

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias (30 EAP)

**Eesti fosforiidi kaevandamise perspektiivsete uuringualade  
määratlemine ja analüüs**

**Karoliina Kurvits**

Juhendaja: prof. Tõnu Oja

Tartu 2022

## **Annotatsioon**

### **Eesti fosforiidi kaevandamise perspektiivsete uuringualade määramine ja analüüs**

Fosfor on oluline element nii eluslooduse jaoks kui ka kasutatav tööstuses ja tootmises. Seoses fosfori nõudluse kasvuga on taas kõnealuseks muutunud fosforiidi kaevandamise võimalikkus Eestis. Magistritöö eesmärk on fosforiidi kaevandamist soodustavaid ja pärssivaid tegureid arvesse võttes määratleda kolm Eesti fosforiidi kaevandamiseks perspektiivset uuringuala Rakvere ning Toolse maardlate piirkondades, kirjeldada piiritletud territooriume, neis esinevat fosforiidi kvaliteeti ja piiranguid. Perspektiivsete uuringualade väljaeraldamine põhineb multikriteeriumilise analüüsi võimaluste rakendamisele GIS tarkvaras, mille raames kaasatakse ka ekspertgrupi hinnanguid. Töö tulemusena piiritleti Toolse, Põlula ning Ulvi fosforiidi kaevandamise perspektiivsed uuringualad. Määratletud territooriumite paremusjärjestus meetodika põhjal saadud sobivushinnangutele tuginedes on järgnev: Põlula, Ulvi, Toolse. Siiski tuleb veel aladel läbi viia täiendavaid analüüse, et lisaks fosforiidi kvaliteedile ning esinevatele piirangutele hinnata sobivust kaevandamiseks ka teiste aspektide poolest.

Märksõnad: fosforiit, kaevandamine, GIS, ruumiline multikriteeriumiline analüüs, kaalutud ülekatteanalüüs

CERCS kood: P510 – Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

## **Abstract**

### **Allocation and analysis of perspective exploration areas for mining Estonian phosphorite**

Phosphorus is an important element for life on Earth and is used in industries and manufacturing. As the demand for phosphorus is growing, people are considering new locations for phosphorite mines. This is a relevant topic also in Estonia. The aim of this thesis is to determine three perspective exploration areas for mining Estonian phosphorite in Toolse and Rakvere phosphorite deposit areas while taking into account factors that favour or restrict mining activities. This paper also describes these sites, their phosphorite quality, and occurring limiting factors. Multicriteria analysis principles, including expert group opinions, in combination with GIS were used to define the perspective phosphorite exploration areas. As a result of this analysis Toolse, Põlula and Ulvi perspective exploration areas were defined. According to the used methodology and the resulting suitability scores, the ranking of the defined areas starting from the most suitable one is Põlula, Ulvi, Toolse. Additional analysis must be performed on those areas to get information about other aspects and assess suitability for mining based on those attributes.

Keywords: phosphorite, mining, GIS, spatial multicriteria analysis, weighted overlay analysis

CERCS code: P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

# Sisukord

Sissejuhatus .....	5
1. Teoreetiline ülevaade .....	7
1.1. Fosforiit .....	7
1.1.1. Iseloomustus .....	7
1.1.2. Leiukohad .....	9
1.1.3. Ajalooline taust Eestis .....	11
1.1.4. Rakvere maardla .....	11
1.1.5. Toolse maardla .....	12
1.1.6. Kaevandamise olulisus .....	13
1.1.7. Kasutamine .....	14
1.1.8. Kaevandamise mõjud .....	14
1.2. Multikriteeriumiline analüüs .....	17
1.2.1. Olemus .....	17
1.2.2. Kombineerimine geoinfosüsteemidega .....	18
1.2.3. Rakendamine .....	20
2. Andmed ja meetodika .....	22
2.1. Uurimisala kirjeldus .....	22
2.2. Andmed .....	23
2.3. Meetodika .....	24
2.3.1. Kriteeriumite kaalumine .....	24
2.3.2. Ruumiandmete rasterdamine .....	26
2.3.3. Fosforiidi tootlus .....	27
2.3.4. Kriteeriumite kombineerimine .....	30
2.3.5. Esialgsete perspektiivsete uuringualade määratlemine .....	33
2.3.6. Perspektiivsete uuringualade piiride täpsustamine ja analüüs .....	34
3. Tulemused .....	35
3.1. Esialgsed perspektiivsed uuringualad .....	35
3.2. Täpsustatud piiridega perspektiivsed uuringualad .....	36
3.2.1. Toolse .....	36
3.2.2. Põlula .....	38
3.2.3. Ulvi .....	39
3.3. Perspektiivsete uuringualade piirangute kirjeldus .....	40
3.3.1. Toolse .....	40
3.3.2. Põlula .....	41
3.3.3. Ulvi .....	42

4. Arutelu.....	44
Kokkuvõte .....	47
<i>Summary</i> .....	48
Tänuavaldused.....	50
Kasutatud allikad.....	51
Lisad .....	55
Lisa 1. Perspektiivsete uuringualade määratlemiseks kasutatud andmed .....	55
Lisa 2. Kaevandustegevust negatiivselt mõjutavate kriteeriumite kaalumise .....	57
Lisa 3. Toolse fosforiidi kaevandamise perspektiivse uuringuala piirangud .....	59
Lisa 4. Põlula fosforiidi kaevandamise perspektiivse uuringuala piirangud.....	63
Lisa 5. Ulvi fosforiidi kaevandamise perspektiivse uuringuala piirangud.....	67

## Sissejuhatus

Rahvaarv on üha kasvamas ning nii toidutööstus kui ka tehnoloogia areneb pidevalt, vajades aina enam ressursse inimkonna hea eluolu tagamiseks. Fosfor on üks olulisi elemente ainerings ja lisaks tähtsusele bioloogilistes protsessides, kasutatakse seda ka tööstuses ning erinevate seadmete tootmiseks (European Commission, 2020; Jasinski *et al.*, 1999; Turner & Raboy, 2019). Sellest tulenevalt on tarbimise suurenemisega kaasnenum ka nõudluse kasv fosfori järele (Soesoo & Kirsimäe, 2020). Üheks fosfori allikaks on maavara fosforiit, milles esineb fosforirikkaid organismide jäänuseid. Seda settimisprotsessis tekkinud maavara leidub ka Eestis ning 20. sajandil selle kaevandamisega siinsetel aladel ka tegeleti. Hilisemal ajal ei ole fosforiiti Eestis enam kaevandatud, kuid ajast aega tõusevad esile arutelud, kas ja kuidas peaks antud maavara maapõuest eraldama ning kas taoline ettevõtmine tasuks end ära. Sellised mõttevahetused tekitavad aga paljudes elanikes pahameelt, tuletades meelde minevikus fosforiidi kaevandamisega kaasnenum probleeme ning avalikkuse vastuhakku. Fosfori nõudluse suurenemisega seoses on teema taas aktuaalne ja on välja toodud, et põllumajanduses kasutamiseks ei ole antud maavarale alternatiivi (U.S. Geological Survey, 2022) ega võimalust varasemate varude taaskasutuseks (European Commission, 2014).

Sellest tulenevalt on vaja läbi viia tänapäevastel võimalustel põhinevaid uuringuid ja analüüse, mis kirjeldaksid potentsiaalse fosforiidi kaevandamisega kaasnevaid võimalusi, tagajärgi ning ettevõtmise tasuvust Eestis. Taoliste küsimuste lahendamiseks on oluline esmalt välja selgitada, kus paiknevad fosforiidi kaevandamiseks perspektiivsed alad Eestis. Perspektiivsete fosforiidi kaevandamise uuringualade väljaselgitamiseks on oluline kaasata nii uuemaid ja täpsemaid andmeid fosforiidi kvaliteedi kohta kui ka erinevaid kaevandamistegevust raskendavaid või piiravaid asjaolusid. See võimaldab nüüdisaegsele teabele põhinedes hinnata, milline on tegelik olukord fosforiidi kaevandamisega seonduvalt ning võimaldab vältida spekulatsioone ja väärarvamusi. Kaevandustegevusele eelnevad põhjalikud analüüsid on olulised, et planeerida olulise mõjuga ettevõtmist võimalikult jätkusuutlikult ja arvestada kõikvõimalike tagajärgedega erinevates kaevandamise etappides. Taolist kaevandamiseks perspektiivsete uuringualade määramise analüüsi ei ole teadaolevalt varasemalt läbi viidud ei Eestis ega mujal maailmas. Küll on aga kasutatud multikriteeriumilist analüüsi, et hinnata mitmete tegurite põhinedes eelnevalt juba määratletud alade sobivust ja paremusjärjestust kaevandamiseks (Dey & Ramcharan, 2008; Farkaš & Hrastov, 2021; Gudissa *et al.*, 2020; Hudeji *et al.*, 2013).

Antud uurimistöo on läbi viidud ühe osana Eesti Geoloogiateenistuse uuringutest, mille raames soovitakse potentsiaalset fosforiidivarude kasutuselevõttu silmas pidades välja selgitada kaevandamiseks perspektiivsed uuringualad ja analüüsida neid seejärel erinevate tingimuste poolest. Taolised uuringud on vajalikud, et hinnata varude kasutuselevõtu majanduslikku kulu, kaevandamisel avalduvaid mõjusid ning ettevõtmise tasuvust. Siinkohal on magistristöo eesmärk arvesse võtta kaevandamist soosivat fosforiidi kvaliteedi andmestikku ja piirkonnas esinevaid ettevõtmisele piiranguid seadmeid looduslikke ja looduskaitse, sotsiaalseid ning majanduslikke tegureid, et välja selgitada kolm fosforiidi kaevandamise perspektiivset uuringuala Eestis. Konkreetsemalt analüüsitakse Toolse ja Rakvere fosforiidimaardlate piirkondi. Sama meetodika kohaselt on määratletud fosforiidi perspektiivsed uuringualad ka Eesti Geoloogiateenistuse jaoks (Kurvits *et al.*, 2022).

Töö eesmärgist tulenevalt on magistristööks sõnastatud kolm uurimisküsimust:

- Kus paiknevad Toolse ja Rakvere fosforiidimaardlate piirkondades parimad võimalikud alad fosforiidi kaevandamiseks, võttes arvesse maavara kvaliteeti ja esinevaid piiranguid?

- Kui suured on fosforiidi kaevandamiseks vajalikud alad ja milline on seal fosforiidi kvaliteet?
- Missugused piirangud esinevad fosforiidi kaevandamise perspektiivsetel uuringualadel?

Fosforiidialadega seonduvalt kasutatakse siinses uurimuses kolme mõistet. Fosforiidi perspektiivala on defineeritud kui prognoositud varuga maavara kogum, mis ei ole kirjas Keskkonnaregistris (Eesti Geoloogiateenistus, 2022). Fosforiidimaardla puhul on tegemist geoloogiliselt uuritud ja piiritletud ning Keskkonnaregistris arvele võetud maavaraga (Maapõueseadus, 2021). Fosforiidi perspektiivsed uuringualad kujutavad antud töö analüüsi põhjal väljaeraldatud kaevandamiseks sobivaid alasid, mille puhul on arvesse võetud kaevandamist negatiivselt ja positiivselt mõjutavaid tegureid.

Magistritöö on jagatud neljaks osaks. Esmalt antakse kasutatud kirjanduse põhjal ülevaade fosforiidist, selle leidumisest, kasutamisest ning kaevandamisest ja multikriteeriumilise analüüsi põhimõtetest, selle kombineerimise ning rakendamise võimalustest. Seejärel esitatakse kasutatud andmete kirjeldus ja selgitatakse meetodikat. Kolmandas osas on välja toodud töö tulemused, vastates püstitatud uurimisküsimustele. Sisuline osa lõpetatakse peatükiga, milles arutletakse magistritöö tulemuste üle ja seostatakse saadud teadmised teoreetilises ülevaates läbitöötatud allikatega.

# 1. Teoreetiline ülevaade

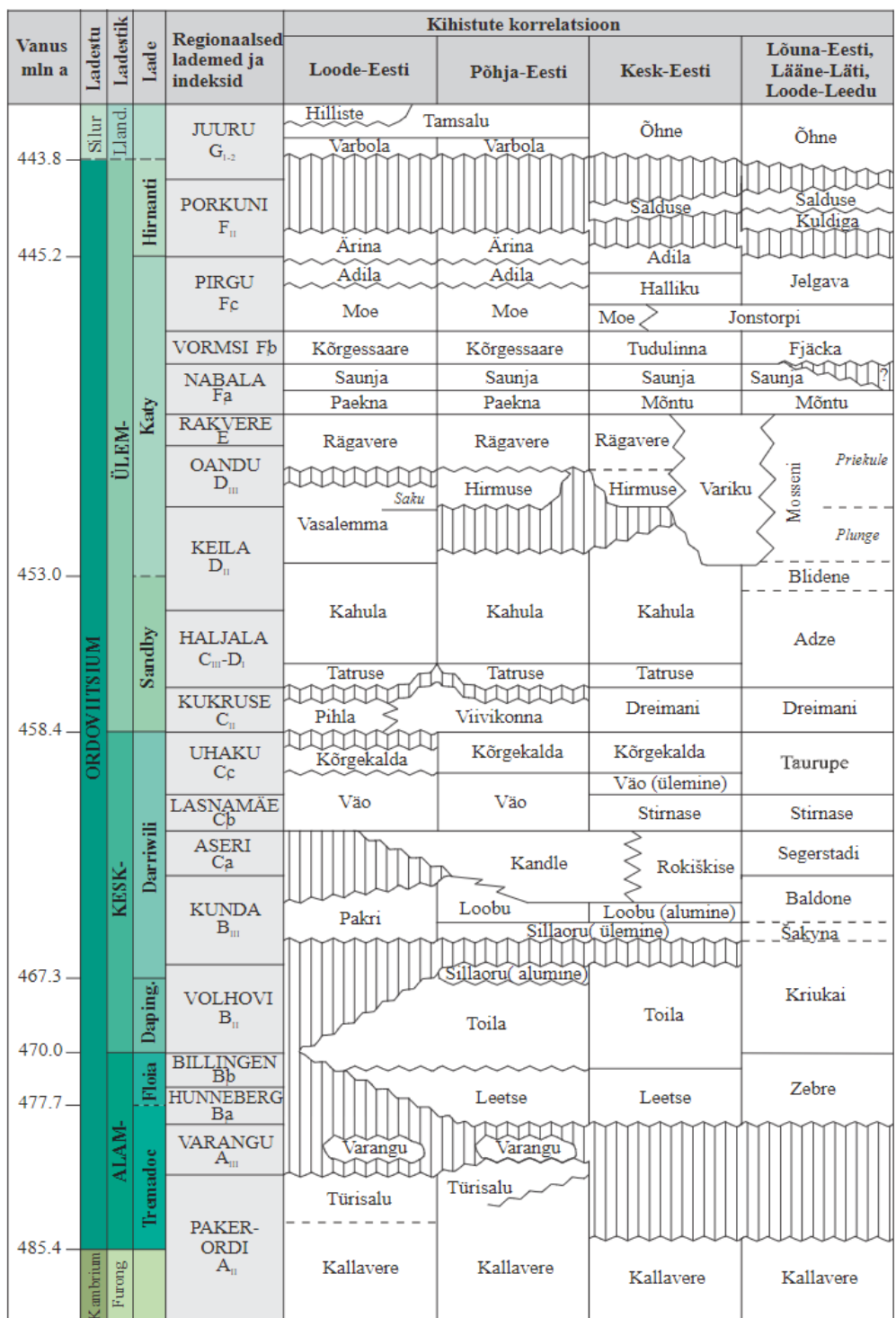
## 1.1. Fosforiit

Eestis leidub mitmesuguseid maavarasid, mida kasutatakse ka majanduslikel eesmärkidel. Tulu toovatest maavaradest on Eestis tuntuim põlevkivi kaevandamine ja selle kasutamine elektrienergia tootmiseks ning põlevkivikeemiatööstuses. Majanduslikku kasu toovad ka tavapärasemad ressursid nagu näiteks turvas, liiv, kruus ja lubjakivi. Fosforiidi puhul on aga tegemist maavaraga, mida Eestis lähiajal kaevandatud ei ole ning mille suhtes kaasneb inimestel vastuolulisi reaktsioone.

Raudsep (2008) annab ülevaate, et geoloogiliselt paikneb Eesti Balti klindi lõunaserval, kus setteline pealiskord paikneb kristalse aluskorra kohal. Sügavamatest kihtidest ülespoole liikudes koosneb Eesti aluspõhi Ediacara, Kambriumi, Ordoviitsiumi, Siluri ja Devoni ajastu kivimitest, mille paksus varieerub 100–800 m vahel, suurenedes lõuna suunas. Eesti maapõues leidub maavarasid erinevatest perioodidest. Autori sõnul on Kambriumis peamiselt liivakivi ja savi, Alam-Ordoviitsiumis liivakivi ja fosforiit, Ülem-Ordoviitsiumis põlevkivi (Raudsep, 2008). Eestis on maavaradena arvel põlevkivi, lubja- ja dolokivi, fosforiit, järvelubi ja -muda, meremuda, savi, turvas, aluskorra ehituskivi, kruus ning liiv (Maa-amet, 2021). Euroopa mastaabis on Eestis märkimisväärsed põlevkivi-, fosforiidi- ja turbavarud (Raudsep, 2008). Maa-ameti (2021) andmetel on 2020. aasta lõpu seisuga Eestis arvel üle 2,9 miljardi t fosforiiti. Need varud jäävad Harju, Lääne-Viru ja Ida-Viru maakondadesse. Väljatoodud fosforiidi mahtude puhul on tegemist passiivsete varudega, aktiivseid fosforiidivarusid Eestis ei ole (Maa-amet, 2021).

### 1.1.1. Iseloomustus

Fosforiidiks nimetatakse kivimit, milles leidub suuremas koguses fosforit. Eesti fosforiidi puhul on tegemist kvartsirikka liivakiviga, milles esineb kaldaäärsetel aladel madalmeres elutsenud käsijalgsete fosforirikkaid kestasid ning jäänuseid (Raukas, 2018; Raukas & Teedumäe, 1997). Nimetatud maavara on kollakat või tumehalli tooni, peene kuni jämeda struktuuriga (Raukas & Teedumäe, 1997) ja tekkinud ligikaudu 488 miljonit aastat tagasi (Soesoo & Kirsimäe, 2020). Fosforiit paikneb maapõues Ülem-Kambriumi ja Alam-Ordoviitsiumi ajastutel kujunenud kivimikihtide kokkupuutealal, täpsemalt Kallavere kihistus (joonis 1) (Raukas & Teedumäe, 1997). Raukase ja Teedumäe (1997) kohaselt on Kallavere kihistu fosforiidikihi paksus 1–20 m, ent majanduslikult väärtuslike fosforiidivarude paksus on keskmiselt 1–12 m ja need paiknevad ligikaudu kuni 200 m sügavusel maapõues. Autorid kirjeldavad, et fosforiidi kohal esinevad maapõues graptoliitargilliit, savi, liivakivi, lubjakivi, dolomiit ja kvaternaarisetete paksus on keskmiselt 0,5–3 m, mattunud orgudes kuni 90 m. Sarnaselt Eesti aluspõhjale on fosforiidikiht samuti monoklinaalse lasumusega ehk on maapõues kerge kallakuga lõuna suunas ja selles võib täheldada mõningaid tektoonilisi nihkeid (Raukas & Teedumäe, 1997).



Joonis 1. Eesti Ordoviitsiumi ajastu stratigraafiline skeem (Ordoviitsiumis skeem, s.a).

Ülgase, Iru ja Toolse fosforiidi leiukohtadest tehtud uuringute põhjal koosneb Eestis leiduv fosforiit suuremas osas kvartsist ja apatiidist, moodustades kogumassist üle 96%, ent varieerudes mahu ning osakaalu poolest maardlate lõikes (Yang *et al.*, 2021). Vähemal määral leidub fosforiidis ka dolomiiti, kaltsiiti, püriiti, glaukoniiti ja raudhüdroksiide (Raukas & Teedumäe, 1997). Kokku võib fosforiidikihis täheldada 19 erinevat mineraali (Yang *et al.*, 2021). Fosforirikkad käsijalgsete kojad moodustavad tekkinud kivimist vastavalt piirkonnale 5–90% ning organismide jäänustes endis on väärtusliku fosforiühendi difosforpentaoksiidi (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) sisaldus 35–37% (Raukas & Teedumäe, 1997; Soesoo & Kirsimäe, 2020; Yang *et al.*, 2021). Kogu fosforiidikihis on keskmine P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus oluliselt madalam, moodustades 6–20%

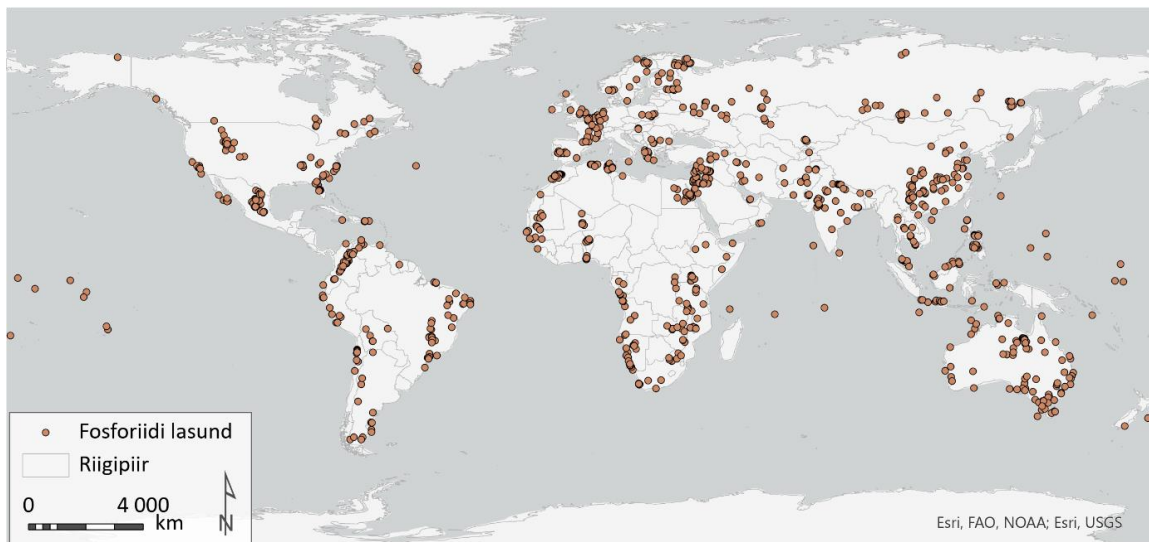
(Raukas & Teedumäe, 1997). Nii Raukas ja Teedumäe (1997) kui ka Reinsalu (2016) kirjeldavad, et fosforirikkaid käsijalgsete jäänuseid sisaldavat liivakivi, mida võib erineva kvaliteediga fosforiidiks nimetada, leidub pea kogu Eestis. Fosforiidikiht puudub Saaremaalt Sõrvest Peipsi suunas Mustveeni kulgevas vööndis (Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016).

