised-andmed/Maavarade-register-p83.html>

Eesti Geoloogiateenistus. (2022). *Eesti geoloogiafond*. <https://Fond.Egt.Ee/Fond/>.

## **Aruanded**

- Stuomov, J., Manusevitsh, L., Budelkov, N., & Popov, O. (1956). *Aruanne geoloogilistest uuringutöödest ja varude arvutamisest seisuga 1/1 1957. A. Aseri fosforiidimaardlas 1954.-1956. A.* (EGF:732). SZGU.
- Vind, J., Joosu, I., Lumiste, K., & Nemliher, J. (2023). *Fosforiidi ja graptoliitargilliidi andmebaasi seletuskiri* (EGF:9595). Eesti Geoloogiateenistus
- Joosu, I., Kurvits, K., Kaljuste, V., Polikarpus, M., Vind, J., Lumiste, K., Kaasik, T., Sipp Kulli, S., Jürgenson, J., Aren, M., Habicht, H.-L., Kanter, S., Strazdin, A., Marandi, A., & Pärn, J. (2022). *Fosforiidi perspektiivsete uuringualade määratlemine ja mäenduslik ning hüdrogeoloogiline analüüs* (EGF:9643). Eesti Geoloogiateenistus.
- Joosu, I., Vind, J., Lumiste, K., Polikarpus, M., Tarros, S., Pärn, J., Tamm, K., Bauert, H., Kaasik, T., Kurvits, K., & Nemliher, J. (2023). *Fosforiidi ja graptoliitargilliidi üldgeoloogilised uuringud Kirde-Eestis* (EGF:9594). Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere.
- Mardiste, A. (1977). *Aruanne Aseri maardla fosforiidide järeluuringu tulemustest ja nende tehnoloogiliste omaduste hindamisest 1974.-1977. A* (EGF:3482). Geoloogia Valitsus.
- Eskel, J., Liivrand, H., & Kivimägi, E. (1975). *Aruanne fosforiidisisalduse hinnangust Ida-Eestis 1971.-1974. A.* Geoloogia Valitsus.

## **Artiklid**

- Adamson. (1997). *Sustainable phosphate rock mining.*  
<https://kirjandus.geoloogia.info/reference/13495>

- 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>
- 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>
- Meidla, T., Ani, T., & Lasberg, K. (2017). *Eesti maapõue kirjeldamise standardiseerimine*. <https://doi.org/10.15155/RE-36>
- Nemliher, J., Kurvits, T., Kallaste, T., & Puura, I. (2004). Apatite varieties in the shell of the Cambrian lingulate brachiopod *Obolus apollinis* Eichwald. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences: Geology*, 53, 246–256. <https://doi.org/10.3176/geol.2004.4.02>
- 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>

## **Raamatud**

- Raukas, A., & Teedumäe, A. (1997). *Geology and Mineral Resources of Estonia, Electronic edition*. <https://geoloogia.info/geology/>
- Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2017). *Mineral Resource Estimation*. Springer Netherlands. <https://books.google.ee/books?id=6tnuAQAACAAJ>

## **Konverentsimaterjalid**

- Bauert, H., Soesoo, A., Hade, S., & Editors. (2015, October 16). *Strategic raw materials of Estonia. Conference volume-2015; Rakvere, 16-17. Oct.*

## **Venekeelsed allikad**

Heinsalu, H. (1981). *Litologiâ fosfatonosnyh otloženij tremadoka Severnoj Èstonii.*

Puura, V. (1987). Геология и полезные ископаемые Раквереского фосфоритоносного района.