Fosforiit on kõrgendatud huvialuseks maavaraks fosfori olulisuse tõttu aineriingest ja eluslooduse seisukohalt. Turner ja Raboy (2019) on välja toonud, et fosfori kättesaadavus elusorganismidele on üsna väike ja seetõttu on tegemist tihtipeale arengut limiteeriva teguriga. Fosfor on üks olulisemaid toitaineid taimede kasvuks, kuid haritud põllumuldades on sellest puudus (Jasinski *et al.*, 1999). Siinkohal kerkib esile väetiste kasutamise vajalikkus saagikuse tagamiseks ja suurendamiseks. Põllumajanduses toimub ringluses oleva fosfori vähenemine taime- ja loomakasvatuse kaudu (Turner & Raboy, 2019). Suurenenud rahvaarvu ja toidutootmise seisukohast on oluline, et haritav maa oleks siiski võimalikult viljakas. Fosfori nõudlus maailmas on pidevalt kasvamas toidu ja selle jaoks kasutatavate väetiste tootmisega seoses (Soesoo & Kirsimäe, 2020). Inimesed on üritanud seda kitsaskohta parandada fosforiidi kaevandamise ja selle ringlusesse viimisega, näiteks fosforväetiste abil (Turner & Raboy, 2019). Taoline tegevus toob aga endaga kaasa ka negatiivseid tagajärgi, mis võivad põhjustada hoopis aineriingluses leiduva tasakaalu rikkumist.

Fosforiit on Euroopa Komisjoni poolt määratletud Euroopa Liidu (EL) jaoks kriitilise tähtsusega maavarana alates 2014. aastast ja fosfor 2017. aastast majandusliku tähtsuse ning tarneriskide tõttu (Lauri *et al.*, 2018). Vaatamata Euroopas leiduvatele fosforiidivarudele, tegeletakse siin piirkonnas vähe selle kaevandamisega kohaliku nõudluse rahuldamiseks, mistõttu impordib EL vajalikku tooret sisse keskmiselt 4 Mt aastas (Soesoo & Kirsimäe, 2020).

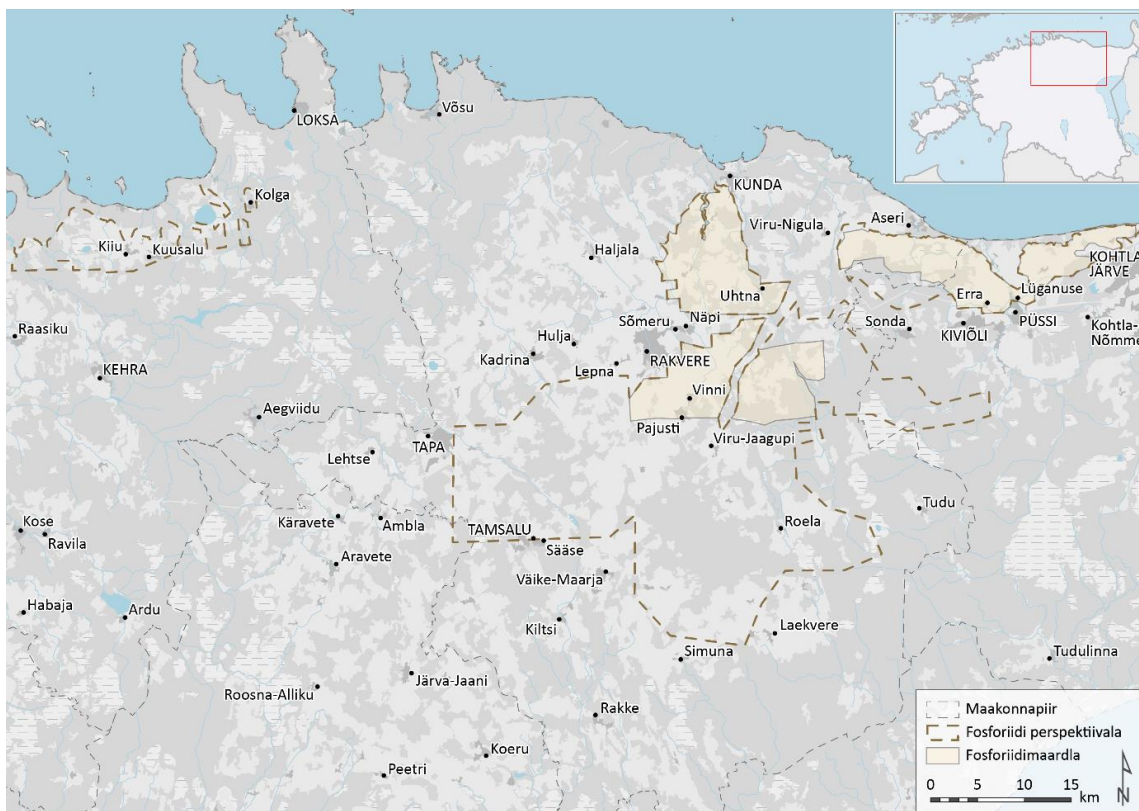
### **1.1.2. Leiukohad**

Fosforiiti leidub üle maailma (joonis 2) (Jasinski *et al.*, 1999) ning selle varude hinnanguline suurus on üle 300 miljardi t (U.S. Geological Survey, 2022). U.S. Geological Survey (2022) põhjal on enamasti tegemist merepõhjas settinud fosforiidikihtidega, mis esinevad eelkõige Põhja-Aafrikas, Lähis-Idas, Hiinas ja Ameerika Ühendriikides, kuid olulisel määral fosforit leidub Brasiilia, Kanada, Soome, Venemaa ja Lõuna-Aafrika varude puhul tardkivimites. Maailma suurim arvelolev fosforiidivaru paikneb ülekaalukalt Marokos, ent suured varud on kindlaks määratud ka Hiinas, Egiptuses, Alžeerias, Lõuna-Aafrika Vabariigis, Saudi-Araabias, Brasiilias, Austraalias, Ameerika Ühendriikides, Jordaania ja Soomes (U.S. Geological Survey, 2022).



Joonis 2. Fosforiidi leiukohad maailmas (andmed: Esri, 2022b; U.S. Geological Survey, 2002; aluskaart: Esri, 2022a).

Ehkki fosforiiti leidub pea kogu Eestis, paiknevad kaevandamiseks sobivad alad Põhja-Eestis (Reinsalu, 2016), täpsemalt Rakvere, Toolse, Aseri, Tsitre ja Maardu piirkondades (Raukas & Teedumäe, 1997). Joonisel 3 on esitatud tänapäevased Eesti fosforiidi perspektiivalad ja maardlad. Maardlatest jääb Tsitre Harjumaale, Toolse ja Rakvere Lääne-Virumaale ning Aseri Lääne- ja Ida-Virumaale (Maa-amet, 2021). Õhukesteks võib pidada Maardu, Valkla ja Tsitre fosforiidikihte, keskmise paksusega on Toolse ja Ida-Virumaa põhjaosa varud ning paksuks saab nimetada Rakvere maardla, eelkõige Kabala piirkonna kihti (Reinsalu, 2016). Eesti fosforiidi puhul on tegemist suurimate kasutamata varudega Euroopas (Soesoo & Kirsimäe, 2020). Fosforiidi hinnangulised varud Eestis on kokku 11,8 miljardit t, millega ollakse Euroopas esikohal (Raukas, 2018).



Joonis 3. Eesti fosforiidi perspektiivalad ja maardlad (andmed, aluskaart: Maa-amet, 2022).

### 1.1.3. Ajalooline taust Eestis

Fosforiidi päritolust Eesti pinnal on teatud juba sajandeid. 1861. aastal on mainitud fosforiidi kasutamise võimalikkust väetiste tootmiseks, ent tegelik kaevandustegevus sai alguse 1920. aastatel Ülgase maardlas (Raukas & Teedumäe, 1997), mille toodang oli kuni 10 000 t aastas (Reinsalu, 2016). Reinsalu (2016) märgib, et sealne fosforiiditehas põles 1938. aastal maha, mille järel suleti ka kaevandus ise ja varsti alustati kõnealuse maavara kaevandamisega Maardus. Parimatel aegadel kaevandati Maardu fosforiidikaevanduses 850 000 t maavara aastas (Raukas & Teedumäe, 1997) ja 1981. aastal moodustas kaevandatud ja rikastatud kontsentraat 320 000 t (Reinsalu, 2016).

Reinsalu (2016) kirjeldab, et Nõukogude perioodil sai täiendavatele uurimustele tuginedes alguse uue fosforiidikaevanduse projekteerimine Toolsesse ning analüüse teostati ka Rakvere maardla Kabala piirkonna kohta. Autor toob välja, et taolised arengud fosforiidi kaevandamise laiendamise suunas tõstasid avalikkuses pahameelt, millele lisandusid fosforiidi kaevandamisega kaasnenud keskkonnavalased probleemid (Raukas & Teedumäe, 1997). See kulmineerus 1980. aastate lõpus ühiskondlike kogunemiste ning vastuhakkudena kaevandustegevusele, mida hakati ühtse liikumisena kutsuma fosforiidisõjaks (Reinsalu, 2016). 1991. aastal otsustati fosforiidi kaevandus- ja rikastamistegevus Maardus lõpetati (Raukas & Teedumäe, 1997). See tähendas fosforiidi kaevandamise ja töötlemise lõppu kogu Eestis ning hiljem sellega enam tegeletud ei ole.

Küll on aga ajast aega fosforiidi kaevandamine jälle kõneaineks tulnud ja inimeste mõtetes mõlkunud. Kui Rakvere ja Toolse maardlaid võib tulevikus fosforiidi kaevandamise mõttes perspektiivseteks hinnata, siis teistes Eesti maardlates on Raukase ja Teedumäe (1997) kohaselt kaevandustegevus esmajoonel välistatud. Põhjusteks on Aseri maardla tihedalt asustatud piirkond ja fosforiidikihi madal kvaliteet, Tsitre maardla ja Maardu allesjäänud varud on väikesed, piirkonnad kattuvad looduskaitsealadega ning Maardu puhul on välja toodud minevikus kaevandamisega kaasnenud probleemid (Raukas & Teedumäe, 1997).

### 1.1.4. Rakvere maardla

Üle 140 km<sup>2</sup> suurune Rakvere fosforiidimaardla (Maa-amet, 2021) jääb suuremas osas Lääne-Virumaale, Rakvere linnast ida ja lõuna suunas. Raukas ja Teedumäe (1997) toovad välja, et tegemist on suurima fosforiidimaardlaga Eestis nii fosforiidikihi paksuse kui ka varude poolest. Sealne fosforiidikiht paikneb 42–210 m sügavusel, selle paksus jääb vahemikku 2–12 m ja P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus on keskmiselt 7–15%. Autorite põhjal langevad nii fosforiidikihi paksus kui ka selles esineva fosforiühendi sisaldus lõuna suunas liikudes. Kirjeldatakse, et Rakvere maardlas on ligikaudu 700 Mt väärtuslikku ühendit P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, millega on see suurim fosforiidimaardla Euroopas (Raukas & Teedumäe, 1997). Raukase (2018) andmetel on võimalik Rakvere maardla P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> varudega katta 1–2% maailma fosforiidipakkumisest.

Suur Rakvere maardla on jaotatud erinevateks osadeks: Kabala, Rägavere, Assamalla, Sonda, lääne ja kagupiirkonnad (Raukas & Teedumäe, 1997). Rakvere maardla kõige tulusamad fosforiidivarud paiknevad Kabala piirkonnas. Reinsalu (2016) andmetel on sealne fosforiidikiht 60–80 meetri sügavusel, keskmiselt 6 m paksune ja selle P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus on keskeltläbi 15%. Sellest tulenevalt on Kabalas leiduva fosforiidi üldvaru suurus ligikaudu 25 Mt (Reinsalu, 2016). Tulenevalt Rakvere maardla suurusest ja maavara kvaliteedist on tegemist väga perspektiivse fosforiidi kaevandamise piirkonnaga. Nõukogude perioodil läbiviidud piirkonna põhjalikematest uuringutest ilmnes, et teistest maavaradest leidub alal ka põlevkivi, liiva, savi ja turvast (Raukas & Teedumäe, 1997). Seega on piirkonnas võimalik lisaks fosforiidi

kaevandamisele maapõuest eraldada ja ära kasutada ka kaasnevad maavarad. Reinsalu (2016) kirjeldab, et tänapäevase tehnikaga on võimalik komplekskaevandamise meetodil edukalt üheskoos kaevandada nii samas asukohas esinevad fosforiidi- kui ka põlevkivivarud. See võimaldaks kasutada esinevad ressursid maksimaalselt ära, muuta kaevandamist tulusamaks ning luua rohkem lisandväärtust.

Raukas ja Teedumäe (1997) kirjeldavad, et Rakvere maardla omapära on võrreldes teiste fosforiidimaardlatega sealne oluliselt paksem katend ehk huvialuste maavaravarude kohal oleva pinnase ja kivimikihtide paksus on ligikaudu 50–200 m. Samuti on piirkonnas täheldatud kivimikihtide nihkeid, karstinähtusi ja mattunud orge. Maavaravarude kättesaamine on raskendatud ka põhjavee aspektist tulenevalt. Suurem osa maardlast jääb Pandivere kõrgustikule või selle lähedusse, mis on oluline piirkond põhjavee moodustumise osas ja mille veerežiimi rikkumine põhjustab ulatuslikke häiringuid (Raukas & Teedumäe, 1997). Huvialuse maavara sügavus ja piirkonna asustatus eeldaks maa-alust kaevandusmeetodit, millega kaasneks suures mahus põhjavee väljapumpamine (Reinsalu, 2016). Raukas ja Teedumäe (1997) märgivad piirkonna hüdrogeoloogiliste uurimuste põhjal, et kaevandamine tähendaks oluliste põhjaveekihtide kuivendamist, mille tulemusena tekiks ulatuslik põhjavee depressioonilehter. Maa-aluse kaevandamise puhul tuleb silmas pidada ka fosforiidikihi kohal esinevat pudedat liivakivi ja mõnevõrra veel kõrgemal paiknevaid põlevkivivarusid. Samuti esineb maardla põhjaosas fosforiidikihi kohal õhukeselt graptoliitargilliiti (Raukas & Teedumäe, 1997), mille käsitlemine ning ladustamine tuleb hoolikalt planeerida kiirgus- ja isesüttimisohu tõttu. Kõik eeltoodud tegurid raskendavad Rakvere maardla fosforiidi kaevandamist.

### **1.1.5. Toolse maardla**

Toolse maardla, mis on teine olulisem fosforiidimaardla Eestis, jääb Lääne-Virumaale, täpsemalt Rakvere linnast kirdesse, Kunda ja Sõmeru vahelisele alale. Maardla pindala on üle 100 km<sup>2</sup> (Maa-amet, 2021). Sealsetel aladel leiduvat fosforiiti on mainitud juba 1920. aastatel (Raukas & Teedumäe, 1997), ent fosforiidivarude olemasolu sai kinnituse ajavahemikus 1957–1960 toimunud uurimistöodel (Raudsep, 1982). Raukas ja Teedumäe (1997) kirjeldavad, et lisaks peamisele maavarale leidub piirkonnas ka lubjakivi, glaukoniitset liivakivi, savi ja turvast. Täheldatakse, et Toolse maardla fosforiidikihis leidub suur haruldaste muldmetallide sisaldus, mille osakaal suureneb üheskoos P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldusega. Autorite andmetel paikneb fosforiit Toolse maardlas 5–55 m (keskmiselt 24 m) sügavusel, milles tulusa kihi paksus on 1–5,1 m ja selles on keskmiselt 10,6% fosforiühendit P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Autorid märgivad, et fosforiidis sisalduva P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> varude arvutuslik suurus Toolses on kokku 27,4 Mt. Kokkuvõttes võib öelda, et tegemist on kvaliteedi ja tootluse poolest keskmise väärtusega fosforiidiga (Raukas & Teedumäe, 1997).

Nii Nõukogude perioodil kui 1990. aastatel arutati Toolsesse fosforiidi pealmaa kaevanduse rajamist (Reinsalu, 2016). Raukase ja Teedumäe (1997) põhjal oleks Toolse maardlas võimalik kasutada pealmaa kaevandamise tehnikad, kuna fosforiit paikneb 5–55 m sügavusel. Lisaks fosforiidi tootlusele tuleb piirkonnas arvestada maardla keskosa läbistava 25–30 m sügavuse Toolse mattunud oruga, mis lõikab ka fosforiidikihti, ning kõnealuse maavara kohal esineva keskmiselt 1,4 m paksuse graptoliitargilliidi kihiga. Pidades silmas hüdrogeoloogilisi olusid, raskendavad need autorite hinnangul nii karjääriviisilist kui ka maa-alust kaevandamist. Toolse maardla eelisteks on toodud, et rikastamisel saadavas fosforiidi kontsentratsioonis on väike kahjulike koostisosade sisaldus, sealne lubjakivi sobib tsemenditööstusesse ja ehitusesse, liivakivi värvipigmenti ja silikaatkonsentraadi tootmiseks ning savi kergkruusaks, samuti saab piirkonnas leiduvast graptoliitargilliidi kihist eraldada haruldasi elemente (Raukas &

Teedumäe, 1997). Reinsalu (2016) sõnul hinnati eelmise sajandi lõpu poole Toolse maardlas fosforiidikaevanduse parimaks asukohaks Aru paekarjäärist põhjapoole jäävaid alasid, mille puhul peeti silmas ka graptoliitargilliidi jaoks vajalikke käsitlemisviise. Autor toob välja, et analüüside põhjal peeti võimalikuks kaevandusmahuks ligikaudu 1 Mt fosforiidimaaki aastas, millest toota 50 000–70 000 t 33% sisaldusega P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kontsentraati. Kaevanduskulusid arvesse võttes ei oleks ettevõtmine aga ära tasunud (Reinsalu, 2016). Vastavad plaanid fosforiidi kaevandamiseks Eestis ei realiseerunudki Nõukogude võimu all olles ega ka taasiseseisvunud vabariigis.

### 1.1.6. Kaevandamise olulisus

Inimtegevus on Eesti pinnamoodi oluliselt muutnud seoses maavarade kaevandamisega. Seda eriti piirkondades, kus on praegu või minevikus olnud fosforiidi, põlevkivi, savi ja lubjakivi karjäärid ning kaevandused (Raukas & Teedumäe, 1997). Vaatamata kaasnevatele negatiivsetele mõjudele, on kaevandamine siiski oluline, et kasutada maapõues leiduvaid ressursse eluolu parandamiseks ja seeläbi panustada majanduse arengusse. On välja toodud, et põllumajanduses kasutamise seisukohalt ei ole võimalik fosforit ja selle nõudlust asendada (U.S. Geological Survey, 2022) ning fosforiidi peamise kasutusviisi puhul puudub võimalus varasemate varude taaskasutuseks (European Commission, 2014). Jasinski jt (1999) täiendavad, et fosforiit on ainuke väetiste tootmisel ja keemiatööstuses kasutatava fosfori allikaks.

Vaadates fosforiidi kaevandamist maailma mastaabis, selgub, et 2021. aastal olid suurimad kaevandamisel ja rikastamisel saadava kontsentraadi (ca 30% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) mahud Hiinas 85 Mt, Marokos 38 Mt, Ameerika Ühendriikides 22 Mt ja näiteks meie naaberriigis Soomes 1 Mt (U.S. Geological Survey, 2022). EL hangib fosforiiti peamiselt Marokost, Venemaalt ja Soomest (Euroopa Komisjon, 2020). Lauri jt (2018) kirjeldavad, et Soomes paiknev 1979. aastal tegevust alustanud Siilinjärvi fosforiidikaevandus ongi ainus toimiv fosforiidikaevandus Euroopas. Aastased kaevandusmahud on seelses kaevanduses 2018. aasta andmetel keskmiselt 10 Mt tooret, millest saab töötlemisel 1 Mt kontsentraati ja 300 000 t fosforhapet erinevaks otstarbeks kasutamiseks (Lauri *et al.*, 2018).

Lauri jt (2018) nendivad, et lisaks Soomele leidub Euroopas erineva kvaliteedi ning ulatusega fosforiidivarusid veel Austrias, Belgias, Bulgaarias, Horvaatias, Eestis, Prantsusmaal, Saksamaal, Kreekas, Ukrainas, Iirimaa, Itaalias, Maltal, Hollandis, Norras, Poolas, Portugalis, Rumeenias, Hispaanias, Rootsis ja Ühendatud Kuningriigis. Riigid, kus esineb maapõues fosforivarusid, on kaasneva maavarana potentsiaalsed leiukohad ka haruldastele muldmetallidele (Lauri *et al.*, 2018). Euroopa Komisjon (2020) on välja toonud, et EL-i jaoks on oluline igakülgete toorainetega varustus, importimisest sõltuvuse vähendamine, ressursikäitlemise parandamine ja säästlik kasutus. See on eriti oluline kriitilise tähtsusega toormete jaoks, mille hulka kuuluvad lisaks eelnevalt juba nimetatud fosforiidile ja fosforile ka nendega tihtipeale koos esinevad haruldased muldmetallid (Euroopa Komisjon, 2020).

Üheks kriitiliste toorainetega kaasnevaks eesmärgiks on Euroopa Komisjoni (2020) jaoks suurendada nende tootmist ja töötlemist EL-i siseselt. Seda tulenevalt ka põhjustest, et prognoositavalt kriitiliste toormete nõudlus pidevalt kasvab tootmise ja tehnoloogiliste arengutega seoses ning need imporditakse paljudel juhtudel suuremas osas ühest riigist (Euroopa Komisjon, 2020), omades seega väga suurt mõju toorme saadavusele. 2020. aasta andmetel moodustas EL-is fosforiidi puhul impordist sõltuvus 84% ja fosfori, haruldaste muldmetallide puhul 100% (Euroopa Komisjon, 2020), kuid samas EL-i fosforiidi ja haruldaste muldmetallide toodangud moodustasid 2014. aastal vaid alla 1% kogu maailma pakkumisest (European Commission, 2014). Seega oleks fosforiidi kaevandamine Euroopas perspektiivne

ettevõtmine nii leiduvate varude vähese kasutatavuse tõttu kui ka põhi- ja kaasnevate maavarade nõudlusega seoses.

### 1.1.7. Kasutamine

Fosforiidist toodetavat kontsentraati ja muid ühendeid on võimalik kasutada erinevateks otstarveteks. Üldised eluvaldkonnad, kus fosfortoormeid kasutatakse, on energiamahukad tööstusharud ja toidutööstus (Euroopa Komisjon, 2020). Muu hulgas on välja toodud mitte-energeetiliste toormete suurenev olulisus seoses kõrgtehnoloogiliste ja keskkonnasäästlikumate toodete arendamise ning tootmisega (European Commission, 2014). Jasinski jt (1999) on kirjeldanud, et väetiste tootmiseks efektiivseimad viisid on vastavate maavarade kaevandamise ja nende töötlemise teel. Peamine konkreetne fosforiidi kasutusala ongi väetiste, aga ka looma sööda, pesuainete, kemikaalide ja toidulisandite tootmine ning fosfor ise on kasutusel metallide, elektroonika, kemikaalide tootmises (European Commission, 2020; Turner & Raboy, 2019). Eestis minevikus kaevandatud fosforiiti kasutati Nõukogude perioodil ebaefektiivse väetisena ja vähesel määral happeliste muldade neutraliseerimiseks (Raukas & Teedumäe, 1997).

Selleks, et kaevandatud fosforiidi toormest vajalikke ühendeid toota, tuleb kaevandatud maavara rikastada ehk tõsta selle väärtuslikku fosforiühendi sisaldust ja samal ajal vähendada lisandainete osakaalu. Fosforiit on toorme kujul halvasti lahustuv ja seega näiteks põllumajanduses kasutamiseks taimede poolt halvasti omastatav, mistõttu vajab see töötlemist (Jasinski *et al.*, 1999). Varasemalt kasutati rikastamiseks kuivmenetluse meetodit, kuid selle tulemuseks oli madalama  $P_2O_5$  sisaldusega kontsentraat (Reinsalu, 2016). Nüüdseks on levinud fosforiitmaagi rikastamine floteerimise ehk vahtrikastamise teel (Raukas, 2018), mille tulemusena saadakse ka parema kvaliteediga kontsentraat.

Yang jt (2021) läbiviidud Ülgase, Iru ja Toolse fosforiidi uurimistöös suudeti vahtrikastamise meetodil esialgselt toormest kvarts suuremas osas eemaldada, suurendada apatiidi ja haruldaste muldmetallide sisaldust. Autorid toovad välja, et saadi kontsentraat, mille  $P_2O_5$  sisaldus oli üle 33%. Varasematele tehnoloogiatele tuginedes on Toolse ja Rakvere maardlates saadud rikastamise järel  $P_2O_5$  sisalduseks üle 28%, teatud paikades üle 30% (Raukas & Teedumäe, 1997). Samas ei leidunud Yang jt (2021) poolt analüüsitud piirkondades uraani, mida on mujal Eestis täheldatud (Raukas & Teedumäe, 1997). Raukas ja Teedumäe (1997) on välja toonud, et rikastatud kontsentraadid varieeruvad vastavalt kihile ja asukohale nii erinevate ühendite kui ka elementide sisalduse ning osakaalu poolest. Sellest tulenevalt esineb muutlikkus ka lõplike fosforiiditoodete koostises ja nende tootmiseks kasutatavates protsessides (Raukas & Teedumäe, 1997).

Ehkki vahtrikastamise meetod aitab suurendada väärtuslike ühendite osakaalu, ei ole võimalik taolise protsessiga kõiki ebavajalikke lisandeid eemaldada. Yang jt (2021) täheldasid, et säilisid rauarikkad lisahendid. Sellele vaatamata on Eestis leiduvate fosforiidivarude analüüsi põhjal jõutud järeldusele, et siinsest fosforiidist on võimalik toota turustamiseks väärtuslikku kontsentraati (Yang *et al.*, 2021) ja kvaliteetseid väetisi (Raukas & Teedumäe, 1997). Uuritud on ka fosforiidi termilist töötlemist, mille tulemusena saada tarvilikku fosforit (Reinsalu, 2016).

### 1.1.8. Kaevandamise mõjud

Lisaks kaevandamise võimalustele ja sellest saadavale kasule tuleb silmas pidada ka ettevõtmisega kaasnevaid negatiivseid mõjusid ning tagajärgi. Eesti kontekstis on olemas hea ülevaade üldiste kaevandamise mõjude kohta nii siin kui mujal, mida täiendavad konkreetsed

kogemused fosforiidi kaevandamisega. Raudsep (2008) kirjeldab, et varasemalt on Eestis põlevkivi ja fosforiidi kaevandamine toimunud ümbritsevat keskkonda kahjustavalt. Eestis toimunud fosforiidikaevandustest avaldus Ülgase piirkonnas tajutav, Maardu allmaakaevanduse puhul häiriv ja sealse pealmaakaevanduse korral hävitav mõju ümbritsevale keskkonnale (Reinsalu, 2016). Paat jt (2021) läbiviidud töös, milles uuriti erinevate inimgruppide suhtumist potentsiaalsesse fosforiidi kaevandamisesse Eestis, toodi välja, et ehkki kaevandamise mõjusid võib olla nii positiivseid kui ka negatiivseid, esinevad inimestel teatud mured selle ettevõtmisega seoses. Suures plaanis võib fosforiidi kaevandamisega kaasnevad probleemid jagada kolme kategooriasse, milleks on keskkondlikud, majanduslikud ja sotsiaalsed aspektid, ent mõnel pool nimetatakse eraldiseisvatena ka tehnoloogilisi ja tehnilisi või valitsemisest tulenevaid tegureid (Paat *et al.*, 2021; Raudsep, 2008; Raukas & Teedumäe, 1997).

Erinevatele allikatele tuginedes on tabelis 1 esitatud kolme teema alla klassifitseerituna peamised probleemid, mis võivad kaevandamisega kaasneda. Ettevõtmisega seonduv negatiivne mõju võib esineda nii kaevanduse rajamisel, kaevandamisel kui ka pärast otsest kaevandustegevust. Tabelist 1 ilmneb, et allikatele tuginedes on kõige rohkem erinevaid tegureid koondunud keskkondlike nähtuste alla, kuna kaevandamine avaldab olulist negatiivset mõju nii looduskeskkonnale, -objektidele kui ka sealsetele protsessidele. Looduskaitseelised probleemid osutusid peamisteks vastuseisu põhjusteks ka fosforiidisõjas (Reinsalu, 2016), millele lisandusid oluliste teemadena sotsiaalsed aspektid (T. Oja suuline kommentaar, 18.05.2022). Kaevandusalade analüüsil on ilmnenu, et territooriumite sobivus antud ettevõtmiseks on tundlik keskkondlike ja sotsiaalsete tegurite olulisuse hinnangute muutmisele (Dey & Ramcharan, 2008) ehk need on kriitilised tegurid, mida silmas pidada. Eesti potentsiaalse fosforiidikaevanduse kohta arvamusi kogudes jõudsid Paat jt (2021) järeldusele, et vastavalt kaasatud huvirühmadele kujunesid kõige olulisemaks keskkonnaprobleemid ja vähem oluliseks sotsiaalsed riskid.

Tabel 1. Võimalikud fosforiidi kaevandamisega kaasnevad mõjud (Autori koostatud Davis & Tilton, 2005; Jasinski *et al.*, 1999; Paat *et al.*, 2021; Raudsep, 2008; Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016; Turner & Raboy, 2019 alusel).

Keskkonnavalased mõjud	Majanduslikud mõjud	Sotsiaalsed mõjud
Põhja- ja pinnavee reostumine	Kaevandamise mittetasuvus	Terviseprobleemid
Veerežiimi muutumine ja veetaseme alanemine	Maaomanike ja kaevandajate vastuseis	Tööjõu sissetoomine, demograafilise olukorra muutus
Põhjavee depressioonilehtrite tekkimine	Koosesinevate maavarade kaevandamise ning kasutamise raskused	Maade võõrandamine
Maastiku ümberkujundamine	Looduslike ehitusressursside ebapiisavus	Elanike ümberkolimine
Mullaomaduste muutumine	Toorme eksport (maavara ei väärindata)	Lähiümbruse elanike häirimine
Aheraine puistangud, jäätmete teke	Läbimõtlematud investeeringud	Avalikkuse vastuseis
Õhu saastamine	Suur maavara kadu	Ebavõrdsuse suurenemine
Kaitsealade kahjustamine	Kaevandamise tehnoloogilised ja tehnilised raskused	Kohaliku eluolu halvenemine
Vajadus kaevandusalade rekultiveerimiseks	Maavara madal kvaliteet	
Graptoliitargilliidi süttimine ja hoiustamine	Alade sobivuse langus teatud maakasutuseks	
Veekogude eutrofeerumine, sealse elustiku hävimine		
Loomade, taimede haigused		
Mõju kliimamuutusele		

Looduskeskkonnaga seonduvalt on probleemsete teguritena enim nimetatud vee kvaliteedi halvenemist ja veerežiimi muutumist, maavara kaevandamisel ja selle töötlemisel tekkivate jäätmete käitlemist, õhu saastamist, pinnase omaduste muutumist, looduskaitseliste väärtuste kahjustamist ning muret graptoliitargilliidi käsitlemise pärast (Jasinski *et al.*, 1999; Paat *et al.*, 2021; Raudsep, 2008; Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016; Turner & Raboy, 2019). Eestis leiduva fosforiidi kaevandamise mõjusid meenutades on keskkonnavalastest probleemidest üks peamisi küsimusi, kuidas graptoliitargilliiti ohutult hoiustada. Seetõttu on antud tegur väga oluline nii looduskeskkonna säästmise kui ka kaevandamise planeerimise vaatenurgast.

Majanduslikest teguritest on rõhutatud maavara kaevandamise tasuvust, kaevandamiseks kasutatava meetodi tehnoloogilisi ja tehnilisi valikuid, samas paigas esinevate maavarade komplekskaevandamise võimalikkust ning kaevandatud toorme kohapealse väärindamise olulisust (Davis & Tilton, 2005; Paat *et al.*, 2021; Raudsep, 2008; Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016). Nagu ilmneb, on majanduslikust seisukohast fosforiidi kaevandamist planeerides esmajoonel oluline silmas pidada, kas maavara kaevandamine ja sellest toodete valmistamine tasub end ka ära. Reinsalu (2016) toob välja, et see, kas kaevandamistegevus tasub ära, sõltub eelkõige fosforiidi nõudlusest. Samas on Davis ja Tilton (2005) kirjeldanud, et kaevandamisest saadav tulu ei sõltu mitte ainult maavaradest otseselt saadavast kasumist, vaid ka kaevandamise ja tootmise väljaminekutest. Varasematele uurimustele põhinedes kirjeldatakse, et Eestis leiduva fosforiidi kaevandamine ei ole tulus tegevus (Raudsep, 2008; Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016). Siiski on tegemist praeguseks juba rohkemal või vähemal määral vananenud andmete ja analüüsidega, mis vajavad tänapäevasele tehnoloogiale põhinevat ümberarvutamist ja -hindamist, võttes arvesse ka fosforiidi nõudlust ning hinda. Kaevandamiseks kasutatavad tehnoloogilised ja tehnilised valikud ning võimalused sõltuvad eelkõige piirkonna geoloogilistest omapäradest ja on määrava tähtsusega kaevandamise planeerimisel.

Sotsiaalsetest aspektidest on peamiselt esile toodud kartust demograafilise olukorra muutumise pärast tööjõu sissetoomisel, üldist avalikkuse ja kohalike vastuseisu kaevandustegevusele, maade võõrandamist, elanike ümberkolimist ning ümbruskonna inimeste tavapärase eluolu häirimist (Davis & Tilton, 2005; Paat *et al.*, 2021; Raudsep, 2008; Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016). Vaikimisi oli võõrast rahvusest inimeste juurdevoog põhjuseks kaevandamise vastumeelsusele ka fosforiidisõjas (Reinsalu, 2016). Mure demograafilise olukorra pärast ei ole praegusel ajal enam nii aktuaalne nagu Nõukogude perioodil ning Raukas ja Teedumäe (1997) toovad välja, et seda probleemi saab vältida rakendades kohalikku tööjõudu. See võimaldaks ka kohalikku kogukonda ettevõtmisesse kaasata ning kaevandamisel saadavat kasumit kaevanduspiirkonda jätta. Suurel määral võib avalikkuse vastuseis tuleneda ka maade võõrandamisest ja kohalike vajadusest ümber kolida, mis on oluliste teguritena välja toodud hiljutises Eesti fosforiidi kaevandamise arvamusuuringus (Paat *et al.*, 2021). Piirkonna elanike häirimine on eriti aktuaalne, kuna Toolse ja Rakvere maardlad paiknevad tihedalt asustatud ning majanduslikult arenenud piirkondades (Raukas & Teedumäe, 1997).

Kaevandamisalade sobivus ja kaevandamise mõjud on teatud määral diskuteeritavad, kuna ettevõtmise reaalne tulemus ning sellega kaasnevad tagajärjed on suuresti mõjutatud sellest, millist poliitikat, regulatsioone tegevusele rakendatakse (Davis & Tilton, 2005) ja millised leevendusmeetmed kasutusele võetakse (Dey & Ramcharan, 2008). Erzurumlu ja Erzurumlu (2015) ning Paat jt (2021) kirjeldavad, et lisaks võivad arvamused kaevandamise mõjudest lahknedu nii erinevate inimgruppide vahel kui ka nende sees, mis tuleneb indiviidide taustast. Antud uurimustest ilmneb, et oluliste vahelülidena on välja toodud avalikkuse ja kohalike elanike kaasamine, kuna kaevandamisloa saamine sõltub olulisel määral kohalike heaolu tagamisest (Erzurumlu & Erzurumlu, 2015; Paat *et al.*, 2021). Seetõttu on fosforiidi

kaevandamist planeerides mõistlik kaasata erinevate inimeste vaatenurki, et nende abil piirkondlikud murekohad välja selgitada. Erzurumlu ja Erzurumlu (2015) kirjeldavad, et tihtipeale võivad teatud tegurid olla otsuselangetajale varjatud ja need väljenduvadki huvirühmi arvesse võttes. Lisaks on välja toodud, et 2000. aastate alguses kaheldi, kas lisaks kaevandamise majanduslikule tulususele peaks arvestama ka sotsiaalseid ja keskkondlikke tegureid (Erzurumlu & Erzurumlu, 2015), ent tänapäeval on erinevate otseselt ning kaudselt seotud nähtuste arvestamine planeerimisprotsessi oluliseks osaks nii kaevandamise kui ka teiste ulatuslike mõjudega ettevõtmiste puhul.

## 1.2. Multikriteeriumiline analüüs

Uute rajatiste ja ettevõtmiste planeerimisel on väga oluline määratleda nende jaoks sobiv asukoht, mis toetaks planeeritavat tegevust ennast ning samas võtaks arvesse teisi ümbruses esinevad nähtusi. Taolise läbimõeldud planeerimisega saab tagada jätkusuutlikku arengut ja arvestada võimalike esinevate mõjude ning tagajärgedega juba enne tegevuse realiseerumist. Erinevate tegurite arvestamine ja analüüsi kaasamine võimaldab jõuda põhjendatud otsustusteni. Samuti vähenevad võimalikud kulud hilisemates etappides, kui ettevõtmisele piiranguid seatakse või kaasnevad negatiivsed mõjud, mida on vaja leevendada. Siinkohal võivad otsuselangetajatele appi tulla geoinfosüsteemid (GIS), mis ruumiandmetega töötamist lihtsustavad ja võimaldavad nendega analüüsi läbi viia. Samuti on abiks multikriteeriumiliste analüüsimeetodite rakendamine.

### 1.2.1. Olemus

Belton ja Stewart (2002) kirjeldavad multikriteeriumanalüüsi kui formaalset lähenemist, mille abil võtta arvesse mitmeid ning tihtipeale vastuolulisi teemakohaseid kriteeriume, et analüüsida ning langetada olulise mõjuga otsuseid. Autorite sõnul on multikriteeriumilise analüüsi kolm peamist põhimõtet struktureeritud lähenemine, mitmete kriteeriumite arvestamine ja otsuste langetamine indiviidide või grupi poolt (Belton & Stewart, 2002). See analüüsimeetodite perekond võimaldab arvesse võtta eri tüüpi andmeid kombineerituna eksperthinnangutega (Mardani *et al.*, 2015), et lihtsustada inimhinnangute jaoks suure hulga informatsiooni hoomamist ja analüüsimist (Belton & Stewart, 2002). Jankowski (1995) sõnul võib multikriteeriumilise analüüsi peamiste etappidena nimetada esialgsete alternatiivide määratlemise, kriteeriumite valiku ja iga alternatiivi puhul kriteeriumite mõjude hindamise. Sellest tulenevalt on multikriteeriumilise analüüsi puhul kaks peamist küsimust, kuidas määratleda erinevaid osapooli rahuldavaid alternatiive lahendi leidmiseks ja kuidas alternatiivide seast parim välja selgitada (Jankowski, 1995).

Multikriteeriumiline analüüs hõlmab endas erinevaid meetodilisi lähenemisviise, mida saab mitmeti liigitada. Malczewski (2006) toob välja mõned võimalikud multikriteeriumanalüüsi jaotused. Üks klassifikatsioon põhineb probleemi lahenduseks olevate alternatiivide arvule. Autor kirjeldab, et multiatribuutilise otsustusanalüüsi puhul on eelnevalt olemas kindel hulk alternatiive ehk lahendeid, mille seast parim leida, ent multiobjektiivse lähenemise puhul ei ole lahendite arv määratletud ja neid võib olla etteantud sobivusvahemikus mitmeid. Teine võimalik jaotus seisneb multikriteeriumanalüüsiks rakendatud konkreetsetes meetodikas, kus multiatribuutilise analüüsi puhul on levinumaks kriteeriumite kaalutud summeerimine ja Boolean ülekatted, järgnevad ideaalpunkti leidmine (nt TOPSIS, MOLA), analüütiline hierarhiaprotsess (AHP), muud meetodid ja järjestusel põhinevad tehnikad (nt ELECTRE,

PROMETHEE), kuid multiobjektiivse analüüsi puhul on kõige laiemalt kasutatavad erinevad arvutuslikud ja programmeerimisalgoritmid (Malczewski, 2006).

Belton ja Stewart (2002) nendivad, et kuna multikriteeriumilise analüüsi probleemid hõlmavad teavet, mis on tihtipeale olemuselt keerukas ning vastuoluline, võib väljendada eri arusaamu ning muutuda ajas, siis ei ole tavapärase arutluse teel võimalik taoliste komplekssete küsimuste osas nii lihtsalt parimat lahendit välja selgitada. Multikriteeriumilised tehnikad võivad arvestada nii kvantitatiivseid, kvalitatiivseid kui ka segatüüpi andmeid ehk kriteeriume (Jankowski & Richard, 1994; Mardani *et al.*, 2015). Eri tüüpi andmeid kombineerides täiendavad need üksteist. Optimaalse lahendi leidmiseks ja paremini informeeritud otsustuste langetamiseks on oluline, et kõikide alternatiivide puhul võetaks arvesse samu kriteeriume (Mardani *et al.*, 2015).

Multikriteeriumanalüüsi üheks määravaks osaks on kriteeriumite kaalude defineerimine, mis väljendavad iga teguri suhtelist olulisust teiste analüüsi kaasatud teguritega võrreldes käsitletava probleemi kontekstis (Carver, 1991). Analüüsi kaasatud kriteeriumite kaalumise toimub enamasti eksperthinnangute põhjal, mis seisnevad näiteks kriteeriumite paariviisilisel võrdlusel, skaalale tuginedes hinnangute andmisel või järjestusmeetodil (Malczewski & Rinner, 2015). Ekspertide eelistused põhinevad üldjuhul sellel, millised eeldatavad mõjud teatud kriteeriumiga kaasnevad (Jankowski, 1995). Kuna multikriteeriumanalüüsi tulemus on mõjutatud kriteeriumite olulisushinnangutest, võib selle lähenemisviisi probleemiks pidada raskust kaasata ülesande kontekstis sobivaid ja piisavate teadmistega eksperte (Dey & Ramcharan, 2008). Samas toovad Belton ja Stewart (2002) välja, et mingil hulgal subjektiivsust on omane igale otsustusprotsessile ja teatud määral võimaldab multikriteeriumanalüüs seda ohjata nii kaasatavate kriteeriumite valiku kui ka nende suhteliste kaalude kindlaksmääramise puhul.

Mardani jt (2015) ning Hudeji jt (2013) toovad välja, et ei ole ühte ainuõiget lähenemisviisi otsustusprotsessi toetamiseks. Eri multikriteeriumanalüüsi tehnikad koos erinevate kaalumiseks kasutatavate meetoditega saavutavad erinevaid tulemusi (Carver, 1991). Sobiva agregeerimistehnika valik sõltub probleemist endast, kasutatavast teabest kui ka soovitatavast lõpptulemusest (Chakhar & Martel, 2004). Seega ei saa väita, et teatud multikriteeriumanalüüsi lähenemine annaks probleemile ainuõige vastuse või oleks täiesti objektiivseks meetodiks, ent selle eelisteks on suurema hulga omavahel konfliktsete tegurite kaasamine analüüsi, lahendatava probleemi enese struktureerimine ning põhjendatud lahendi leidmine käsitletavale küsimusele (Belton & Stewart, 2002). Seetõttu on multikriteeriumiline analüüs laialt kasutatud meetod erinevates valdkondades andmetöötlusest energia, keskkonna ja jätkusuutlikkuse küsimusteni, haldusalaste probleemide ja muude teemadeni ning seda on rakendatud ka GIS-is (Mardani *et al.*, 2015).

### **1.2.2. Kombineerimine geoinfosüsteemidega**

Multikriteeriumilise analüüsi kasutamise põhimõtteks on, et otsuselangetajal tuleb langetada valik võimalike alternatiivide vahel (Belton & Stewart, 2002; Chakhar & Martel, 2004; Jankowski, 1995). Nii on see ka paljude ruumiliste ja planeerimisalaste küsimuste puhul, kus ettevõtmiseks potentsiaalselt sobivaid alasid on mitmeid. Esimesed katsetused multikriteeriumanalüüsi kombineerimiseks GIS võimalustega jäävad eelmise sajandi lõppu (Jankowski & Richard, 1994). Malczewski (2006) sõnul on GIS-i ja multikriteeriumanalüüsi kombineeritud lähenemine muutunud aja jooksul oluliseks ja laialt kasutatud lähenemiseks paljudel elualadel. See on põhjustatud planeerimistegevuse aina keerulisemaks muutumisest, kuna tähtis on arvesse võtta palju erinevaid tingimusi, sealhulgas keskkonnaalaseid

regulatsioone, ja avalikkus on teadlikum kaasnevatest probleemidest (Jankowski & Richard, 1994). Yap jt (2019) rõhutavad sobivate ülesannete puhul GIS-i kasutamist multikriteeriumiliste otsustuste langetamiseks, sest see loob võimalused arvestada asukohavaliku jaoks oluliste nähtuste ja geograafiliste piirangutega.