<https://kirjandus.geoloogia.info/reference/1568>

## 8. Lisad

Lisa 1. Aseri fosforiidimaardla mudeli puuraukude ebakorrapärad

PA	Ebakorrapära	Muudatus
1142A_3348	Väga sügav kvaternaari kiht	ignoreeritud
1058_3348	Puuraugu kordinaadid ebatäpsed	ignoreeritud
A-793_3482 ja 485_2067	Väga sügav kvaternaari kiht	Kaks kvaternaari auku olid üksteise kõrval väga sügavad ehk süvendati reljeefi, et need ühilduksid kõrval oleva jõeoruga.(lisa 7)
5445_3369	Väga paks Kahula2 kiht	Mudeli alusel määrati et Kahula2 kiht on liitüksus ehk muudeti Kahula2 kiht Idavere_kuni_Keila kihiks
F19_3032	Tatruse-Vasavere kihis on midagi valesti	Ei muudetud midagi, sest ei mõjuta antud uurimuse tulemust
P-1865_4082	Väga paks Tatruse-Vasavere kiht	Mudeli alusel määrati et Tatruse-Vasavere kiht on liitüksus ehk muudeti Tatruse-Vasavere kiht Kukruse_kuni_Jõhvi kihiks
1147_3348	Puuraugu kordinaadid ebatäpsed	ignoreeritud
1259A_3348 ja 1237_3348	Tatruse-Vasavere kihti ei tohiks aseri rikkest idapool esineda, tõenäoliselt on puuraugu kordinaadid ebatäpsed	ignoreeritud
271_2067	Topelt fosforiidi proov kus alumine proov on Kallavere kihist sügavamal	ignoreeritud
A-717_3482	Fosforiidi proov Kallavere kihist liiga allpool	ignoreeritud

Lisa 2. Aseri fosforiidimaardla fosforiidi kaalu hinnangud ja P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kaalu hinnangud

	AJALOOLINE HINNANG			UUS HINNANG				
	Passiivne tp	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		Kogu fosforiit	Keskmine sisaldus		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
		Mass	Kriging	Inverse distance	Kriging	Inverse distance		
Maardla plokkid	kt	%	kt	kt	%	%	kt	kt
1 plokk	2174	9.21	200	2368	8.98	9.03	212.54	213.74
2 plokk	583	7.02	41	569	6.57	6.63	37.35	37.72
3 plokk	2541	9.52	242	2743	8.69	8.59	238.24	235.55
4 plokk	1791	7.54	135	2036	6.55	6.60	133.47	134.39
5 plokk	1963	8.60	169	3099	7.56	7.62	234.39	236.16
6 plokk	975	7.79	76	1056	7.66	7.68	80.93	81.10
7 plokk	2265	7.81	177	2629	6.86	6.85	180.34	180.13
8 plokk	935	8.60	80	1133	7.49	7.57	84.87	85.68
9 plokk	2387	7.67	183	2925	6.50	6.54	190.26	191.41
10 plokk	611	7.42	45	630	6.64	6.74	41.85	42.45
11 plokk	810	7.72	63	905	6.59	6.46	59.68	58.44
12 plokk	176	7.33	13	204	7.03	7.11	14.33	14.49
13 plokk	16445	8.48	865	12390	7.17	7.24	888.57	896.57
14 plokk	15503	8.12	823	12399	6.96	6.87	862.34	852.35
15 plokk	18839	8.70	1172	14095	7.86	7.87	1107.33	1108.66
16 plokk	222		12	301	5.18	5.12	15.59	15.41
17 plokk	6582	7.81	514	7838	6.93	6.86	543.20	537.95
18 plokk	679	7.26	52	888	5.75	5.71	51.07	50.66
19 plokk	21158	7.65	1208	19479	6.74	6.76	1313.74	1316.08
20 plokk	7681	7.96	611	8100	7.22	7.19	584.59	582.62
21 plokk	3988		240	4569	6.14	6.27	280.60	286.57
22 plokk	888	6.89	61	955	5.84	5.82	55.77	55.61
23 plokk	10023	9.49	970	9874	8.53	8.54	842.24	843.21
24 plokk	3050	7.43	227	3193	7.63	7.67	243.72	244.97
25 plokk	3963	8.94	354	1690	8.15	8.12	137.72	137.28
26 plokk	25970	8.50	1752	23668	7.46	7.49	1766.39	1771.95
27 plokk	4227	8.72	369	4464	7.21	7.10	321.76	317.15

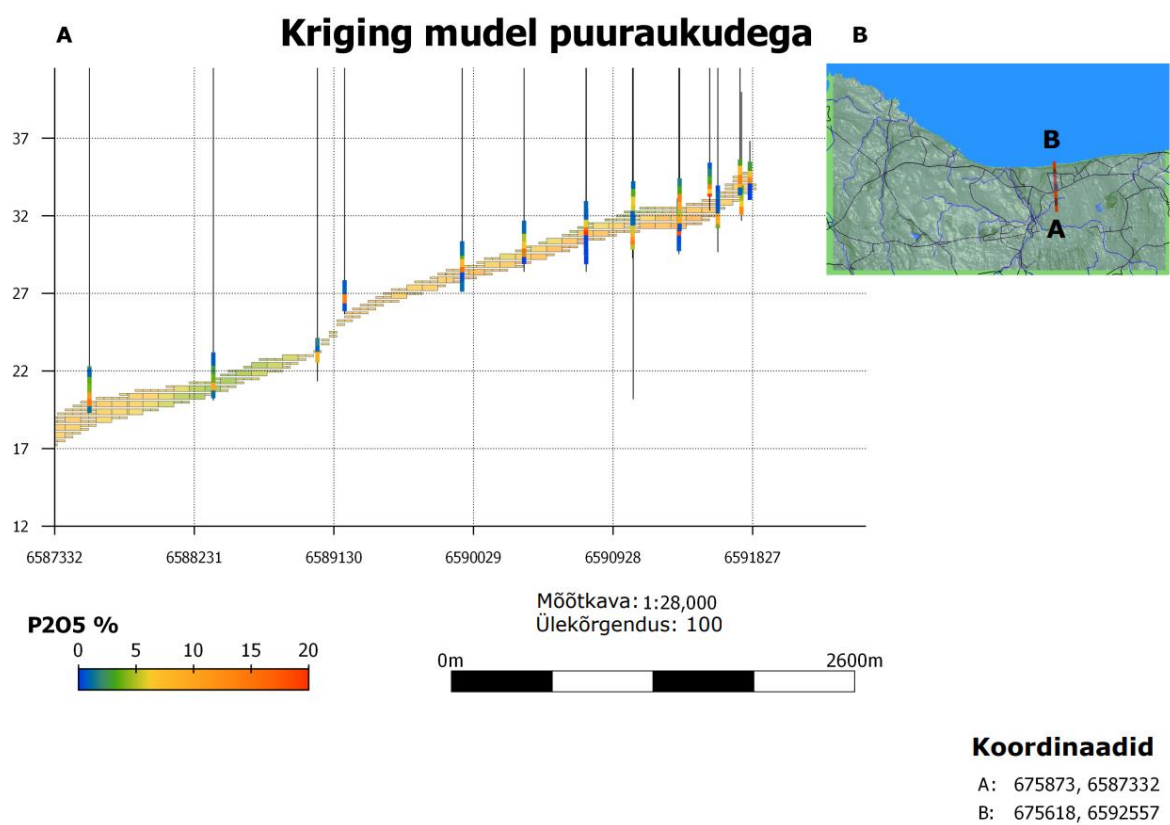
	Passiivne tp	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		Mass	Kriging	Inverse distance	Kriging	Inverse distance
	kt	%	kt	kt	%	%	kt	kt
28 plokk	97539	8.23	7586	95089	7.96	8.00	7567.65	7603.39
29 plokk	17199	8.23	974	12126	7.08	7.03	858.59	852.11
30 plokk	1326	6.42	85	955	5.92	5.91	56.57	56.48
31 plokk	4692	7.70	361	5265	6.79	6.77	357.61	356.52
32 plokk	41720		2975	49463	6.32	6.24	3123.65	3086.70
33 plokk	6432	7.01	451	8356	6.30	6.34	526.54	529.63
34 plokk	125	6.67	9	50	5.22	5.19	2.61	2.60
35 plokk	214	7.24	15	243	5.86	5.86	14.20	14.21
36 plokk	462	8.65	40	186	7.35	7.43	13.69	13.83
37 plokk	416	7.69	32	293	7.14	6.97	20.88	20.37
38 plokk	596	7.56	45	284	6.89	6.88	19.55	19.53
39 plokk	514	7.70	40	226	5.85	5.77	13.23	13.06
40 plokk	5815	6.49	377	7544	6.50	6.39	489.98	482.39
41 plokk	954		40	695	6.51	6.60	45.24	45.87
42 plokk	3463		249	4270	6.54	6.56	279.46	280.16
43 plokk	11035		865	12036	6.91	6.93	831.78	833.59
44 plokk	138		9	45	6.61	6.83	2.98	3.08
45 plokk		8.08	5946	92246	6.73	6.71	6212.76	6189.31
<b>Total</b>	349069	7.96	30753	<b>433566</b>	<b>7.29</b>	<b>7.30</b>	<b>30959.8</b>	<b>30931.1</b>
Plokkmudelist väljas				105603	7.91	7.96	8348,4	8406,3

Lisa 3. Aseri fosforiidimaardla fosforiidi kaalu ja P2O5 kaalu erinevused mudeli ja registrikaardi vahel.