Carver (1991) ning Jankowski ja Richard (1994) on välja toonud, et GIS on abiks otsuselangetajatele, et analüüsida ruumilist teavet, nende paiknemist ja koosinemist, kuid ainuüksi selle töövahendi abil ruumiteabe analüüsimine ei anna otseselt teavet piirkondade sobivuse kohta käsitletava probleemi kontekstis ega võimalda kaasata otsuselangetajate arvamusi. Samas multikriteeriumanalüüs ise hõlmab ainult matemaatilisi meetodeid ilma andmetöötuse ja -halduse põhimõtetest ega arvesta vajalikul määral geograafiliste tingimustega (Carver, 1991; Jankowski & Richard, 1994). Kombineerides kahte lähenemist omavahel, saab hinnata erinevaid alternatiive ruumis, põhinedes mitmete kriteeriumite, mille olulisus on täpsustatud eksperthinnangute põhjal (Malczewski, 2006). Samuti on võimalik seeläbi leida, milline on käsitletava ülesande jaoks ruumiliselt parim lahend, erinedes tavapärasest GIS analüüsist, mille abil jõutakse teatud hulga sobivate tulemusteni (Jankowski, 1995; Jankowski & Richard, 1994).

Seega võib GIS-põhist multikriteeriumanalüüsi üldjoontes määratleda kui kahte omavahel kombineeritud otsustusabi töövahendite kogumit, mis koondab mõlema poole meetodid ja töövahendid, mille abil töödelda ja kombineerida geograafilisi andmeid ning väärtushinnanguid, et koondada informatsiooni otsuste langetamiseks (Chakhar & Martel, 2004; Malczewski & Rinner, 2015). Taoline analüüsiviis võimaldab langetada ratsionaalsemaid, objektiivsemaid ja põhjendatumaid otsustusi ka ruumilisel tasandil (Carver, 1991). Malczewski (2006) toob välja, et kombineeritud lähenemise suureks eeliseks otsuselangetajatele on tagasiside saamine, millist mõju avaldavad lõpplahendile erinevad väärtushinnangud. Pikas perspektiivis võimaldab kahe meetodi ühitamine luua ruumilisi otsustusi toetavaid süsteeme, mis abistaksid otsuselangetajaid planeerimisküsimustes (Chakhar & Martel, 2004; Jankowski & Richard, 1994). Seega on multikriteeriumanalüüs väga mitmekülgne töövahend, mis kombineeritult GIS-iga võimaldab hallata ja lahendada keerukaid ruumilisi probleeme.

Nii nagu tavapärase multikriteeriumanalüüsi korral, on ka selle ruumilise versiooni puhul kasutada mitmeid meetodeid nii kriteeriumite kaalude määratlemiseks kui nende omavaheliseks kombineerimiseks (Malczewski & Rinner, 2015). Võimalikke meetodeid kriteeriumite kaalumiseks ja kombineerimiseks on esitatud eelmises alapeatükis. Teades käsitletava ruumilise probleemi püstitust ja olemasolevaid multikriteeriumilisi agregeerimisvõimalusi, on võimalik määratleda ülesande eesmärk, kasutatava andmestiku olemus, soovitud lõpptulemus ning selle põhjal valida ülesandeks sobivaim kombineerimistehnika (Chakhar & Martel, 2004). Jankowski ja Richard (1994) sõnavad, et GIS-põhised multikriteeriumilised sobivusanalüüsid on oma olemuselt enamasti kvantitatiivsed ja nende puhul on enamlevinud meetoditeks kaalutud summeerimine ning paariviisiline võrdlemine.

GIS võimalusi kasutatakse peamiselt raster- või vektorformaadis ruumiandmekihtide haldamiseks ja töötlemiseks. Sellest tulenevalt on ka GIS-põhist multikriteeriumanalüüsi läbi viidud mõlemat tüüpi andmetel, lisaks on kasutatud kahe andmeformaadi kombinatsiooni (Jankowski, 1995; Malczewski, 2006). Kui rastripõhises GIS analüüsis on iga piksel käsitletav alternatiivina ja selle puhul on mõistlik kasutada andmekihtide kaalutud summeerimist, siis vektorpõhise analüüsi korral on võimalik kasutada teisi tehnikaid ning rasterformaadiga võrreldes jõutakse oluliselt väiksema hulga esialgsete sobivate alternatiivideni (Jankowski, 1995). Carver (1991) on nimetanud rastripõhise analüüsi eeliseks, et see võimaldab eri tüüpi andmed kanda ühtse ruumilise lahutusega võrgustikku.

### 1.2.3. Rakendamine

Multikriteeriumilist analüüsi on võimalik rakendada väga erinevat tüüpi probleemide puhul, sealhulgas ruumilist multikriteeriumanalüüsi on edukalt kasutatud mitmete ettevõtmiste jaoks sobivate alade valikuks, et tagada läbimõeldud planeerimine. Planeerimisalaselt on meetodit enim rakendatud eelkõige selliste nähtuste puhul, mis omavad ümbritsevale keskkonnale suurt mõju ja mille edukas käitamine sõltub paljudest eri teguritest. Ka Eestis on rakendatud multikriteeriumanalüüsi teatud ettevõtmiseks parima asukoha leidmisel. Volkova jt (2010) on seda kasutanud elektri- ja küttejaama rajamiseks sobivaima maakonna väljaselgitamiseks. Tartu Ülikooli geograafia osakonna lõputöodes on multikriteeriumanalüüsi kasutatud nii tuuleenergia potentsiaali ruumiliseks hindamiseks (Dmytrenko, 2020) kui ka alvarite taastamiseks sobivate alade väljaselgitamiseks (Ismayilova, 2020).

Malczewski (2006) sõnul on ühitatud multikriteeriumilise analüüsi ja GIS vahendite levinumad rakendusvaldkonnad olnud seotud keskkonna, transpordi, linna- ja regionaalplaneerimise, jäätmemajanduse, hüdroloogia, põllumajanduse ning metsandusega. Nendes valdkondades on tegeletud suuremas osas probleemidega, mis puudutavad maa-ala sobivuse, planeerimise ja eri stsenaariumite hindamise või asukoha otsingu ja valiku küsimusi (Malczewski, 2006). Yap jt (2019) on kirjandusanalüüsi põhjal leidnud, et populaarsemad valdkonnad multikriteeriumanalüüsi rakendamiseks asukohavalikul on energiatootmise, logistika-, avalike teenuste ning kaubandusasutuste paigutamine. Taoliste uurimuste puhul olid kõige kasutatumad multikriteeriumilise analüüsi meetodite erinevad kombineeritud viisid, millele järgnesid antud lähenemise konkreetsete meetodid. Ülevaate koostanud autorite sõnul olid hübriidsete meetodite eelisteks konkreetsete multikriteeriumiliste meetodite puuduste vältimine ning kombineerimine GIS vahenditega (Yap *et al.*, 2019).

Jankowski ja Richardi (1994) sõnul on loodusvarade nõudlus pidevalt suurenenud, kuid aina enam on ka regulatsioone, mis nende kasutamist pärsivad. Seetõttu on just taolistes küsimustes mõttekas rakendada GIS võimalusi koos multikriteeriumanalüüsi tavadega, et saavutada eri valdkondade ja huvirühmade jaoks aktsepteeritavad otsused (Jankowski & Richard, 1994). Taoline lähenemine on eriti asjakohane keskkonda mõjutavate projektide puhul, sest selle valdkonna küsimustes võivad erineva taustaga inimeste arvamused lahkneeda (Jankowski, 1995). Kaevandustegevusega seonduvalt on multikriteeriumilist analüüsi kasutatud nii sobiva kaevandamismeetodi valikuks (Bitarafan & Ataei, 2004; Karadogan *et al.*, 2008; Saki *et al.*, 2020), maavara töötlemiseks mõeldud tehaste rajamiseks sobivate asukohtade leidmiseks (Bakhtavar & Lotfian, 2017; Safari *et al.*, 2012), kaevandamisjäätmete ladustamiseks sobivate piirkondade väljaselgitamiseks (Hekmat *et al.*, 2008; Straka *et al.*, 2014), kaevandustegevuse jätkusuutlikuks planeerimiseks (Erzurumlu & Erzurumlu, 2015; Jiskani *et al.*, 2020) kui ka maavarade kaevandamiseks sobivate alade määratlemiseks (Dey & Ramcharan, 2008; Farkaš & Hrastov, 2021; Gudissa *et al.*, 2020; Hudeji *et al.*, 2013).

Dey ja Ramcharan (2008) toovad välja, et ehkki on läbi viidud mitmeid asukohavalikuga seotud multikriteeriumanalüüsi, ei ole seda kasutatud karjääri laiendamiseks sobiva asukoha valikuks, mis arvestaks nii kaevandamise tootlikkust kui ka erinevat tüüpi kaevandamisega seotud subjektiivseid tegureid koos sidusrühmade kaasamisega. Autorid on multikriteeriumilise analüüsi läbi viinud, et leida kaevanduse laiendamiseks parim asukoht kolme esialgselt piiritletud alternatiivi vahel, võttes arvesse tehnilisi, keskkondlikke, sotsiaalseid ja riiklikust planeerimisraamistikust tulenevaid tegureid (Dey & Ramcharan, 2008). Hudej jt (2013) on oma töös rakendanud erinevaid multikriteeriumilise analüüsi meetodeid kaevanduste planeerimise ja sellega seonduvate küsimuste puhul. Nad tõdevad, et peamine ei ole ülesande jaoks ainuõige meetodi väljaselgitamine, vaid mitmete meetodite üheaegse kasutamise võimalikkus, et saavutada parim tulemus (Hudeji *et al.*, 2013).

Jiskani jt (2020) on kombineeritud multikriteeriumilise ja TNVO-analüüsi (tugevused, nõrkused, võimalused, ohud) põhjal järeldanud, et kaevanduste ja mineraaltööstuste jätkusuutliku planeerimise puhul peeti olulisimaks tugevuste alla kuuluvaid nähtusi, järgnesid tähtsuse järjestuses nõrkused, ohud ja võimalused. Jätkusuutlikkuse osas on multikriteeriumanalüüsi põhimõtete kohaselt tähtis arvesse võtta erinevaid arvamusi ja valdkondi. Kaevandamiseks sobiva ala väljaselgitamisel on tähtis ülesande korrektne ja konkreetne määratlemine, analüüsis oluliste alternatiivide, kriteeriumite, nende kaalude, eelistuste ja tingimuste sõnastamine (Hudeji *et al.*, 2013). Jiskani jt (2020) uurimuse põhjal on nii positiivsed kui ka negatiivsed tegurid mõlemad ühtviisi olulised kaevanduse ja mineraaltööstuse arengut silmas pidades, kuna leiti, et tugevused ja võimalused ning nõrkused ja ohud moodustasid mõlemad omavahel kombineeritult 50% olulisusest vastava ülesande kontekstis (Jiskani *et al.*, 2020). Sealhulgas avalikkuse ja kohalike kaasamine planeerimistegevuses võimaldab suurendada usaldust kaevandustegevuse suhtes, motiveerib huvirühmi osalema ning seeläbi suudetakse saavutada ühine eesmärk ettevõtmise arendamiseks (Erzurumlu & Erzurumlu, 2015). Seetõttu on avalikkuse kaasamine väga oluline nii kaevandustegevuse planeerimisel, selle aktsepteeritavamaks muutmisel kui ka tegevusega kaasnevate mõjudega arvestamisel. Eelnimetatut on võimalik saavutada just multikriteeriumiliste meetodite ja GIS võimaluste kombineeritud rakendamisel.

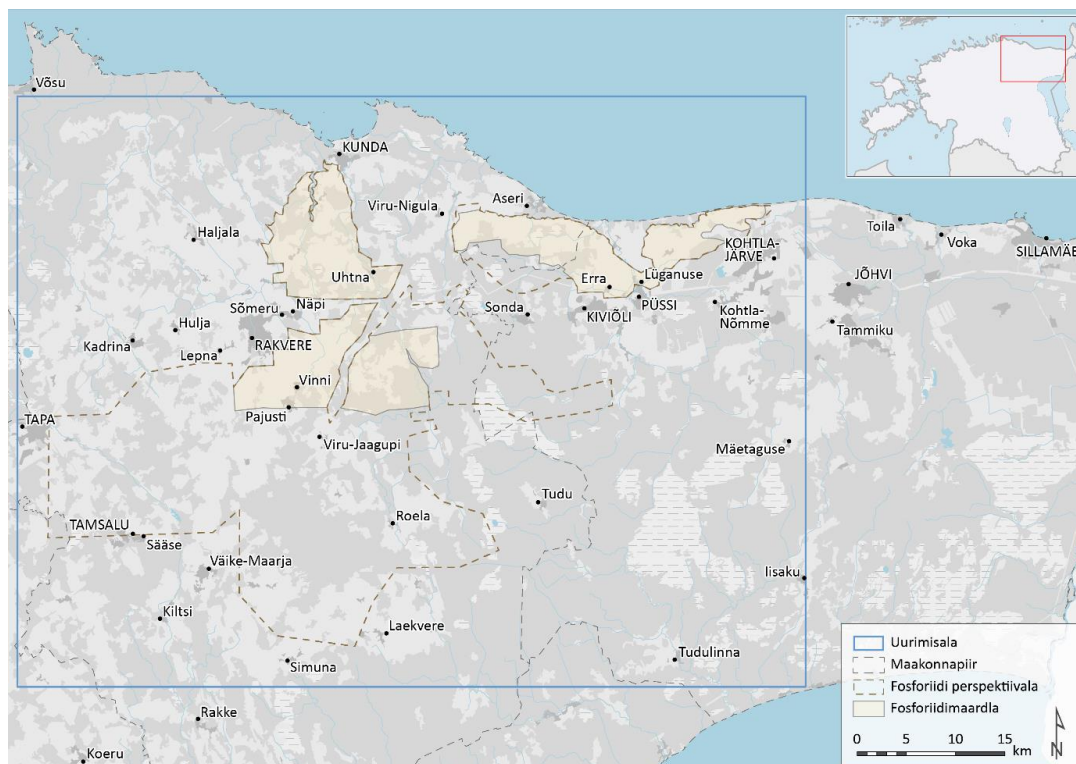
## 2. Andmed ja meetodika

Fosforiidi kaevandamiseks sobivate alade valiku keerukast olemusest ja paljudest sellega seonduvatest piirangutest lähtuvalt kasutatakse siinses töös ruumilise multikriteeriumilise analüüsi põhimõtteid potentsiaalsete fosforiidi kaevandamisalade leidmiseks. Multikriteeriumanalüüsi võimalusi on kohandatud käsitletava probleemi jaoks, võttes arvesse ekspertgrupi arvamusi ja soovitusi. Uurimistöös kasutatud andmed ja meetodika fosforiidi kaevandamise perspektiivsete uuringualade väljaselgitamiseks on aluseks ka Eesti Geoloogiateenistuse (EGT) vastavate alade määratlemisel (Kurvits *et al.*, 2022).

### 2.1. Uurimisala kirjeldus

Eesti fosforiidi kaevandamise perspektiivsete uuringualade määratlemiseks koguti andmed esialgu suurema ala kohta, mille ulatus on esitatud joonisel 4. Nelinurkne piiritletud territoorium paikneb Kirde-Eestis ja selle suurus on 60x80 km. Ala jääb L-EST97 koordinaatsüsteemis järgnevate ristkoordinaatide vahemikku:  $X_{\min} = 6\,605\,000$ ,  $X_{\max} = 6\,545\,000$ ,  $Y_{\min} = 610\,000$ ,  $Y_{\max} = 690\,000$ . Käsitletav maa-ala kujunes just selliste mõõtude ja paigutusega, et see hõlmaks piirkonna fosforiidimaardlad ja sealsed fosforiidi prognoosvarud ning kattuks ulatuselt EGT geoloogilise ruumimudeliga (Kurvits *et al.*, 2022). Kaevandamiseks perspektiivsed alad ei paikne kogu suurema uurimisala ulatuses, ent taolise ala kohta kogutud andmestik on kasulik piirkonnas edaspidi läbiviidavate sarnaste uurimuste tarbeks ja võimaldab hinnata ka kaugemale ulatuvaid mõjusid.

Kirjeldatud uurimisala hõlmab peamiselt Lääne-Viru ja Ida-Viru maakondi, kuid sellesse jäävad ka Harju, Järva ning Jõgeva maakondade servaalad. Omavalitsustest jäävad nimetatud alale täies ulatuses Rakvere linn ning Lügánuse, Rakvere ja Viru-Nigula vallad. Osaliselt paiknevad piiritletud territooriumil ka Alutaguse, Haljala, Jõhvi, Järva, Kadrina, Kuusalu, Mustvee, Tapa, Toila, Vinni, Väike-Maarja vallad ja Kohtla-Järve linn.



Joonis 4. Uurimisala ulatus (aluskaart: Maa-amet, 2022).

## 2.2. Andmed

Fosforiidi kaevandamise perspektiivsete uuringualade määratlemiseks võeti arvesse mitmeid erinevaid tegureid, mis mõjutavad ise kaevandustegevuse rajamist või millele avaldab kaevandamine eeldatavalt suurt mõju. Multikriteeriumilise analüüsi metoodikast tulenevalt tugines asjakohaste kriteeriumite valik ekspertgrupi ühisele arvamusele, mille puhul kaaluti, kas ja kuidas mõjutavad teatud nähtused võimalikku tulevast fosforiidi kaevandustegevust. Arvesse on võetud kriteeriumid, mis avaldavad kaevandustegevusele tingimata positiivset või negatiivset mõju või need tegurid, mis saavad ise tugeva negatiivse mõju osaliseks kaevandamisest tulenevalt ja millele avalduvat mõju soovitakse vältida või leevendada.

Kaevandustegevust planeerides tuleb silmas pidada selle mõju erinevatele valdkondadele. Analüüsis kasutatud ruumiandmed, nende allikad, väljavõtete kuupäevad on esitatud lisa 1 all. Samuti on lisa 1 all toodud tabelis kirjas vastava kriteeriumi puhul arvesse võetud andmete selgitus, kuna paljude ruumiandmekihtide puhul ei kaasatud analüüsi kõiki sellesse esialgselt kuulunud nähtusi. Põhjuseks on andmekihil esitatud andmete olemus või mitmete kriteeriumite puhul nende kattuvuse arvestamine teiste samalaadsete nähtustega, et mõjusid mitte dubleerida. Andmed võib koondada kolme teema alla: loodus ja looduskaitsealused, sotsiaalsed ning majanduslikud tegurid.

Loodus ja looduskaitsealused nähtused on looduskaitsealade kaitsevööndid loodusreservaat, sihtkaitsevöönd ja piiranguvöönd; kaitsealad; hoiualad; I, II ja III kaitsekategooria loomade elupaigad ning taimede, seente ja samblike kasvukohad; Natura 2000 loodus- ja linnualad; looduslikud kaitstavad üksikobjektid, projekteeritavad üksikobjektid ja kohalikud üksikobjektid koos neid ümbritsevate kaitsetsoonidega; püsielupaigad; vääriselupaigad; rohevõrgustik; veekogude mõjualad; mets.

Sotsiaalseid nähtusi esitavad andmekihid on rahvastikutiheduse ruutkaart; muinsuskaitsealused mälestised ja alad ning neid ümbritsevad kaitsevööndid; väärtuslikud maastikud; kohaliku tähtsusega miljööväärtuslikud nähtused, kaitsealused objektid, kaunid kohad, vaated ja vaatamisväärsused ning pärandkultuuriga seonduvad nähtused.

Majanduslikest nähtustest on arvesse võetud katastriüksused; õuealad; ohtlikud käitised; riigikaitsealused, sidevõrkude, ühisveevärgi- ja kanalisatsioonivõrkude, transpordialased, elektri- ning gaasivõrkude mõjualad; muud teed ja tänavad; liiv ja kruus, lubjakivi ja dolokivi, põlevkivi, turvas ning muud maavarad; aktiivsed ja taotletavad uuringualad; aktiivsed ja taotletavad mäeeraldised koos nende teenindusmaadega; väärtuslikud põllumajandusmaad; fosforiidikihi paksus ning selle P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus.

Uurimisprobleemi jaoks olulised ruumiandmed on saadud avaandmetena või vastava valdkonna eest vastutavatelt asutustelt päringu teel. Ruumiandmete kihtide väljavõtted jäävad ajavahemikku 11.08–28.10.2021. Tegemist on riiklikest andmekogudest pärinevate andmetega, mida uuendatakse vastavalt nähtuste iseloomule. Analüüsi kaasatud ruumiandmetest kõik peale fosforiidikihi kohta käivate rasterkihtide olid esitatud vektorformaadis. Kõikide kasutatud andmete puhul on riiklikust taustast tulenevalt vastavate nähtuste tõesus, hõlmatus ja esitatavus parim võimalikust kättesaadavast.

Kriteeriume, millega seonduv mõju on eeldatavalt väike, ebaselge või sõltub kaevandusmeetodi valikust, praegusesse analüüsi ei kaasatud. Sellisteks arutluse all olnud nähtusteks on näiteks põlevkivi altkaevandatud alad, geodeetiliste punktide ja maaparandussüsteemide mõjualad, taastatud sood. Fosforiidi kaevandamise perspektiivsete uuringualade väljaselgitamisesse ei kaasatud ka kaevandustegevuse seisukohast väga olulisi põhjavee ja puurkaevude andmestikke, ehkki kaevandamine mõjutab oluliselt veerežiimi. Selle põhjuseks on antud uurimistöös kasutatud andmete ja metoodika põhjal määratletud aladel EGT poolt täiendavalt läbiviidav

hüdrogeoloogiline analüüs, millega selgitatakse modelleerimise teel välja võimalik mõju veerežiimile erinevate kaevanduskohtade ja -meetodite puhul.

## 2.3. Metoodika

Traditsioonilist multikriteeriumilist analüüsi on edukalt kasutatud kaevandamiseks sobivate asukohtade alternatiivide võrdlemiseks ja nende järjestamiseks paremuse alusel (Dey & Ramcharan, 2008; Farkaš & Hrastov, 2021; Gudissa *et al.*, 2020; Hudeji *et al.*, 2013). Eestis leiduva fosforiidi kaevandamiseks kolme perspektiivse uuringuala väljaselgitamiseks kasutati siinses töös multikriteeriumanalüüsi modifitseeritud versiooni koos GIS tarkvara võimalustega, kuna puudusid konkreetset esialgsed alternatiivid, mida omavahel võrrelda. Sisuliselt on tegemist sobivusanalüüsiga, mis tugineb eelnimetatud kahe meetodi võimalustele ja on olemuselt ruumiliste kaalutud ülekatteanalüüside teostamine. Täpsemalt rakendati ekspertgrupi hinnangutel põhineva multikriteeriumanalüüsi põhimõtteid ruumiandmete töötlusel ja nende põhjal järelduste tegemisel ArcGIS Pro tarkvara versioonis 2.8.1. Ekspertgrupp panustas uurimistöösse ülesandepüstituse jaoks oluliste andmete ja nende kaalude määratlemisel. Otsused langetati ekspertgrupis ühiste arutelude teel, kus võeti arvesse nii nähtustega kaasnevaid seadusi kui ka eelnevaid asjakohaseid tööalaseid kogemusi. Ruumiandmete töötlemine, kombineerimine ja sobivamate alade määratlemine toimus ArcGIS võimalusi kasutades.