	<b>HINNANGUTE ERINEVUSED</b>					
	<b>Mass</b>		<b>Kriging</b>		<b>Inverse Distance</b>	
<b>Maardla plokid</b>	<b>kt</b>	<b>%</b>	<b>muutus kt</b>	<b>muutus %</b>	<b>muutus kt</b>	<b>muutus %</b>
1 plokk	194	8.90	12.54	6.27	13.74	6.87
2 plokk	-14	-2.44	-3.65	-8.91	-3.28	-7.99
3 plokk	202	7.93	-3.76	-1.55	-6.45	-2.67
4 plokk	245	13.69	-1.53	-1.13	-0.61	-0.45
5 plokk	1136	57.86	65.39	38.69	67.16	39.74
6 plokk	81	8.33	4.93	6.49	5.10	6.71
7 plokk	364	16.06	3.34	1.88	3.13	1.77
8 plokk	198	21.12	4.87	6.09	5.68	7.10
9 plokk	538	22.54	7.26	3.97	8.41	4.60
10 plokk	19	3.11	-3.15	-7.00	-2.55	-5.68
11 plokk	95	11.73	-3.32	-5.27	-4.56	-7.24
12 plokk	28	15.77	1.33	10.24	1.49	11.44
13 plokk	-4055	-24.66	23.57	2.72	31.57	3.65
14 plokk	-3104	-20.02	39.34	4.78	29.35	3.57
15 plokk	-4744	-25.18	-64.67	-5.52	-63.34	-5.40
16 plokk	79	35.70	3.59	29.95	3.41	28.44
17 plokk	1256	19.07	29.20	5.68	23.95	4.66
18 plokk	209	30.71	-0.93	-1.78	-1.34	-2.58
19 plokk	-1679	-7.94	105.74	8.75	108.08	8.95
20 plokk	419	5.46	-26.41	-4.32	-28.38	-4.65
21 plokk	581	14.56	40.60	16.92	46.57	19.41
22 plokk	67	7.55	-5.23	-8.58	-5.39	-8.83
23 plokk	-149	-1.49	-127.76	-13.17	-126.79	-13.07
24 plokk	143	4.67	16.72	7.36	17.97	7.92
25 plokk	-2273	-57.36	-216.28	-61.10	-216.72	-61.22
26 plokk	-2303	-8.87	14.39	0.82	19.95	1.14

Maardla plokid	Mass		Kriging		Inverse Distance	
	t	%	muutus kt	muutus %	muutus kt	muutus %
27 plokk	237	5.60	-47.24	-12.80	-51.85	-14.05
28 plokk	-2450	-2.51	-18.35	-0.24	17.39	0.23
29 plokk	-5073	-29.49	-115.41	-11.85	-121.89	-12.51
30 plokk	-371	-27.98	-28.43	-33.44	-28.52	-33.55
31 plokk	573	12.21	-3.39	-0.94	-4.48	-1.24
32 plokk	7743	18.56	148.65	5.00	111.70	3.75
33 plokk	1924	29.92	75.54	16.75	78.63	17.43
34 plokk	-75	-60.00	-6.39	-71.01	-6.40	-71.16
35 plokk	29	13.32	-0.80	-5.31	-0.79	-5.29
36 plokk	-276	-59.69	-26.31	-65.77	-26.17	-65.42
37 plokk	-124	-29.69	-11.12	-34.76	-11.63	-36.33
38 plokk	-312	-52.39	-25.45	-56.55	-25.47	-56.61
39 plokk	-288	-55.98	-26.77	-66.92	-26.94	-67.35
40 plokk	1729	29.73	112.98	29.97	105.39	27.95
41 plokk	-259	-27.15	5.24	13.10	5.87	14.68
42 plokk	807	23.30	30.46	12.23	31.16	12.51
43 plokk	1001	9.07	-33.22	-3.84	-31.41	-3.63
44 plokk	-93	-67.39	-6.02	-66.93	-5.92	-65.83
45 plokk	92246		266.76	4.49	243.31	4.09
<b>Total</b>	<b>84497</b>	24.21	<b>206.87</b>	<b>0.67</b>	<b>178.13</b>	<b>0.58</b>
Plokkmudelist väljas			8348,4		8406,3	

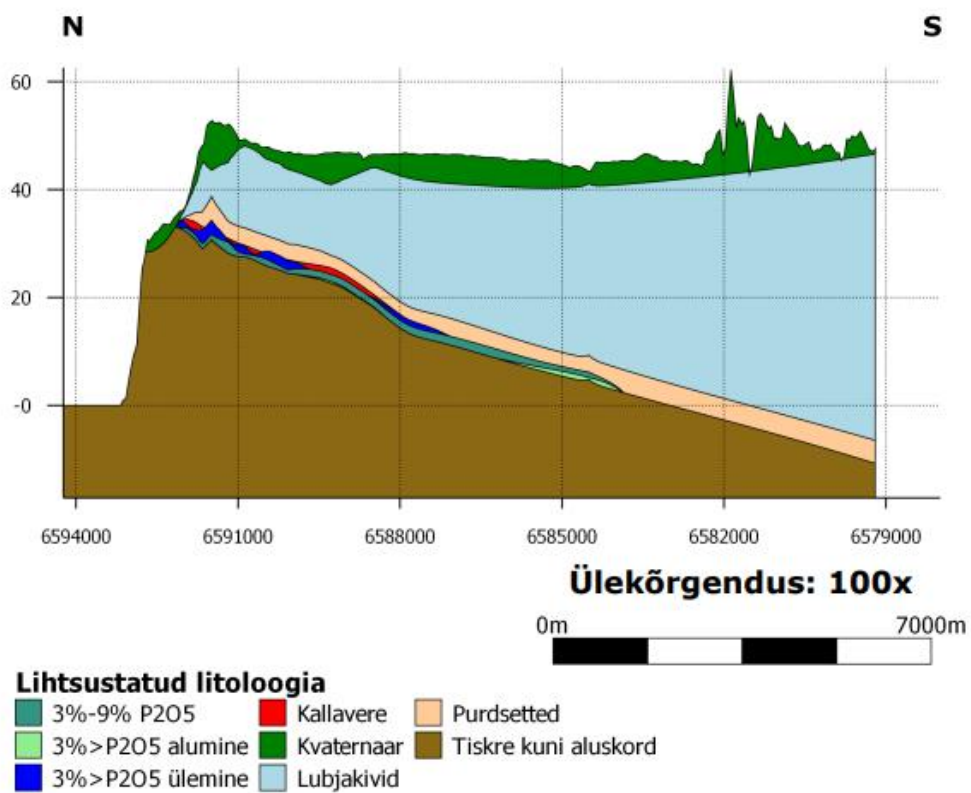
Lisa 4.



Joonis 20. Läbilõige Kriging meetodil loodud fosforiidi P2O5 sisalduse mudel Aseri maardlas