Ekspertgruppi kuulusid EGT juhatuses Sirli Sipp Kulli ning Jaak Jürgenson, geoinformatsiooni osakonnast Mariliis Aren ning Hando-Laur Habicht, maapõueressursside osakonnast Lauri Joosu, Johannes Vind, Tiit Kaasik ning Kaarel Lumiste, hüdro- ja keskkonnageoloogia osakonnast Maile Polikarpus, ruumiandmete teostajana Karoliina Kurvits ja Tallinna Tehnikaülikoolist Vesta Kaljuste. Tegemist on inimestega, kellel on kogemusi seoses maavarade, nende kaevandamise ja kaevandamisjärgsete tagajärgedega või ruumiandmetega töötamisel. Praeguses etapis täiendavaid huvirühmi hinnangute andmisesse ei kaasatud, kuna tegemist on EGT-sisese uurimusega, mis selgitab välja esialgsed kaevandamiseks perspektiivsed uuringualad ning viib seal läbi vastavad analüüsid.

### 2.3.1. Kriteeriumite kaalumine

Asjakohaste kriteeriumite ehk andmete määratlemisele järgneb multikriteeriumilise analüüsi üks olulisemaid etappe, milleks on kriteeriumitele kaalude määramine ehk nende olulisuse hindamine käsitletava ülesande kontekstis. Tegemist on etapiga, mis mõjutab olulisel määral kogu protsessi tulemust. Kriteeriumite olulisuse hindamine toimus fosforiidi kaevandamist silmas pidades ekspertgrupi ühiste arutelude põhjal. Otsustati, et kuna taoliseks rakenduseks ei ole teadaolevalt ruumilist multikriteeriumanalüüsi kasutatud, siis määratakse kaalud ühise parima teadmise kohaselt kriteeriumeid kolme kategooriasse klassifitseerides. Vastavalt määratletud klassile omandas kriteerium ka kaalu.

Esimesse klassi paigutatud tegurid kujutavad leebeimat käsitletavat piirangut fosforiidi kaevandamisele. Teise klassi kuuluvad nähtused mõjutavad kaevandustegevust suuremal määral, kuid ei välista seda täielikult. Kolmas klass tähistab kasutatud metoodika kohaselt suurimat piirangut ning sellesse kuuluvad kriteeriumid, mis välistavad fosforiidi kaevandamise nendega kattuvatel aladel. Kui kriteeriumi olulisust võis erinevalt hinnata, siis määrati sellele enamasti madalam tähtsus. Järgnevalt on välja toodud täpsemad põhimõtted, mida peeti silmas kriteeriumite kaalude määratlemisel:

1. klassi kuuluvad nähtused, mille mõju potentsiaalsele fosforiidikaevanduse rajamisele on ebaselge või on ekspertgrupi arvates üsna suur võimalus, et leidub leevendusmeetmeid, mille abil kompenseerida kaevandamisest tulenevat negatiivset mõju;
2. klass hõlmab kriteeriume, mille puhul ei ole kaevandustegevuse läbiviimine keelatud või esineb ekspertgrupi hinnangul võimalusi nendega kaasnevate piirangute leevendamiseks teatud juhtudel. Siia alla kuuluvad ka kriteeriumid, mille puhul on pärast läbiviidavat mõjuanalüüsi võimalik kaevandustegevuse välistamine või sellele ulatuslike piirangute sätestamine;
3. klassis on nähtused, mis välistavad seadustest tulenevalt nendega kattuvatel aladel kaevandustegevuse ja ekspertgrupi arvates ei ole nende kitsenduste vähendamine tõenäoline.

Lisas 2 on välja toodud kriteeriumid, neile omistatud kaalud ja vastava kaalu määratlemise põhjendus. Leebeimat piirangut kujutavad ehk 1. klassi kuuluvad järgmised kriteeriumid: III kaitsekategooria liikide elupaigad ja kasvukohad; vääriselupaigad; rohevõrgustik; eraomandis katastriüksused; õuealadega mittekattuvad ohtlikud käitised; metsakõlvikud; maavarade plokid; aktiivsed ja taotletavad uuringualad, mis ei ole EGT või akadeemilise asutuse poolt uuritavad; aktiivsed ja taotletavad mäeeraldised koos nende teenindusmaadega; alla 1000 sõiduki ööpäevas liiklustihedusega avaliku tee kaitsevööndid; elektripaigaldiste mõjualad, mille nimipinge on  $< 35$  kV; gaasipaigaldised peale maagaasi ülekandevõrkude; muud teed ja tänavad; sideehitiste mõjualad; ühisveevärgi- ja kanalisatsiooni vööndid; väärtuslikud maastikud; miljööväärtuslikud objektid ja alad; kohaliku tähtsusega kaitsealused objektid; kaunid kohad, vaated ja vaatamisväärsused; pärandkultuur ja -objektid; väärtuslikud põllumajandusmaad.

Olulist mõju omavad käsitletava probleemi kontekstis looduskaitseline piiranguvöönd; looduskaitsealad; hoiualad; I ja II kaitsekategooria liikide elupaigad ning kasvukohad; kaitstavad looduse üksikobjektid ja nende kaitsetsoonid; projekteeritavate kaitstavate üksikobjektide planeeritavad kaitsetsoonid; kohalike omavalitsuste kaitstavad loodusobjektid ja nende piiranguvööndid; püsielupaigad; veekogude ranna või kalda piiranguvööndid; alad, kus asustustihedus on  $< 15$  in/km<sup>2</sup>; tootmisõued; muinsuskaitsemälestised ja nende kaitsevööndid; üle 1000 sõiduki ööpäevas liiklustihedusega avaliku tee kaitsevööndid; elektrivõrkude mõjualad, mis ümbritsevad paigaldisi nimipingega  $\geq 35$  kV; maagaasi ülekandevõrgu trassid; riigikaitsealuste rajatiste mõjualad. Kõik eelnimetatud nähtused omandasid kaalu vastavalt klassile 2.

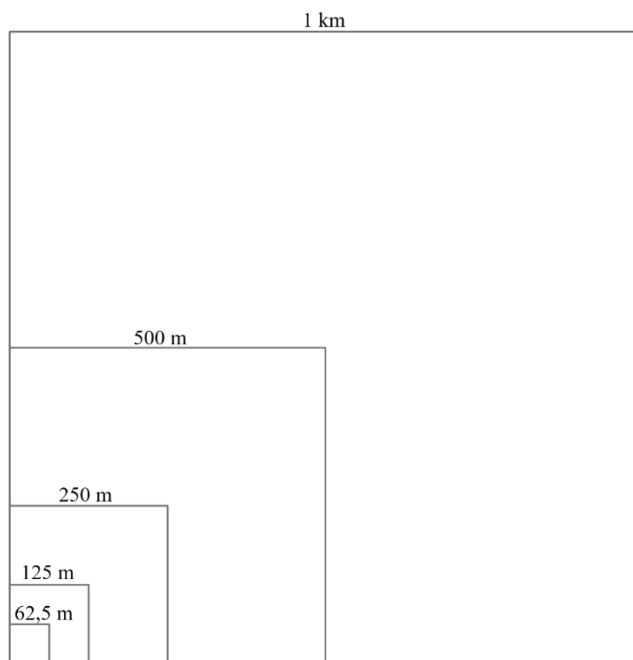
Eesti fosforiidi kaevandamist välistavad praeguse metoodika kohaselt looduskaitsealustest vöönditest loodusreservaat ja sihtkaitsevöönd, Natura 2000 loodus- ja linnualad ning  $\geq 15$  in/km<sup>2</sup> asustustihedusega alad, mis kuuluvad klassi 3. Eelnevast kategoriseerimisest ilmneb, et arvesse võetud kriteeriumitest rahvastikutiheduse ruutkaart ja transpordialased, elektri- ning gaasivõrkude mõjualad on omakorda jagatud mitmesse klassi ehk kriteerium omandab vastavalt nähtuse omadustele erineva olulisuse.

Eelpool väljatoodud ja kaalutud kriteeriumite puhul on tegemist nähtustega, mis mõjutavad võimalikku fosforiidi kaevandustegevust negatiivsest küljest. Nagu andmete ehk kriteeriumite all kirjeldatud, on kasutada ka fosforiidi kaevandamist positiivselt mõjutavad andmekihid fosforiidikihi paksuse ja selle fosforiühendi sisalduse kohta. Ülevaade kaevandustegevusele soosivat mõju avaldavate kriteeriumite arvestamisest on peatükis 2.3.3.

### 2.3.2. Ruumiandmete rasterdamine

Erinevate analüüsi kaasatud kriteeriumite arvestamiseks samas suurusjärgus otsustati kõik andmekihid viia rasterkujule. Kriteeriumite rasterdamise eesmärk oli kõikide arvesse võetud nähtuste üleviimine ühtse ruumilise lahutusega rasterformaati, et andmekihte oleks võimalik omavahel edukalt kombineerida ja arvestada nendest tulenevaid mõjusid üksteist täiendavalt. Nagu eelnevalt nimetatud, olid kõik kaevandamistegevusele piirangut kujutavad andmekihid vektorformaadis. Kuna rahvastikutiheduse andmekihil olid väärtused agregeeritud 1 km<sup>2</sup> suuruste alade kohta, siis kasutati selle ruutkaarti lahutust kõikide andmestike rasterkujule viimise aluseks.

Rahvastikutiheduse ruutkaardi ühekilomeetrise küljepikkusega pikslit hakati aina neljaks väiksemaks võrdseks osaks jagama. Antud protsess kordus tekkinud väiksemate pikslite puhul, kuni saadi piksel küljepikkusega 62,5 m. Saadud 62,5x62,5 m piksel moodustab esialgselt 1x1 km pikslist 1/256 (joonis 5). Lõplik piksli suurus otsustati samuti ekspertgrupi aruteludes. Vastava ruumilise lahutuse põhjenduseks sai asjaolu, et paljud analüüsi kaasatud kriteeriumid on ulatuselt palju väiksemad kui 1 km ning seega taolise suurusega piksli kasutamine omistaks piiranguvööndi ulatuslikele aladele ka väga väikeste piirangut kujutavate nähtuste puhul. Seeläbi oleks kõikide arvesse võetud nähtuste mõju kõvasti ülepaistunud. Piksel küljepikkusega 62,5 m on aga sobiva suurusega, et ka väiksemaid nähtusi piisavalt täpselt arvesse võtta ning on praeguses etapis kohase detailsusastmega. Liiga väikese lahutusega piksel tekitaks üleliigset andmemahtu ja aeglustaks andmetöötlust. Seega viidi kõik kaevandustegevust negatiivselt mõjutavad kriteeriumid 62,5x62,5 m lahutusega rastrite kujule, sealhulgas rahvastikutiheduse ruutkaart.



Joonis 5. Rasterdamiseks sobiva piksli suuruse määratlemine küljepikkusega 62,5 m.

Rasterdamisel lähtuti vastaval andmekihil esinevate nähtuste olemasolust. Andmete rasterkujule viimiseks võeti aluseks eelnimetatud negatiivsed kriteeriumid vastavalt neile omistatud kaaludele. Kui piirangut kujutav nähtus teatud pikslis puudus, siis omandas see piksel väärtuse 0 ehk kaevandustegevusele ei esine piiranguid. Kui vaadeldav nähtus seal aga paiknes, siis omandas piksel väärtuse 1, mis tähistab piirangu olemasolu. Kaevandustegevust välistavate kriteeriumite puhul oli rasterdamise põhimõte vastupidine ehk piksel omandas väärtuse 0, kui selles esines välistav kriteerium ja 1 siis, kui seda ei esinenud. Selline erinevus tuleneb

asjaolust, et hiljem välistavaid kihte omavahel korrutades saaks eristada alad, kus kaevandustegevus on praeguse meetodika kohaselt keelatud. Selle etapi tulemusena saadi rasterformaati viidud ruumiametmete kihid binaarsel kujul vastavalt nähtuste esinemisele.

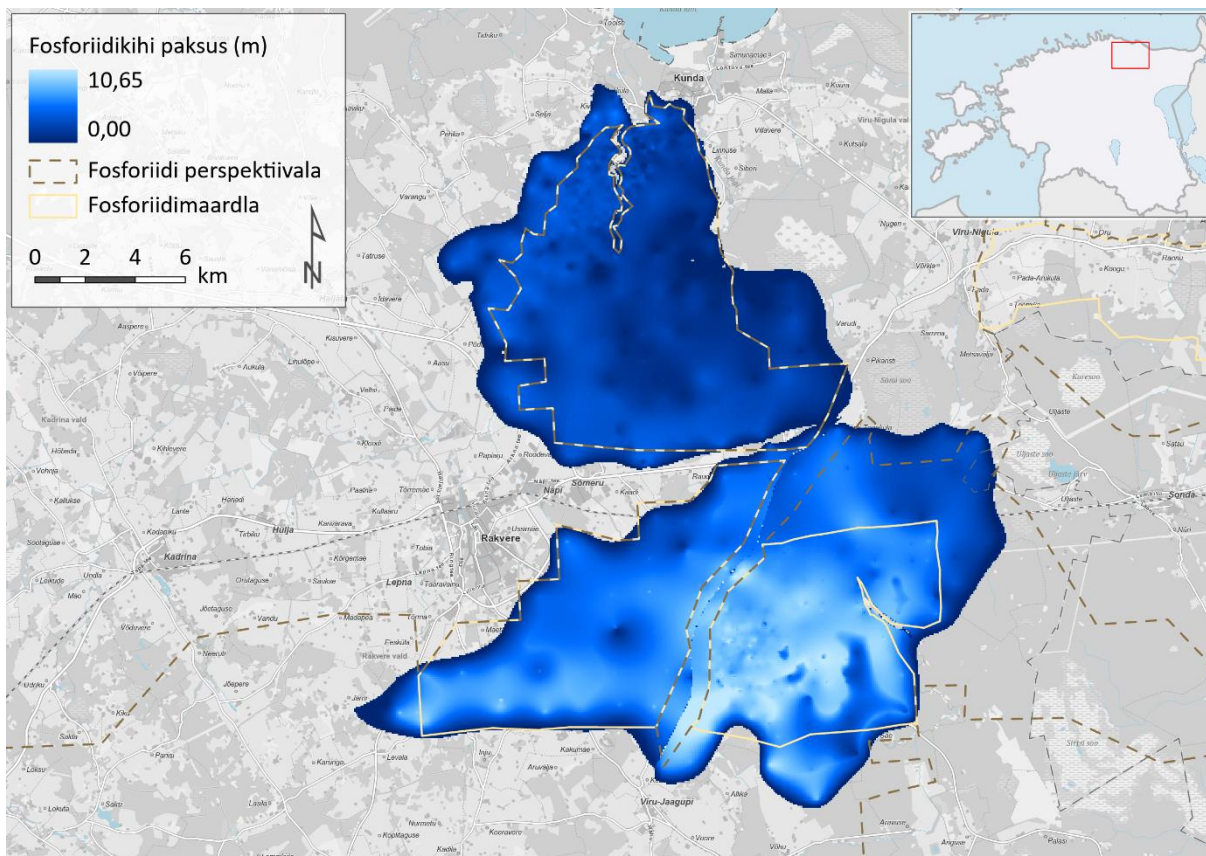
Rasterdatavaid kriteeriume oli kolme tüüpi, mis olid esitatud vektorformaadis punktide, joonte või polügoonide kujul. Igat tüüpi nähtuste puhul kasutati selle rasterkujule viimiseks erinevaid põhimõtteid. Punktobjektide puhul kujunes piirang sellesse pikslisse, kuhu vastav nähtus jäi. Joonobjektide rasterdamisel oli oluline, et iga objekt oleks esitatud vähemalt ühe piksli laiuse pideva piiranguvööndina ehk moodustuks kõrvuti asetsevatest pikslitest vertikaal-, horisontaal- või diagonaalsuunas. Sealhulgas arvestati joone kulgemist ja selle osakaalu pikslites. Piirang omistati vastavalt sellele, millist kõrvuti esinevatest pikslitest läbis nähtus suuremas ulatuses. See tähendab, et kui näiteks joon läbis pikslit vaid väga vähesel määral selle nurgast, siis see ala kasutatava meetodika kohaselt kaevandamisele piirangut ei kujuta.

Vektorformaadis polügoonidena esitatud kriteeriumite korral kasutati mitmeid rasterkujule viimise põhimõtteid vastavalt nende ruumilisele ulatusele. Suuremate nähtuste puhul omandasid rasterdamisel piirangu need pikslid, millest objekt moodustas vähemalt poole nende pindalast. See tähendab, et teatud servaalad jäid piiranguna esitamata. Nähtused, mis olid küll polügooni tüüpi, ent sarnanesid olemuselt joonobjektidele, viidi rasterkujule vastavalt eelpool kirjeldatud joone tüüpi objektide rasterdamisele. See tähendab, et pikkade ja kitsaste polügooni tüüpi nähtuste puhul oli põhimõtteks nende esitamine vähemalt ühe piksli laiuse pideva piiranguvööndina. Väga väikesed polügooni tüüp nähtused, mis ei moodustanud ühegi piksli pindalast vähemalt poolt, rasterdati selliselt, et need oleksid piiranguna esitatud vähemalt ühe pikslina, vastavalt sellele, kuhu langes nähtuse suurim pindalaline osa või keskpunkt.

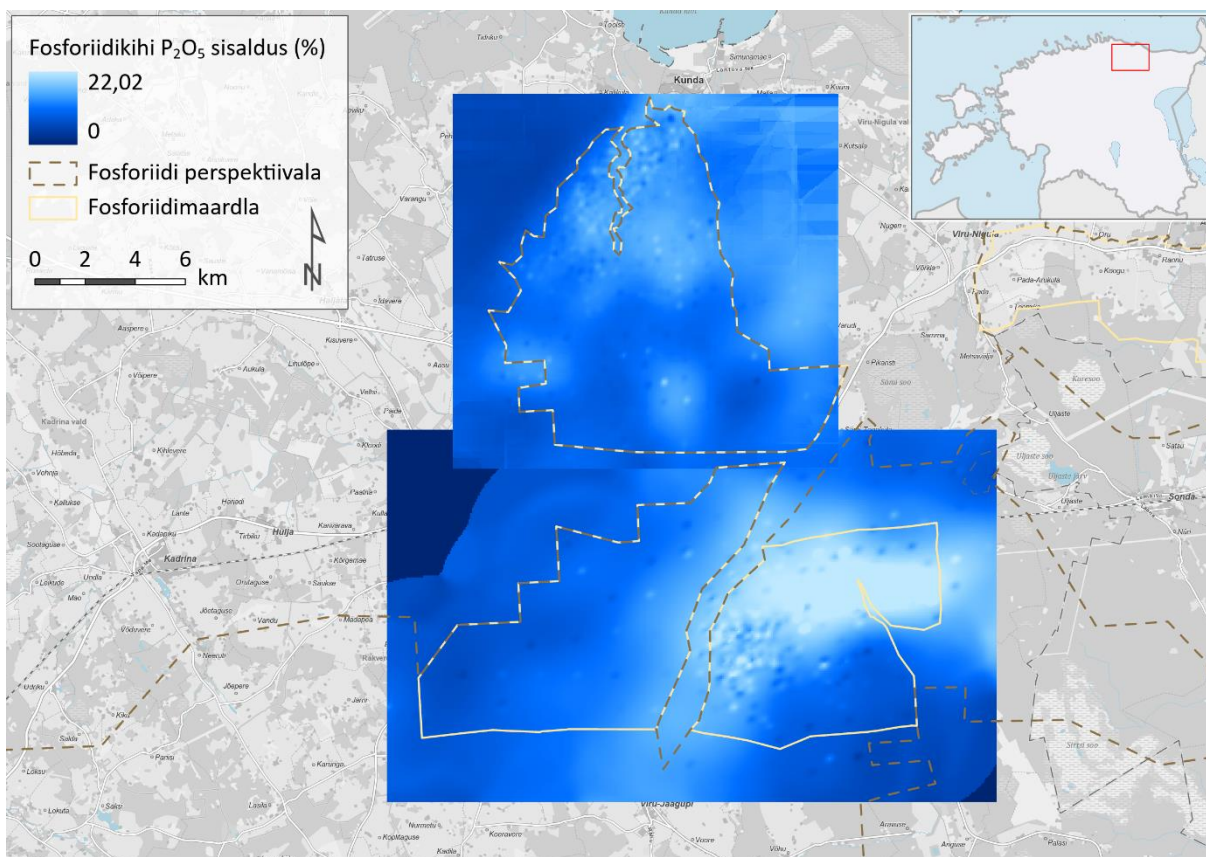
Vaadeldava ala rahvastikutiheduse ruutkaardi ühekilomeetrised alad jagati igatüks samuti 256 väiksemaks piksliks, mille küljepikkuseks oli 62,5 m. Selle andmestiku puhul omandasid suurema detailsusega kihil piirangu need pikslid, kus rahvastikutiheduse kaardi järgi asustatud ala kattus Maa-ameti ETAK andmekogu eraõuedega. Eelduste kohaselt elavad kõik inimesed seda tüüpi aladel ning seeläbi saab kahte andmestikku omavahel kombineerides rahvastikutiheduse ruutkaarti mõnevõrra detailsemaks muuta.

### **2.3.3. Fosforiidi tootlus**

Eelnevalt välja toodud kriteeriumid on kõik fosforiidi kaevandamist silmas pidades piiravad tegurid ehk avaldavad kaevandamise perspektiivsete uuringualade määratlemisele negatiivset mõju. Lisaks kitsendustele on praeguses kontekstis kasutada ka kaevandustegevust positiivselt mõjutav andmestik, mis väljendab fosforiidikihi paiknemist ja selle paksuse ning fosforiühendi sisalduse varieeruvust ruumis. Puuraukude kohta olid olemas vektorkujul punktobjektid koos vastavate atribuutandmetega nii Toolse kui Rakvere fosforiidimaardlate piirkondade kohta. Fosforiidi kaevandamist soosivad kihid on interpoleeritud puuraukudest pärineva informatsiooni põhjal ja need saadi EGT-lt. Fosforiidi tootluse arvutamiseks olid kasutada interpoleeritud fosforiidikihi paksus meetrites (joonis 6) ehk tootuskiht ning selle fosforiühendi  $P_2O_5$  protsentuaalne sisaldus (joonis 7). Interpoleeritud kihtide piksli küljepikkuseks määrati samuti 62,5 m ja selle samm seati piirangut kujutavate kriteeriumite rastritega ühtivaks. Seeläbi on hiljem võimalik kihtide põhjal edukalt ülekatteanalüüse teostada.



Joonis 6. Interpoleeritud fosforiidikihi paksus meetrites (aluskaart: Maa-amet, 2022).



Joonis 7. Interpoleeritud fosforiidikihi protsentuaalne P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus (aluskaart: Maa-amet, 2022).

Interpoleeritud rasterkihid fosforiidi paksuse ja fosforiühendi sisalduse kohta kombineeriti omavahel, et luua fosforiidi tootlust väljendav kiht, mis kirjeldaks piksli kohta selles leiduva fosforiidi eeldatavat tootlust tonnides ruutmeetri kohta. Fosforiidi tootluse rasterkihti võib iseloomustada ka kui fosforiidi kvaliteedi andmekihti, mida siinses töös samuti edaspidi kasutatakse. Puuraukude andmestiku põhjal interpoleeritud kihte ja fosforiidi tiheduse väärtust kasutati fosforiidi kvaliteedi varieeruvust kirjeldavate rasterkihtide arvutamiseks mõlema maardla piirkondade kohta. Joonisel 8 on näha arvutatud fosforiidi tootlus Toolse ja Rakvere maardlates. Täpne rasterkalkulatsioon koostati vastavalt valemile 1:

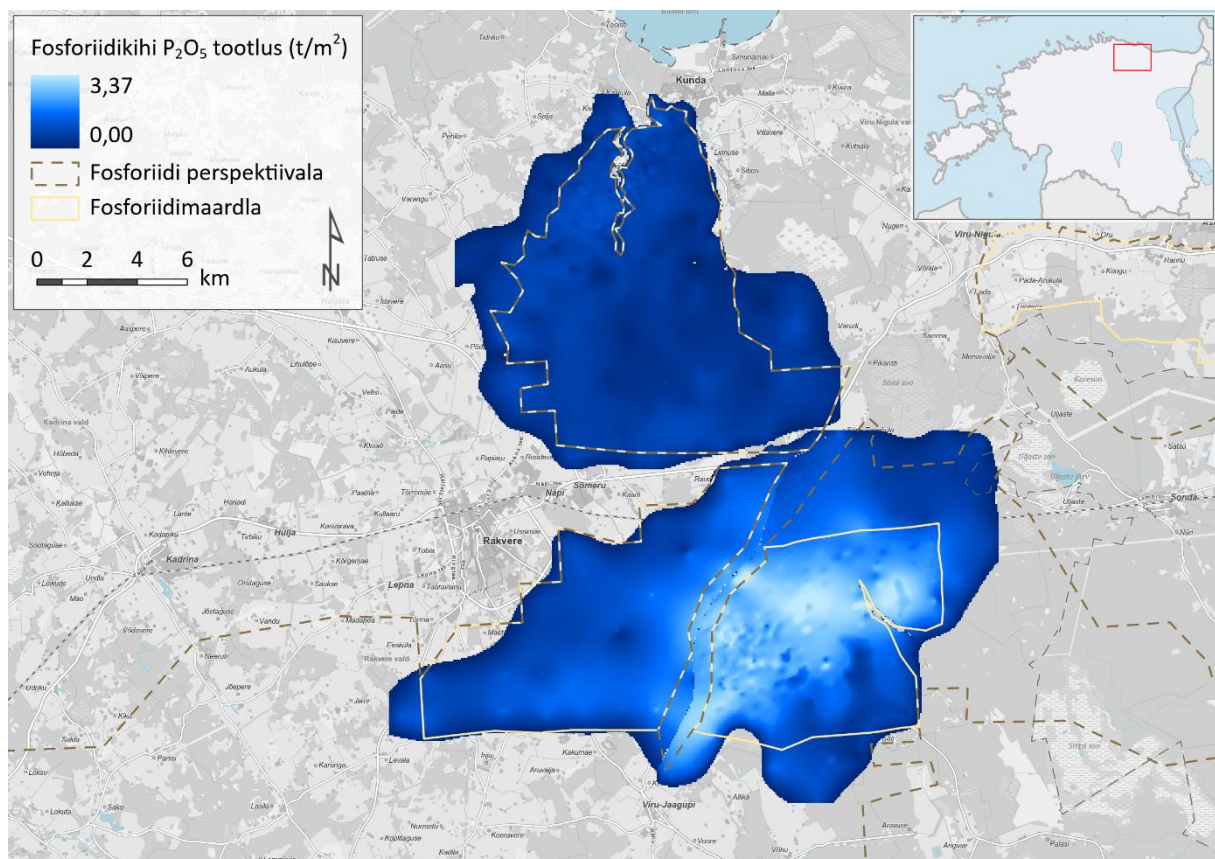
$$[P_2O_5\text{-tootlus}] = [paksus] \times [pr\_sisaldus] \times 2,1 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{valem 1), kus}$$

$[P_2O_5\text{-tootlus}]$  on tulemuseks saadud  $P_2O_5$  tootluse rasterkiht ( $t/m^2$ );

$[paksus]$  on puuraukude andmestiku põhjal interpoleeritud fosforiidikihi paksuse (m) raster;

$[pr\_sisaldus]$  on puuraukude andmestiku põhjal interpoleeritud fosforiidikihi  $P_2O_5$  sisalduse (%) raster;

$2,1 \text{ kg/m}^3$  on fosforiidi kuivmahu kaal.



Joonis 8. Fosforiidi tootlus Toolse ja Rakvere maardlate piirkondades (aluskaart: Maa-amet, 2022).

Fosforiidi tootluse rastri puhul otsustati ekspertgrupi poolt selle olulisust hinnata teisiti kui eelnevate piirangut kujutavate kihtide puhul ja kaaluda see võrdseks negatiivsete kriteeriumite kombineeritud kihtide maksimaalset piiranguväärtust omava piksli absoluutväärtusega. Selline otsus sai vastu võetud, kuna ei ole eelnevat kogemust ega teaduskirjandusel põhinevat informatsiooni fosforiidi kvaliteedi kaalumise osas kaevandamist piiravate teguritega võrreldes. Taoline fosforiidi kvaliteedi võimendamine tuleneb sellest, et tegemist on peamise ja praeguses etapis ainsa teguriga, mis mõjutab fosforiidi kaevandamiseks perspektiivsete uuringualade

valikut positiivsest küljest. Probleemipüstituse kontekstis positiivse kriteeriumi väärtuste võrdseks kaalumise kombineeritud negatiivsete kriteeriumite maksimaalse absoluutväärtusega pikslis ja selle põhjal fosforiidi tootluse väärtuste normeerimine ning teiste kriteeriumitega kombineerimine on täpsemalt kirjeldatud peatükis 2.3.4.

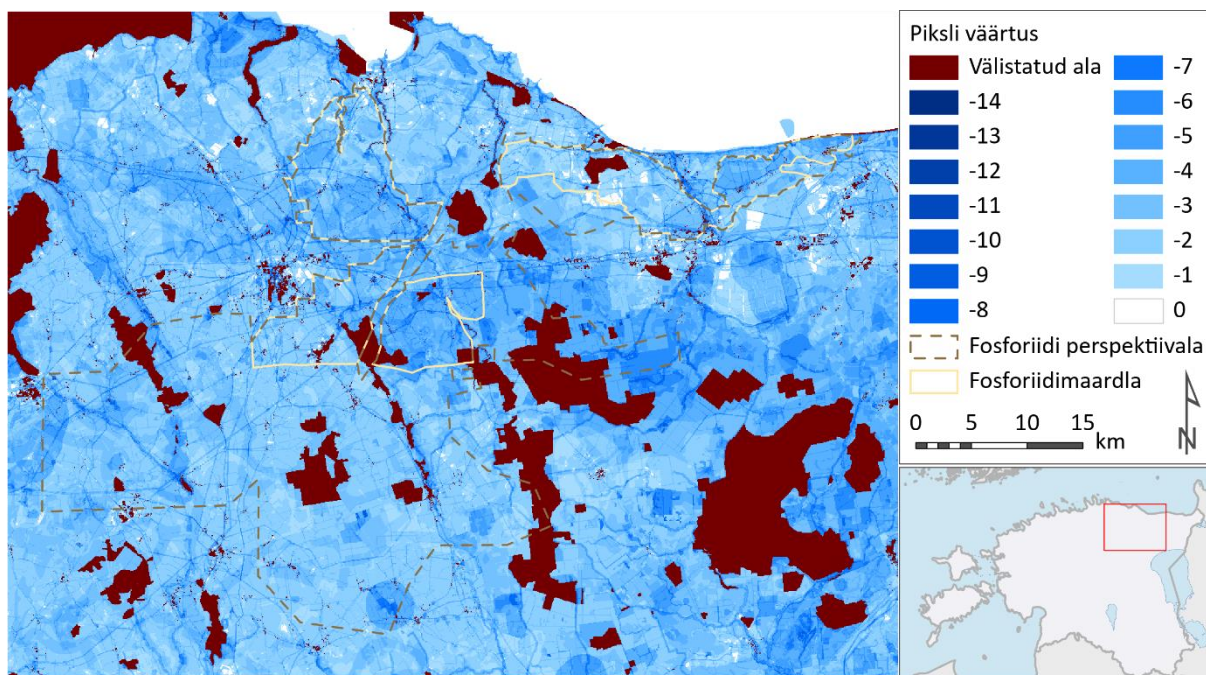
#### **2.3.4. Kriteeriumite kombineerimine**

Multikriteeriumanalüüsi järgmiseks sammuks pärast kriteeriumite kaalumist on nende omavaheline kombineerimine. Analüüsi kaasatud fosforiidi kaevandamise perspektiivsete uuringualade määramiseks olulised kriteeriumid kombineeriti omavahel mitmes etapis. Esiialgu summeeriti omavahel negatiivsed kriteeriumid ning seejärel arvestati täiendavalt fosforiidi kvaliteedi andmekihti alade lõplike sobivushinnangute leidmiseks.

Kõigepealt kombineeriti omavahel kaevandustegevust negatiivselt mõjutavad kriteeriumid ehk piirangut kujutavad ja välistavad kihid. Seda tehti multikriteeriumilises analüüsis kasutatud kaalutud lineaarkombinatsiooni ehk kaalutud summeerimise meetodil, mille põhimõtteks on kriteeriumi väärtuste läbikorrutamine sellele määratud kaaluga ning seejärel kriteeriumite omavaheline summeerimine. Praeguses töös oli tegemist binaarsele kujule viidud kriteeriumite korrutamiselega neile omistatud kaaludega ja seejärel saadud kihtide kokkuliitmisega. Arvutus tehti esmalt rasterkalkulatsiooni abil kriteeriumitega, mis olid omandanud kaalu 1 või 2. Tulemusena saadi täisarvuliste väärtustega andmekiht, mis esitab kombineeritud piirangukihid.

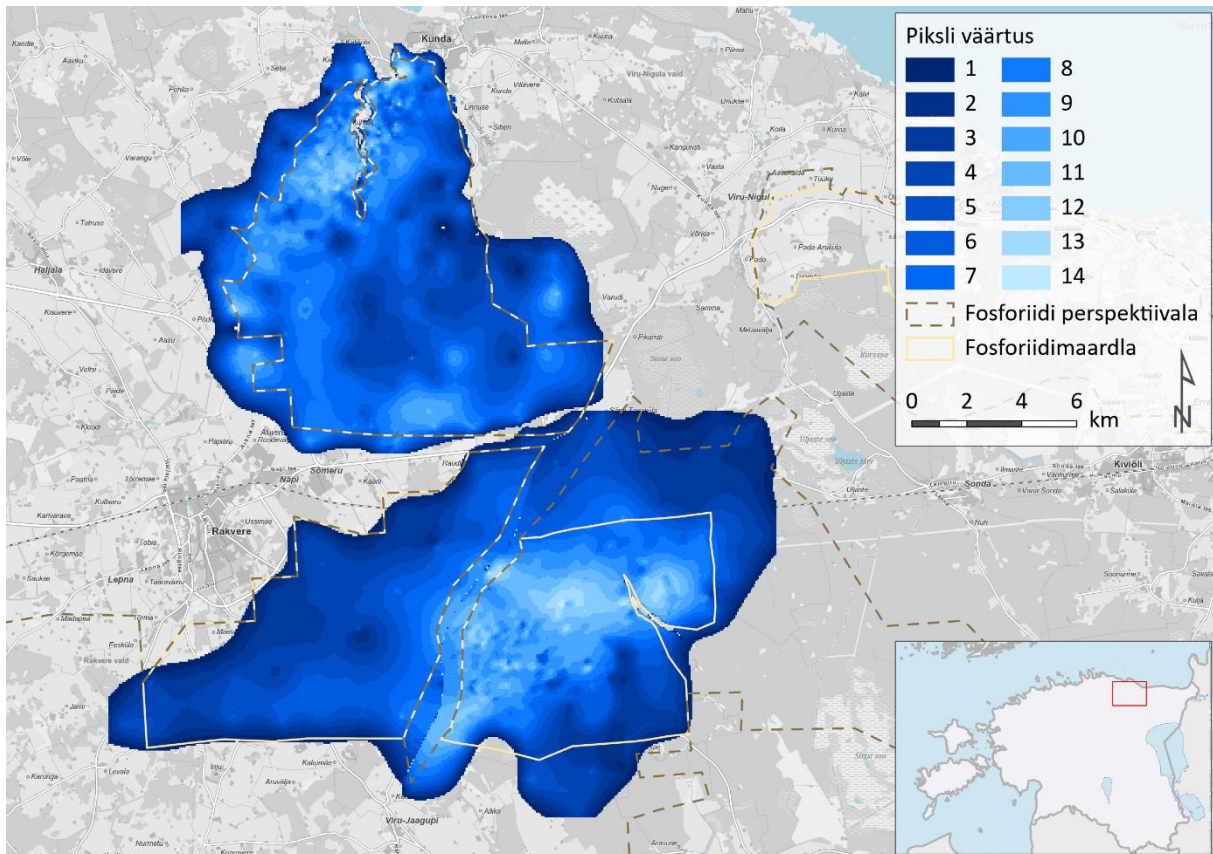
Täiendavalt tuli arvestada välistavaid kihte kaaluga 3, mis olid samuti rasterdamise teel viidud binaarsete väärtuste kujule. Esmalt korrutati välistavad kihid omavahel rasterkalkulatsiooni teel, et eristada kõik uurimisala piirkonnad, kus kaevandustegevus on välistatud. Tulemkihil omandasid väärtuse 0 need alad, kus kaevandamine on keelatud. Kuna välistavate kriteeriumite puhul on tegemist absoluutsete teguritega kaevandustegevust silmas pidades, siis võiks kaaluda ka piirangute ja välistuste koondrastrite omavahelist korrutamist, et kihtide läbikorrutamisel omandaksid kõik sellised pikslid väärtuse null, kus kaevandustegevust välistav kriteerium esineb. Praegusel juhul ei annaks selline arvutuskäik aga õigeid tulemusi, sest piirangute summeeritud kihil esineb ka alasid, kus piiranguga pikslid puuduvad ehk omavad väärtust 0. See tähendaks, et välistuste kihiga korrutades jääb nende pikslite väärtuseks endiselt 0 ja edasistes sammudes ei ole võimalik eristada alasid, kus on fosforiidi kaevandamine metoodika kohaselt täielikult välistatud, nendest aladest, kus mingeid piiranguid tegelikkuses üldse ei leidu.

Seetõttu klassifitseeriti kombineeritud välistavate kriteeriumite rasterkiht ümber selliselt, et väärtus -100 esitas pikslid, kus leidus taolisi absoluutseid piiranguid ja väärtusega 0 tähistati pikslid, milles taolisi nähtusi ei esinenud. Seejärel kombineeriti välistavate ja piirangut kujutavate kriteeriumite koondrastrid omavahel samuti summeerimise teel. Välistavate kriteeriumite mitte-esinemise väärtuse 0 tõttu ei muutunud nendest puutumata pikslite väärtused. Saadud kombineeritud negatiivsete kriteeriumite tulemkiht korrutati läbi väärtusega -1, et väljendada koondatud nähtuste ebasoosivat olemust kaevandustegevuseks ja klassifitseeriti ümber selliselt, et välistavad alad oleksid esitatud ühe väärtusena (-100). Kõikide negatiivsete kriteeriumite kombineerimisel saadud väärtuste varieeruvus analüüsitud alal on näha joonisel 9. Väärtusega 0 on tähistatud alad, kus ei esine kaevandustegevust piiravaid ega välistavaid tegureid.



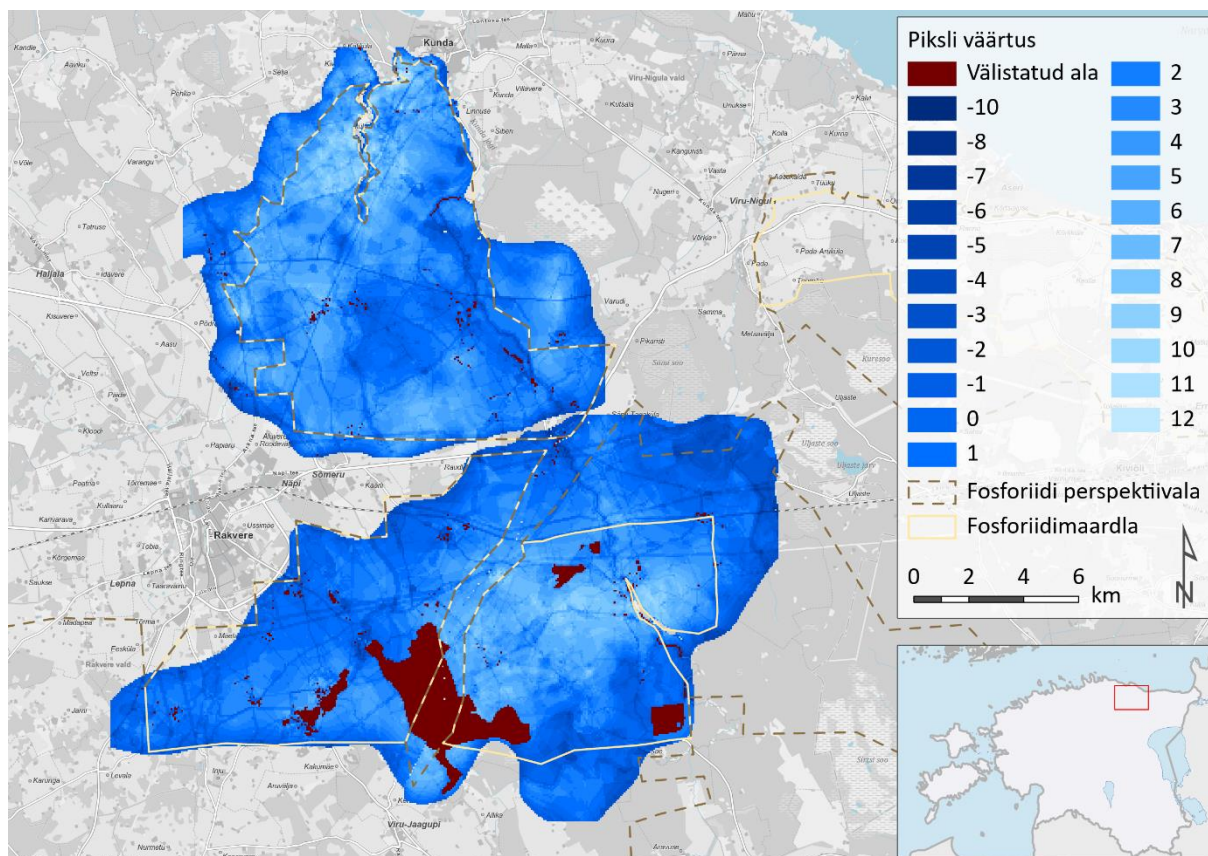
Joonis 9. Kombineeritud kaevandamistegevust piiravad ja välistavad kriteeriumid.

Selleks, et saaks omavahel kombineerida nii negatiivseid kui ka positiivseid kriteeriume, peavad nendes andmekihtides esitatud väärtused mõlemad väljendama sobivust või ebasobivust fosforiidi kaevandamiseks. Seetõttu tuli fosforiidi kvaliteedi rasterkihi väärtuste puhul, mis esitasid maavara tootlust tonnides ruutmeetri kohta, läbi viia normeerimine seoses väärtuste kombineerimisega negatiivsete kriteeriumitega. Nagu eelmises alapeatükis on välja toodud, otsustati fosforiidi kvaliteedi rasteri maksimaalne väärtus võrdsustada negatiivsete kriteeriumite kombineeritud kihi maksimaalse piksli absoluutväärtusega, milleks oli 14. Seega jäid ümberklassifitseeritud fosforiidi kvaliteedi rasteri väärtused vahemikku 1–14, mis väljendavad sobivust kaevandustegevuseks maavara tootluse aspektist. Normeerimine toimus lineaarselt ja seega esitavad kõik fosforiidi tootluse ümberklassifitseeritud 14 väärtust võrdsed vahemikke. Toolse ja Rakvere maardlate piirkondades toimus fosforiidi kvaliteedi rasterkihi väärtuste ümberklassifitseerimine kaevandamistegevuse sobivust kirjeldavateks väärtusteks üksteisest eraldiseisvalt, kuna nendes leiduv fosforiit ei ole selle kihi paksuse ega fosforiühendi sisalduse poolest võrreldavad. Fosforiidi kvaliteedi põhjal sobivushinnanguteks ümberklassifitseeritud väärtused on esitatud joonisel 10, kus 1 tähistab minimaalset ja 14 maksimaalset fosforiidi tootlust.



Joonis 10. Fosforiidi kvaliteedi põhjal alade sobivus kaevandustegevuseks (aluskaart: Maa-amet, 2022).

Ülesandepüstituse kontekstis tuleb perspektiivsete fosforiidi uuringualade määratlemiseks, arvestades nii maavara kvaliteeti kui ka eri tüüpi ebasoosivaid nähtusi, omavahel kombineerida analüüsi kaasatud positiivne ja negatiivsed kriteeriumid. Eelnevast kirjeldusest selgus, et piirangute ja välistuste kombineeritud rasterkiht esitati lõpuks negatiivsete väärtustena ja normeeritud fosforiidi kvaliteedi raster positiivsete väärtustena. Kasutades rasterkalkulatsiooni, on võimalik need olemuselt vastandlikud kriteeriumid summeerides kombineerida ja leida iga piksli kohta sellesse jääva ala sobivushinnang kaevandustegevuseks kasutatud meetodika kohaselt. Negatiivsed väärtused tähistavad, et kaevandustegevust piiravad tegurid kaaluvad üle fosforiidi tootluse ja positiivsete väärtuste korral on olukord vastupidine. Väärtuse 0 korral on tegemist aladega, kus kaevandamist soosivad ja mittesoosivad kriteeriumid on tasakaalus. Kuna fosforiidi kvaliteedi andmestik oli väiksema territooriumi kohta, kui kogu esialgne uurimisala, siis on ka sobivushinnangud leitavad ainult nende alade ulatuses. Joonisel 11 on näha Toolse ja Rakvere maardlate piirkondade sobivushinnangud fosforiidi kaevandamiseks piksli täpsusega.



Joonis 11. Toole ja Rakvere maardlate piirkondade sobivushinnangud fosforiidi kaevandamiseks (aluskaart: Maa-amet, 2022).