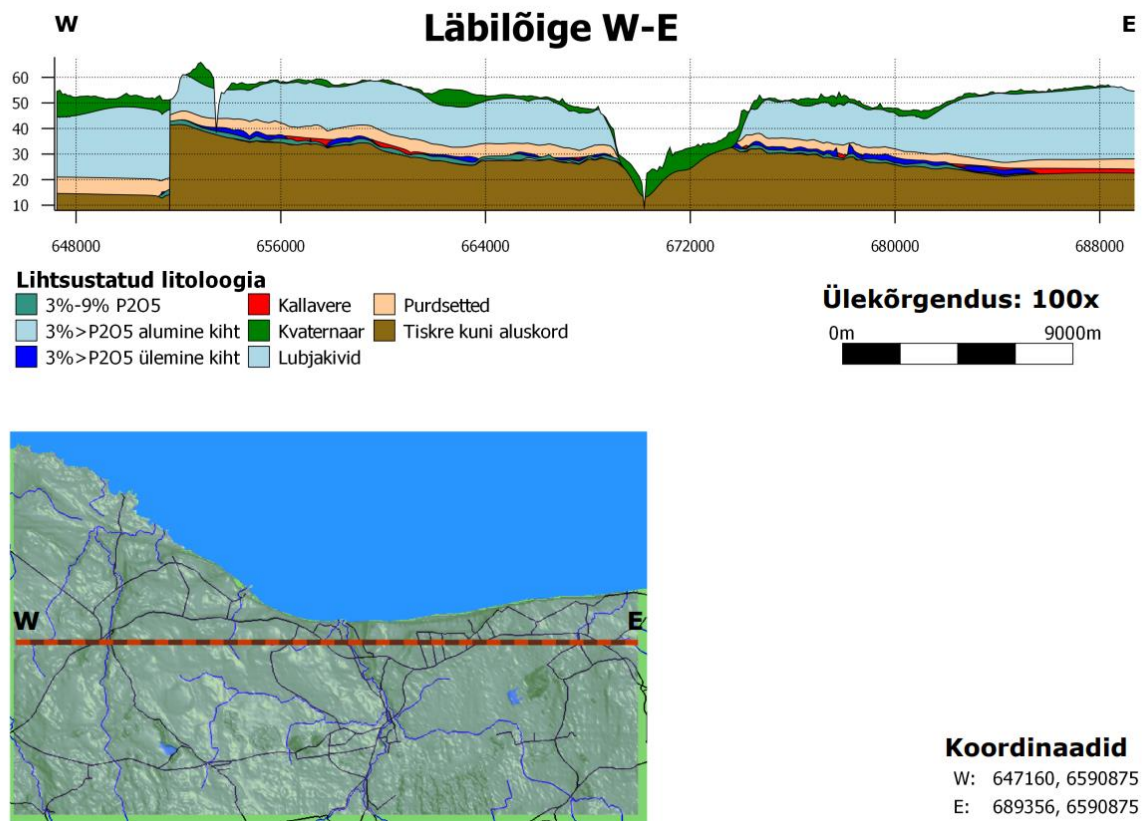
Lisa 5.

## Läbilõige N-S



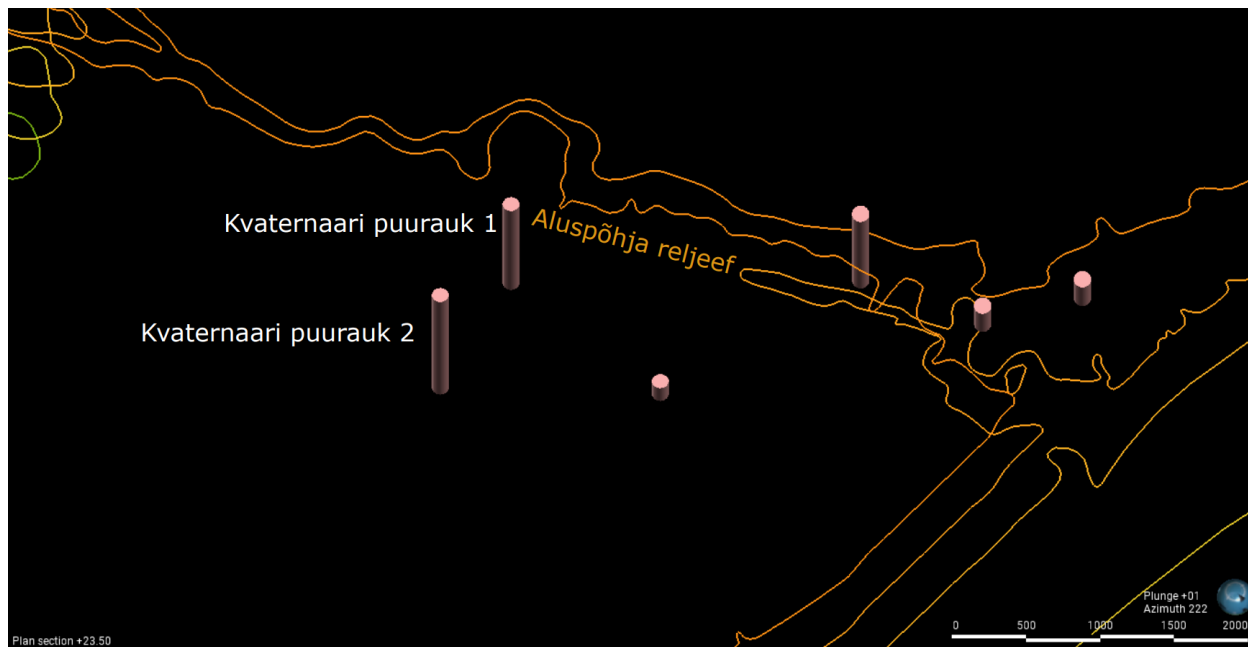
**Koordinaadid**  
N: 678759, 6594234  
S: 678759, 6577994