### 2.3.5. Esialgsete perspektiivsete uuringualade määratlemine

Esialgsed fosforiidi kaevandamise uuringualad analüüsitud territooriumil selgitati välja automatiseeritud GIS päringute teel. Selleks kasutati kriteeriumite kombineerimisel saadud sobivushinnangute rasterkihti, millest eraldati välja kõrgema väärtusega pikslitest moodustuvad ühtsed ja suuremad alad. Kõrgema sobivushinnanguga ulatuslikumad alad moodustusid sinna, kus kõrvuti paiknevates pikslites esineb vähe kaevandamist piiravaid kriteeriume ja samas on seal hea fosforiidi tootlus. Esialgu eraldati päringu põhjal alad, kus sobivushinnangud ei olnud negatiivses skaalas, et jätta välja piirkonnad, kus piirangud ületavad fosforiidi kvaliteedi.

Päringuga saadud ühtsematele ja suurematele aladele kaasati juurde neis esinevad üksikud madalama väärtusega pikslid ning sissesopistused, kuna kaevandamisel oleksid sellised elemendid takistuseks. Lõplike alade piiritlemisel võib olla vajalik nendesse arvestada ka teatud määral negatiivse sobivushinnanguga pikslid, kui need jäävad ulatusliku kaevandamiseks sobiva ala sisse. Sellised erandid sõltuvad suurel määral esinevate ebasoosivate kriteeriumite olemusest. Pidevuse ja suuruse tingimused on alade puhul olulised, kuna kaevandamist ei ole otstarbekas ja võimalik läbi viia väikestel eraldatud aladel. Kaevandustegevus ise ja selle jaoks vajalik teenindusmaa nõuavad mõlemad ulatuslikke territooriume.

Samuti peeti päringus sobivushinnangu alampiiri täpsustamisel silmas eeldatavate fosforiidikaevanduste mahulist tootlikkust nende käitamisperioodil ja sellest tulenevat pindalalist ulatust vajaliku koguse  $P_2O_5$  ühendi hankimiseks koos esinevate kadudega. EGT on välja toonud, et kuna teadaolevalt ei ole üheselt defineeritud mõistliku ala suurust fosforiidi kaevandamiseks ega ole ka vastavaid analüüse läbi viidud Eesti fosforiidi põhjal, siis võetakse

arvesse fosforiidi kaevandamise tavadid mujalt maailmast (Kurvits *et al.*, 2022). Maailmas leiduvate fosforiidikaevanduste näitel ja EGT väliseksperdi arvamusele tuginedes on määratletud, et vajalikuks fosforiidikaevanduse tootluseks võetakse 1 Mt fosforiidi tooret aastas 20 aasta jooksul, mille P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus oleks ligikaudu 30% (Kurvits *et al.*, 2022). Lisaks tuuakse välja, et 50% arvestatakse täiendavalt kaevandamisel esinevateks erinevat tüüpi kadudeks. Nendest põhimõtetest lähtuvalt on määratletud, et nii Toolse kui Rakvere maardlates peaks perspektiivne uuringuala hõlmama mahult 10–11 Mt P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Kurvits *et al.*, 2022). Väljatoodud fosforiühendi tootlusele põhinedes on võimalik moodustada sobiva suurusega alad, mille ulatus sõltub piirkonna fosforiidi kvaliteedist.

### 2.3.6. Perspektiivsete uuringualade piiride täpsustamine ja analüüs

Päringu põhjal väljaselgitatud fosforiidi kaevandamise perspektiivsete uuringualade piire täpsustati manuaalselt, võttes arvesse esinevaid piiranguid, fosforiidi kvaliteeti ja eelmises alapeatükis väljatoodud fosforiidikaevanduste rajamise kriteeriumi soovitud tootlusest tulenevalt. Samuti peeti silmas, et ruumianalüüsi eesmärk oli määratleda kolm fosforiidi kaevandamise perspektiivset uuringuala, millest üks jääks Toolse maardlasse ja kaks Rakvere maardla aladele. Perspektiivsete uuringualade ulatuse täpsustamisele järgnes analüüsietapp, milles käsitleti erinevaid algseid ja töö käigus arvutatud andmekihte ning nende esinemist piiritletud aladel. Olulisemate nähtuste puhul anti ülevaade piirangutest ka territooriumeid ümbritsevas ühekiilomeetrises puhvris.

Toolse maardlas oli eesmärk piiritleda üks perspektiivne uuringuala, mistõttu otsustati, et edasiseks analüüsiks jääb alles päringu põhjal piiritletud esialgne ala 2. Seda ala kutsutakse kui Toolse perspektiivset uuringuala. Määratletud territooriumi parem sobivus seisnes asjaolus, et see ei ületa Toolse jõge, millest tulenevalt oleks kaevandamine raskendatud ja majanduslikult oluliselt kulukam. Lisaks esines seal vähem negatiivse sobivushinnanguga piksleid alaga 1 võrreldes. Päringuga piiritletud esialgset ala tuli veidi suurendada, et saada arvutuslik tootlus vähemalt 10–11 Mt P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Lisaks vaadati määratletud ala kattuvust erinevate piirangut kujutavate kriteeriumitega ning arvestati fosforiidi kvaliteedi varieeruvust piirkonnas. Seal, kus võimalik, välditi või vähendati Toolse perspektiivse uuringuala kattumist kaevandustegevust ebasoosivate teguritega.

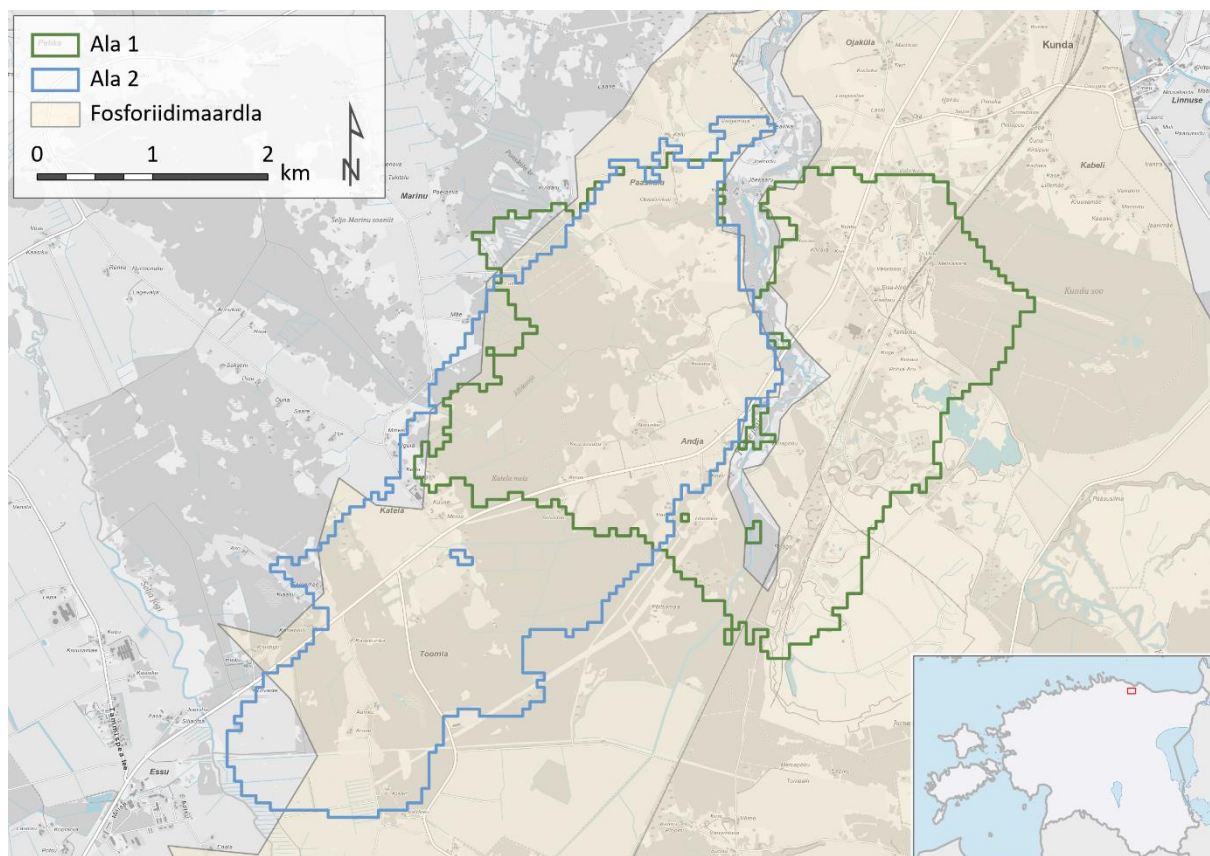
Rakvere maardlas oli eesmärk piiritleda kaks fosforiidi kaevandamise perspektiivset uuringuala. Otsustati, et üks jääb Kunda jõest läände ja teine idasse. Vastavalt geograafilisele asukohale ja läheduses paiknevatele asulatele nimetatakse Kunda jõest läände jäävat piiritletud maa-ala edaspidi kui Põlula (ala 1 ja 2 kombineeritult) ja idapoolset kui Ulvi (ala 3) perspektiivset uuringuala. Põlula perspektiivse uuringuala puhul otsustati ekspertgrupi hinnangule toetudes esmalt omavahel kokku liita jõest läände jäävad esialgselt päringuga määratletud sobivamad alad. Saadud suurema ala ulatust sai olulisel määral vähendada, et saavutada piirkonnas vajalik P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tootlus. Piiride täpsustamisel peeti silmas lisaks tootlusele ka kattumist erinevate piirangutega. Ulvi perspektiivse uuringuala puhul oli vaja esialgset päringu põhjal määratletud ala suurendada, et saavutada soovitud P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tootlus, arvestades samal ajal ka piirkonnas esinevate piirangutega.

### 3. Tulemused

#### 3.1. Esialgsed perspektiivsed uuringualad

Esialgsete perspektiivsete uuringualade määratlemisel tekkisid päringu põhjal Toolse maardla territooriumil ulatuslikumad ühtsed alad, kui sobivushinnang defineeriti alates väärtusest 6. Sellisel juhul oli ka fosforiidi tootluse rastri väärtus alal vähemalt 6. Päringu põhjal eraldatud pikslitest jäid valikusse need, mis moodustasid ühtse suurema tuumala ning sellesse arvestati täiendavalt sisse väiksemad madalama sobivushinnanguga piirkonnad. Selle tulemusena tekkis esialgne võimalik fosforiidi kaevandamise perspektiivne uuringuala, mis on joonisel 12 esitatud kui ala 1. Päringu abil piiritletud territooriumi sobivushinnang jäi negatiivseid piksleid arvestamata vahemikku 0–12 (keskmine 6,2 ning mediaan 6), pindala oli 13,4 km<sup>2</sup> ja fosforiidi tootlus 9,3 Mt.

Toolse maardlas piiritleti ka teine esialgne fosforiidi kaevandamise perspektiivne uuringuala, mille puhul määratleti päringuga sobivushinnang alates väärtusest 5. Sellisel juhul oli ka fosforiidi tootlus väärtuselt vähemalt 5. Sarnaselt alale 1, liideti ka siinkohal ühtsemale päringuga defineeritud tuumalale juurde väiksemad madalama sobivushinnanguga territooriumid. Joonisel 12 on näha, et eelnimetatud tingimuste puhul laienes kaevandustegevuseks sobivam ala 2 põhja-lõunasuunaliselt. Taoliselt määratletud territooriumi suuruseks moodustus 12,8 km<sup>2</sup>, sobivushinnangud varieerusid vahemikus 0–12 (keskmine 5,9 ning mediaan 6) ja fosforiidi tootlus on seal eeldatavalt 9,1 Mt.

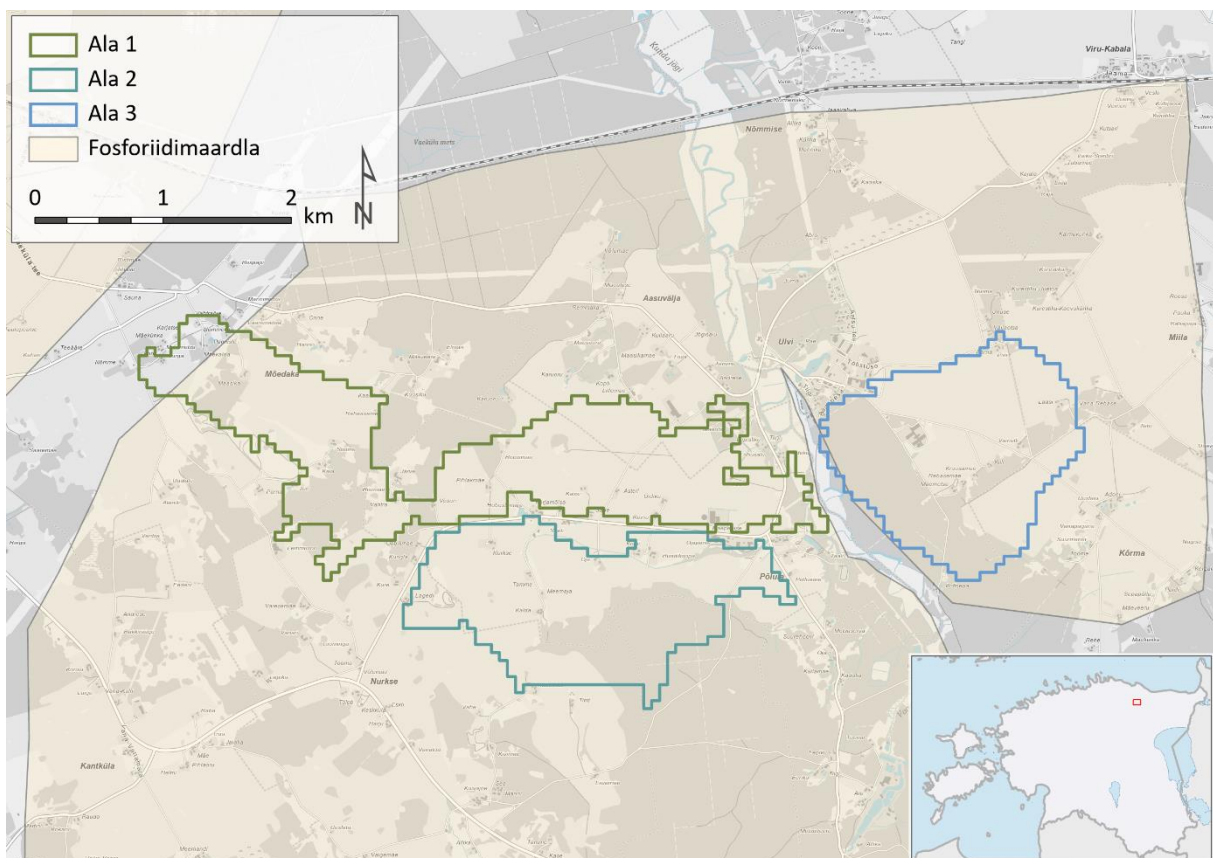


Joonis 12. Toolse maardla piirkonna esialgsed sobivamad fosforiidi kaevandamise perspektiivsed uuringualad (aluskaart: Maa-amet, 2022).

Rakvere maardla aladel toimiti sobivamate uuringualade väljaselgitamiseks sarnaselt, kuid ruumipäringus määratleti sobivushinnang alates väärtusest 7, et tekiks suuremad ühtsed alad. Taolise päringu põhjal saadud aladel oli fosforiidi tootluse rastri väärtused vähemalt 10.

Defineeritud sobivushinnanguga väljavalitud pikslitest moodustunud suuremale tuumalale liideti juurde väiksemad madalama sobivushinnanguga piirkonnad, et tagada alade kompaktsem üldmulje. Taoliselt määratletud alade sobivushinnangud olid väärtuselt vähemalt 4 ja kokku tekkis kolm lähestikku paiknevat, ent eraldiseisvat territooriumi. Ala 1 ja 2 on teineteisest eraldatud transpordi ja erinevate tehnoarajatistega seotud kaitsevööndite ning muinsuskaitsealuse asulakoha tõttu.

Rakvere maardlas piiritletud kolm sobivamat fosforiidi kaevandamise uuringuala on esitatud joonisel 13. Kunda jõest läände jääb kaks perspektiivset uuringuala. Neist suurema ja põhjapoolsema ehk ala 1 sobivushinnangud on vahemikus 5–11 (keskmine 7,6 ning mediaan 7), pindala 3,8 km<sup>2</sup> ja fosforiidi tootlus 10,2 Mt. Lõunapoolsema ala 2 sobivushinnangud on väärtuselt 5–10 (keskmine 7,1 ning mediaan 7), ulatus 2,6 km<sup>2</sup> ja eeldatav fosforiidi tootlus 6,5 Mt. Kunda jõest idas paikneb 2,5 km<sup>2</sup> suurune ala 3. Selle esialgse perspektiivse uuringuala sobivushinnangud jäävad vahemikku 4–10 (keskmine 7,5 ning mediaan 7) ja fosforiidi tootlus on arvutuslikult 6,4 Mt.



Joonis 13. Rakvere maardla piirkonna esialgsed sobivamad fosforiidi kaevandamise perspektiivsed uuringualad (aluskaart: Maa-amet, 2022).

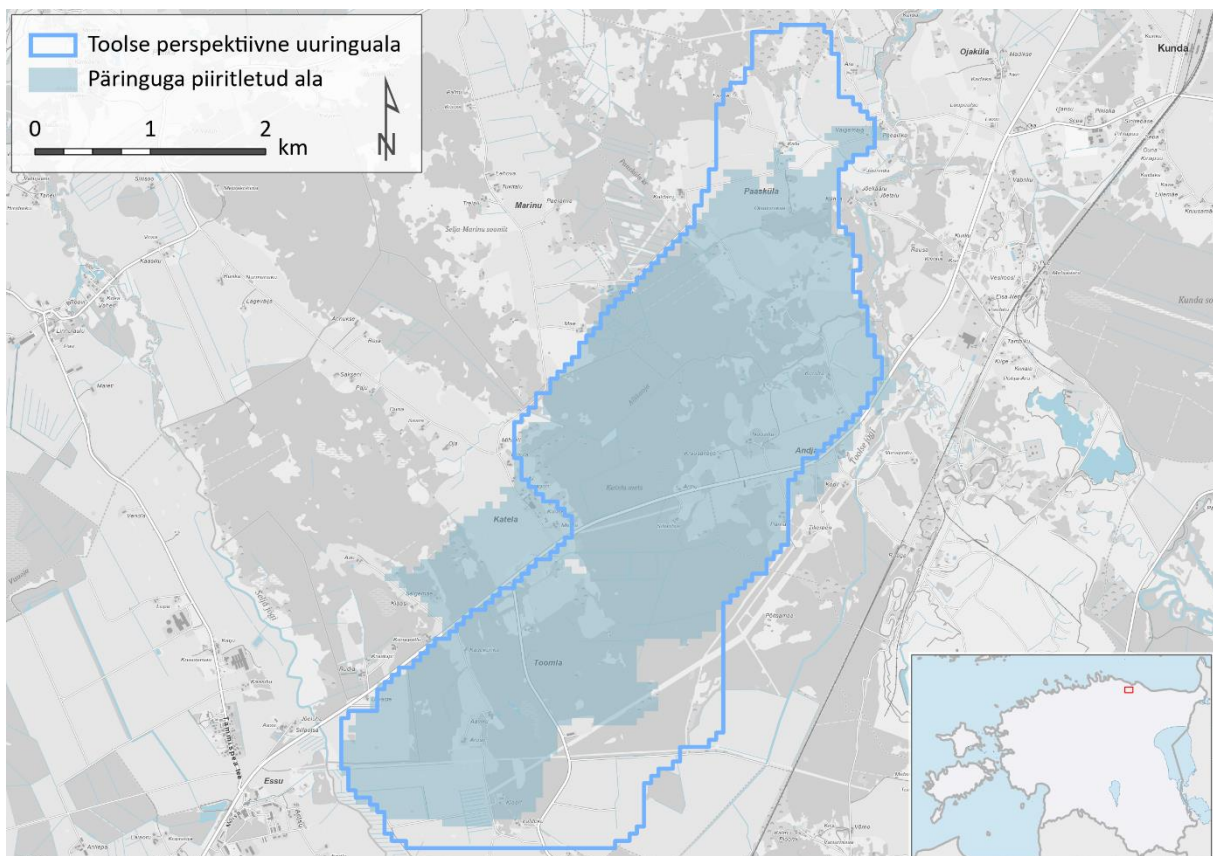
## 3.2. Täpsustatud piiridega perspektiivsed uuringualad

### 3.2.1. Toolse

Toolse perspektiivse uuringuala piiride täpsustamisel tuli esialgset päringuga saadud ala 2 kõigepealt suurendada, et saada vajalik P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tootlus 10–11 Mt. Seda tehti fosforiidi tootluse ja sobivushinnangute rasterkihtidele põhinedes. Pärast ala suurendamist hakati piirangukihtide haaval ala täpsemalt piiritlema, et vältida piirkonnas esinevaid olulisemaid piiranguid. See

tähendab, et ala kattuvust piirangut kujutavate nähtustega hakati vaatama esmalt nendest teguritest alustades, millele ekspertgrupp oli suurema tähtsuse omistanud. Toolse perspektiivset uuringuala korrigeeriti nii, et vähendada selle kattuvust veekogude piiranguvöönditega, eraüuedega, I ja II kaitsekategooria kaitsealuste loomaliikidega, sõiduteede ja muude tehnorajatistega.

Taoliselt määratletud Toolse perspektiivne uuringuala on esitatud joonisel 14. Piiritletud ala pindala on 14,78 km<sup>2</sup> ja selle arvutuslik P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tootlus on 10,12 Mt, varieerudes vahemikus 0,20–1,13 t/m<sup>2</sup> (keskmine tootlus 0,68 t/m<sup>2</sup>). Suurim fosforiidi tootlus esineb ala keskosas ja eelkõige ida suunas, mis korreleerub piirkonna P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ühendi protsentuaalse sisaldusega. Fosforiühendi sisaldus fosforiidikihis jääb vahemikku 5,64–13,42%, keskmise väärtusega 9,37%. Vastupidiselt kahele eelnenud näitajale on analüüsitud fosforiidikihi paksus suurim perspektiivse uuringuala lõunaosas ja keskosa läänepoolsel küljel. Vastavad näitajad jäävad vahemikku 1,03–5,00 m, keskmine fosforiidikihi paksus on piiritletud alal 3,50 m.