Joonis 21. Aseri fosforiidimaardla ala Põhja-Lõuna suunal üldistatud litoloogiaga

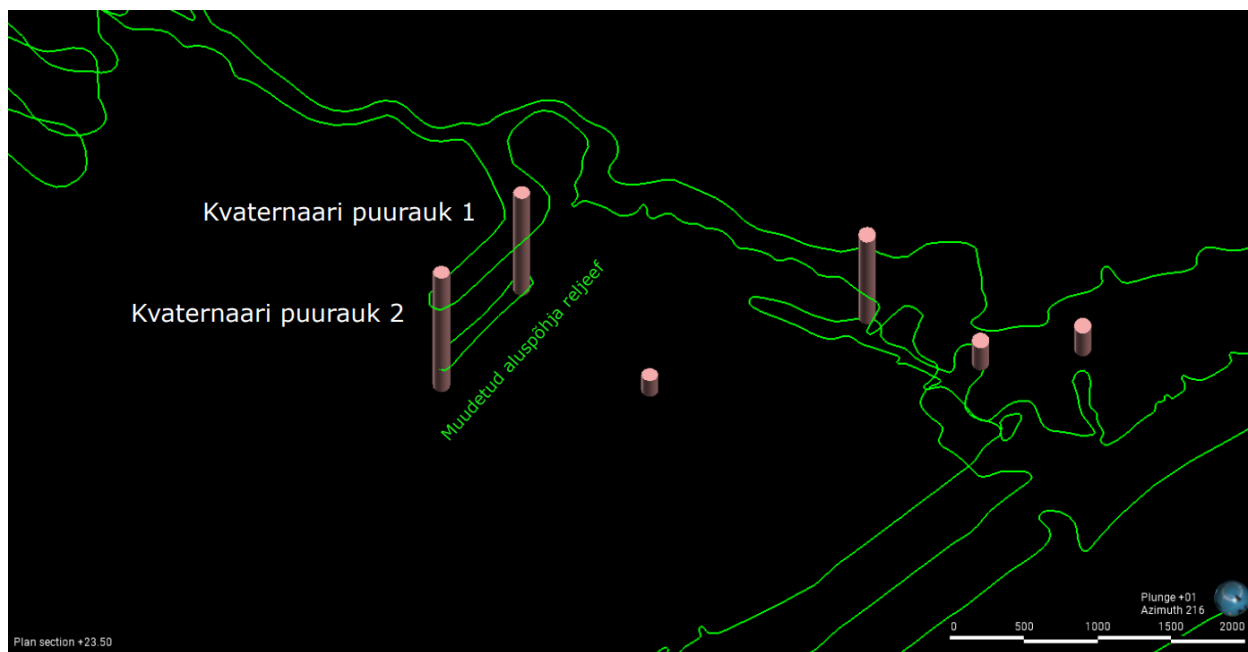


Joonis 22. Aseri fosforiidimaardla ala Lääs-Ida suunal üldistatud litoloogiaga

Lisa 7



Joonis 23. Aseri fosforiidimaardla alal Puritse jõe org. Kujutatud on puuraukud kvaternaari setetega ning aluspõhja avamuse isojooned. Oru kuju on modifitseerimata



Joonis 24. Aseri fosforiidimaardla alal Puritse jõe org. Kujutatud on puuraukud kvaternaari setetega ning aluspõhja avamuse isojooned. Oru kuju on modifitseeritud

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, **Richard Pihel**

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose  
**Aseri fosforiidimaardla 3D modelleerimine**

mille juhendaja on **Johannes Vind**

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 Commons'i 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.

*Richard Pihel*

**19.05.2023**