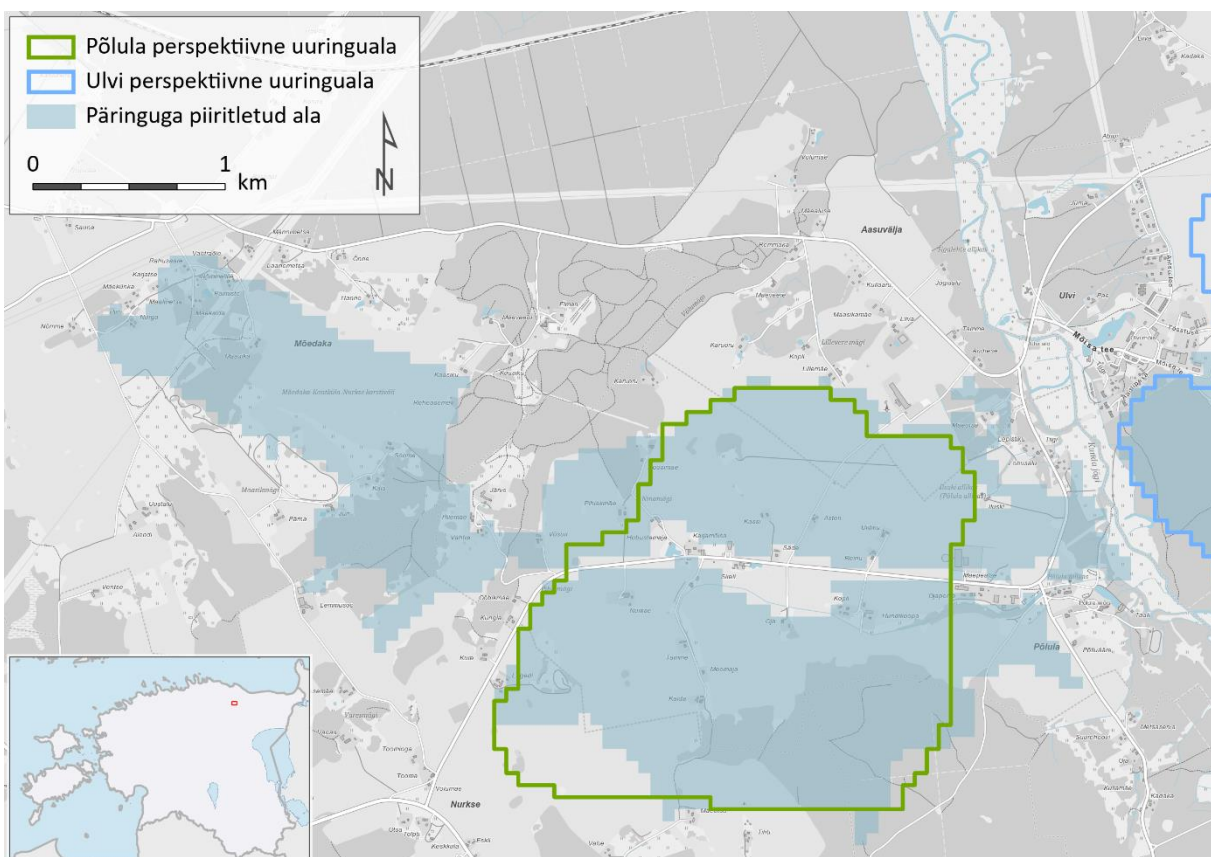
Joonis 14. Toolse fosforiidi kaevandamise perspektiivne uuringuala (aluskaart: Maa-amet, 2022).

Vaadates piiritletud Toolse perspektiivse uuringuala sobivushinnanguid, ilmneb, et negatiivsete piirangute kombineeritud kihtide puhul moodustavad need maksimaalse piirangu väärtusega -8 (12 pikslit), ent esineb ka alasid, kus piirangud üldse puuduvad ja selliseid pikseleid on kokku 71. Omavahel kokkuliidetud negatiivsete tegurite mõju on alal keskmiselt -3,32 piksli kohta ja mediaaniga -3. Summeerides omavahel negatiivsed piirangut kujutavad kihid ning fosforiidi tootluse rasterkihi, saab tulemuseks sobivushinnanguid, mis varieeruvad määratletud alal vahemikus -2...12 (keskmine 5,59 ja mediaan 5). See tähendab, et kaevandustegevust välistavaid nähtusi piiritletud perspektiivsel uuringualal ei esine, kuid kaheksa pikslit on selliseid alasid, kus fosforiidi kvaliteet ei kompenseeri ära samal ajal esinevaid piiranguid.

### 3.2.2. Põlula

Põlula perspektiivse uuringuala täpsete piiride määratlemiseks liideti esmalt Kunda jõest läände jäävad päringuga defineeritud alad ehk kaotati kahe territooriumi vahelt neid eraldanud võond. Seejärel vähendati ala suurust ja muudeti see kompaktsemaks vastavalt fosforiidi tootlusele ning pikslite sobivushinnangutele, kuna omavahel liidetud alade tootlus oli oluliselt suurem kui soovitatav 10–11 Mt. Lisaks korrigeeriti perspektiivse uuringuala piire, et vältida kattumist looduskaitseala piiranguvööndiga ja võttes arvesse era- ning tootmisõuede, sõiduteede, elektrirajatiste paiknemist. Põlula piirkonnas on metoodika põhjal tehtud arvutustele tuginedes hea fosforiidi kvaliteet ja alade sobivushinnangud, mis tähendab, et vajadusel on võimalik sealset perspektiivset uuringuala üsna kergelt suurendada.

Saadud Põlula perspektiivne uuringuala on 4,08 km<sup>2</sup> suurune ja selle territoorium on esitatud joonisel 15. Perspektiivse uuringuala piirides varieerub fosforiidikihi paksus vahemikus 6,60–8,94 m ning on keskmiselt 7,77 m. See tähendab, et kogu alal on tegemist üsna paksu fosforiidikihiga, mis on mõnevõrra paksem piiritletud ala loodeosas ja õhem kirdeosas. Maavarakihi fosforiühendi protsentuaalne sisaldus on suurim perspektiivse uuringuala kirdeosas ja langeb üldise tendentsina lõuna ning edela poole liikudes. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus jääb vahemikku 12,05–19,58%, olles keskmiselt 16,10%. Kahe kihi kombineerimisel ilmneb, et kogu Põlula perspektiivse uuringuala tootlus on kokku 10,70 Mt ning on suurim piiritletud ala loodeosas. Fosforiidi tootluse väärtused on defineeritud territooriumil 1,98–3,37 t/m<sup>2</sup> (keskmiselt 2,62 t/m<sup>2</sup>).



Joonis 15. Põlula fosforiidi kaevandamise perspektiivne uuringuala (aluskaart: Maa-amet, 2022).

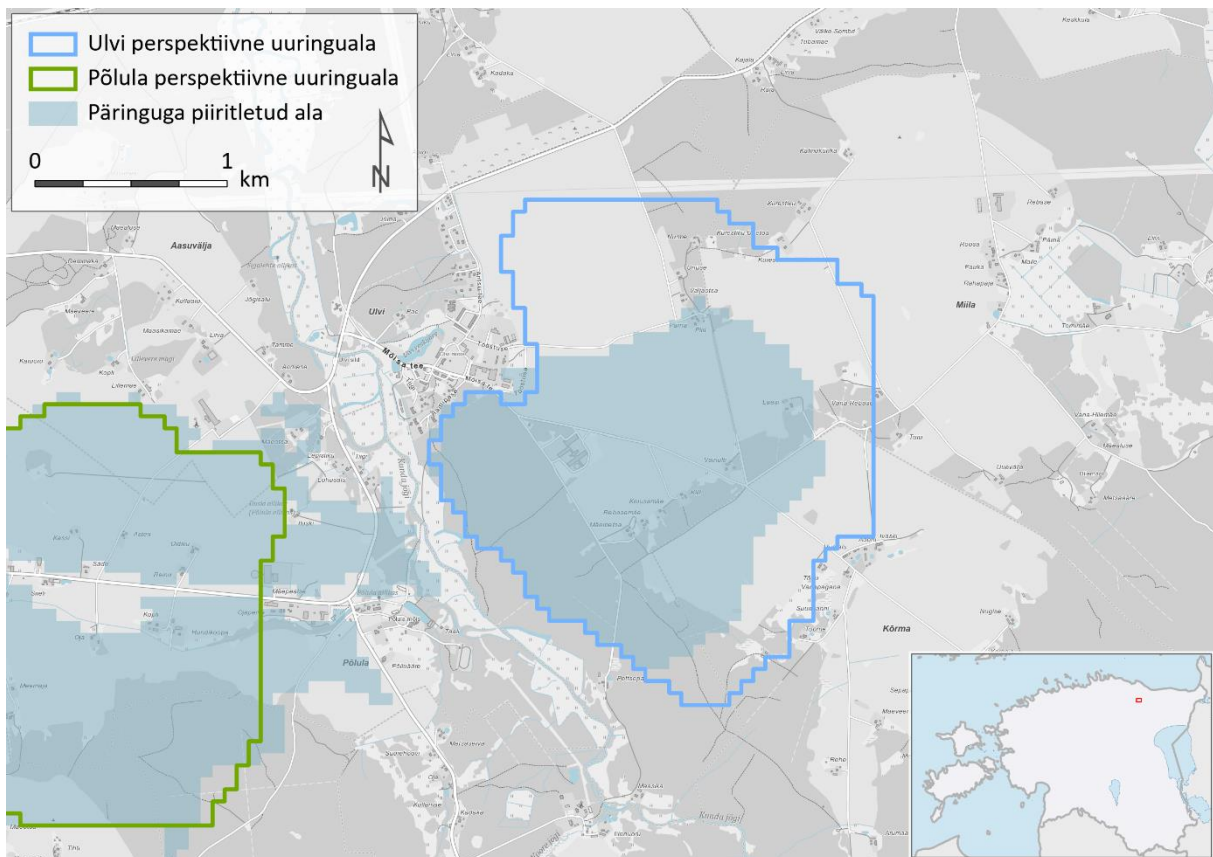
Nagu eelnevalt juba mainitud, paiknesid Põlula piirkonnas ulatuslikumad fosforiidi kaevandamiseks perspektiivsed alad nii sobivushinnangute kui ka fosforiidi tootluse põhjal. Täpsustatud piiridega alal kujutavad omavahel kombineeritud negatiivsed kihid pikslites

piiranguid vahemikus -3...-9, keskmise väärtusega -4,20 ja mediaaniga -4. Võttes arvesse lisaks piirangut kujutavatele teguritele ka fosforiidi kvaliteeti vaadeldaval alal, siis on sobivushinnangud väärtustega 3–10. See tähendab, et ka seal, kus esineb olulisel määral kaevandamist takistavaid tegureid, kaalub fosforiidi kvaliteet piirkonnas leiduvad piirangud üle. Sobivushinnangute keskmine piiritletud alal on 7,20 ja mediaan 7.

### 3.2.3. Ulvi

Ulvi perspektiivse uuringuala piiride täpsustamise aluseks oli päringu põhjal määratletud ala, mis jääb Kunda jõest idasse. Selle ala puhul tuli esmalt territooriumit laiendada eelkõige põhja, kirde ja ida suunas, mis tulenes fosforiidi tootlusest ning sobivushinnangutest, et saavutada perspektiivse uuringuala jaoks määratletud tootlusvahemik 10-11 Mt. Seejärel vaadati olulisuse järjekorras ala kattumist erinevate kaevandamist raskendavate teguritega ning välditi neid piiranguid, kus võimalik. Taoliselt määratletud Ulvi perspektiivse uuringuala ulatust vähendati mõnel määral, et minimeerida kattumist järgnevate piirangukihtidega: era- ja tootmisõued, veekogu piiranguvöönd, muinsuskaitsealised nähtused, elektrirajatised.

Joonisel 16 on kujutatud selle protsessi tulemusena piiritletud Ulvi perspektiivne uuringuala, mille pindala on 4,25 km<sup>2</sup>. Sarnaselt Põlula perspektiivsele uuringualale on Ulvi piirkonnas hea fosforiidi kvaliteet, ületades fosforiühendi sisalduse poolest mitmes paigus eelpool nimetatut. Vaatlusaluse territooriumi P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus on vahemikus 12,38–21,74%, olles keskmiselt 17,4% ja fosforiidikihi paksus on 4,90–7,88 m, keskmiselt 6,61 m. Sellest tulenevalt on fosforiidi tootlus Ulvi perspektiivsel uuringualal kokku 10,27 Mt, varieerudes vahemikus 1,67–2,99 t/m<sup>2</sup> (keskmine tootlus 2,41 t/m<sup>2</sup>). Suurim tootlus esineb piiritletud ala keskpäiga ümbruses.



Joonis 16. Ulvi fosforiidi kaevandamise perspektiivne uuringuala (aluskaart: Maa-amet, 2022).

Ulvi perspektiivsel uuringualal on kombineeritud negatiivsete kriteeriumite väärtused piksli kohta -2...-8, ent suurimaid piiranguid esitavaid piksleid on vaid üksikud. Piirkonna keskmine piirangute summa piksliks on -3,97 ja mediaan -4. Arvestades lisaks negatiivsetele teguritele ka positiivset andmekihti fosforiidi tootluse kohta, ilmneb, et sobivushinnangud jäävad vahemikku 3–10 ehk igal juhul ületavad kaevandamistegevust soosivad asjaolud seal esinevaid piiranguid. Sobivushinnangud on piksli kohta keskmise väärtusega 6,57 ja mediaaniga 6.

### 3.3. Perspektiivsete uuringualade piirangute kirjeldus

#### 3.3.1. Toolse

Toolse fosforiidi kaevandamiseks perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad piirangud on esitatud visualiseeritud kujul lisa 3 all. Looduskaitsealadest ei kattu Toolse perspektiivne uuringuala ühegi kaitsealuse territooriumiga. Küll aga jääb perspektiivse uuringuala edelapiirist ligikaudu 800 m kaugusele kaitsealune Essu mõisa park. Kaitsealustest liikidest paikneb fosforiidi kaevandamiseks sobiva territooriumi põhjaosas III kaitsekategooria laialehise neiuvaiba (*Epipactis helleborine*) kasvukoht, ent piiritletud ala lähiümbruses jääb veel kaitstavaid liike. I kaitsekategooria väike-konnakotka (*Aquila pomarina*) elupaik jääb kohe väljapoole perspektiivse uuringuala kagupiiri, millega seonduvalt paikneb seal ka Toomla väike-konnakotka püsielupaik. II kaitsekategooria liikidest esineb perspektiivset uuringuala ümbritsevas ühekilomeetrises puhvris tiigilendlase (*Myotis dasycneme*), suurkõrva (*Plecotus auritus*), veelendlase (*Myotis daubentonii*), põhja-nahkhiire (*Eptesicus nilssonii*) ja mustlaikapollo (*Parnassius mnemosyne*) elupaigad, mis jäävad lähimal juhul perspektiivse uuringuala piirist ligikaudu 200 m kaugusele. III kaitsekategooria liikidest jäävad kirdes puhvrise euroopa harjuse (*Thymallus thymallus*) ja edelas euroopa harjuse ning võldase (*Cottus gobio*) elupaigad. Nende liikide elupaigad asuvad piiridele kõige lähemal veidi vähem kui 100 m kaugusel. Perspektiivsest uuringualast suurem osa kattub rohevõrgustiku tuumalade ja koridoridega, moodustades 11,9 km<sup>2</sup> ehk piiritletud territooriumist 80,5%. Lisaks on seal defineeritud üks väiksem piirkond vääriselupaigana.

Muudest looduslikest nähtustest läbib Toolse perspektiivse uuringuala keskosa Allikaoja jõgi ja seda ümbritsev kaevandamistegevust mõjutav ranna või kalda piiranguvöönd. Piiritletud territooriumist väljaspool paikneb põhjaosas Aru allikas ja mööda idaserva kulgeb Toolse jõgi, edelas Selja jõgi. Neid veekogusid ümbritsevate ranna või kalda piiranguvöönditega perspektiivne uuringuala ei kattu. Toolse perspektiivne uuringuala on ligikaudu pooles ulatuses metsaga kaetud ehk metsakõlvikuid on alal 7,6 km<sup>2</sup> (51,4%).

Toolse perspektiivse uuringuala piires on rahvastikutihedus kuni 9 in/km<sup>2</sup>, mis tähendab, et tegemist ei ole eriti tihedalt asustatud alaga. Sealhulgas puuduvad mõnel ruutkilomeetrisel alal elanikud üldse kasutatud andmetele tuginedes. Perspektiivsele uuringualale jääb 13 eraõue ning seda ümbritseva kilomeetrise puhvri sisse täielikult või osaliselt veel 62 eraõue. See tähendab, et kaevandustegevuse tõttu on mõjutatud omajagu majapidamisi ning sealse piirkonna elanikke. Lisaks jääb piiritletud fosforiidi kaevandamiseks sobilikule alale üks tootmisõue ja teine paikneb selle välispiiril. Perspektiivse uuringuala piirist kuni kilomeetri kaugusel esineb täiendavalt kümme tootmisõue. Toolses piiritletud territooriumi idapiirist ligikaudu 1,5 km kaugusele jääb lõhkeainetega tegelev ettevõtte Voglers Eesti OÜ, mida ümbritsev ohtliku käitise ohuala ulatub ka perspektiivset uuringuala ümbritsevasse puhvrise. Vaadates piirkonnas esinevate katastriüksuste omandivorme, ilmneb, et eraomandis maatükke on kokku 8,31 km<sup>2</sup> ehk moodustades perspektiivsest uuringualast 56,2%.

Sotsiaalselt hinnatud väärtustest esineb perspektiivsel uuringualal kolm muinsuskaitseobjekti ja neid ümbritsevat kaitsevööndit, mille puhul on tegemist kahe kultusekivi ning Vabadussõjas hukkunute ühishauaga. Lisaks on Toolses piiritletud ala ümbritsevas ühekilomeetrises puhvris 29 muinsuskaitseobjekti, millest mitmed paiknevad võimaliku kaevandamisala välispiiri lähedal. Suuremaid kohalikke piiranguid vaadeldaval alal ei esine. Kohalikest miljööväärtuslikest objektidest jääb perspektiivse uuringuala läänepiirist ca 100 m kaugusele Vabadussõjas hukkunute ühishaud. Alast väljaspool kulgeb läänepiiri servas ka üks kauni vaatega teelõik Katela-Selja-Toolse teel. Lisaks jääb perspektiivse uuringuala põhjaserva 1,68 km<sup>2</sup> ulatuses väärtuslike maastikena defineeritud alasid ja keskosast allapoole 0,4 km<sup>2</sup> väärtuslikke põllumaid.

Muudest maavaradest esineb Toolses määratletud alal lubjakivi, mille varud paiknevad perspektiivse uuringuala lõunaservast selle keskpaigani. Lubjakivi esineb perspektiivsest uuringualast 11,58 km<sup>2</sup> ulatuses ehk moodustades sellest 78,4%. Sellega seondult paikneb määratletud ala keskosast allpool aktiivne mäeeraldis ja selle teenindusmaa. Tegemist on Toolse-Lääne lubjakivikarjääriga, kus kaevandab AS Kunda Nordic Tsement. Piirkonnas on ka kolm aktiivset uuringuala, mille ühiseks nimetuseks on Kallavere kihistu uuringuruumid Virumaal 2. etapp. Uurimuste teostajaks on EGT, mistõttu ei kujuta need praeguse töö kontekstis piirangut võimalikule fosforiidi kaevandustegevusele.

Mõeldes majanduslikele kulutustele, tuleb kaevandustegevuse tõttu likvideerida ja samas nende asemele ehitada mitmeid tehnorajatisi. Toolse perspektiivset uuringuala läbib kaks suuremat avalikult kasutatava tee kaitsevööndit, mille puhul on ala keskosas tegemist Põdruse-Kunda-Pada maanteega (aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus 1980 sõidukit) ja lõunaosas Sõmeru-Katela maanteega (keskmine liiklussagedus 307 sõidukit ööpäevas). Lisaks jääb alale muid väiksemaid teid. Perspektiivse uuringuala põhja-, kesk- ja lõunaosas esineb elektripaigaldiste kaitsevööndeid, mis ümbritsevad elektrimaakaabelliine, erineva nimipingega elektriõhuliine ja nende mastitõmmitsaid või tugesid. Üldjuhul on tegemist madalpingeliinidega, ent ala kesk- ja veidi ka põhjaosa läbib keskpingeliin ning territooriumi lõunaosas kulgeb kagu-edela suunas kõrgepingeliin (nimipinge 110 kV). Toolse perspektiivse uuringuala lõunaosas esinevad ka gaasirajatised ja neid ümbritsevad kaitsevööndid. Nendeks on D-kategooria gaasitorustikud ja üks seonduv gaasipaigaldis. Territooriumi kesk- ja lõunaosas on ka sideehitised ning neid ümbritsevad kaitsevööndid, mis kulgevad kõrvuti sõiduteede või gaasitorustikega.

### 3.3.2. Põlula

Põlula perspektiivsel uuringualal ja selle läheduses leiduvad piirangud on esitatud joonistena lisa 4. Põlula perspektiivsel uuringualal looduskaitsealasid ei esine, küll aga jääb selle läänepiirist vahetult väljapoole Võlumäe-Linnamäe maastikukaitseala, mille territooriumil esineb perspektiivsest uuringualast ühekilomeetrise puhvri sees kaitsevöönditest piiranguvöönd ning põhja pool ka hooldatav sihtkaitsevöönd. Perspektiivse uuringuala põhjaosas paikneb seda ümbritsevas puhvris Natura 2000 Võlumäe loodusala. Piiritletud fosforiidi kaevandamiseks sobivama ala välispiirist idasse jääb vähem kui kilomeetri kaugusele ka looduskaitsealune Kunda jõe hoiuala. Kaitsealuste liikide elupaiku ja leiukohti Põlula perspektiivsel uuringualal ei esine. Piiritletud territooriumit ümbritsevasse puhvrissi jäävad aga I kaitsekategooria villtulika (*Ranunculus lanuginosus*) kasvukoht, II kaitsekategooria paksukojalise jõekarbi (*Unio crassus*), mustlaik-apollo, veelendlase elupaigad ja kauni kuldkinga (*Cypripedium calceolus*), roheline kaksikhamba (*Dicranum viride*) kasvukohad. III kaitsekategooriast esineb puhvris väike-kärbsenäpi (*Ficedula parva*), euroopa harjuse, väänkaela (*Jynx torquilla*), valgetoonekure (*Ciconia ciconia*) elupaigad ja pruunika pesajuure (*Neottia nidus-avis*), sulgja õhiku

(*Neckera pennata*) kasvukohad. Perspektiivse uuringuala välispiirist loodes paikneb sellest kuni kilomeetri kaugusel kuus väärtusliku elupaigana määratletud ala. Vaid väga väike osa rohevõrgustikust kattub otseselt fosforiidi kaevandamise perspektiivse uuringuala loodeosaga, suurem osa jääb selle piiridest välja.

Loodusnähtudest olulisemaid veekogusid Põlula perspektiivsel uuringualal ei esine, kuid selle piirist vahetult väljaspool paikneb kirdeosas Iluski allikas ja samas piirkonnas läbib kaugemal puhvrit Kunda jõgi ja osaliselt jääb sellesse ka Ulvi veskijärv, idaosas asub Põlula allikas. Perspektiivse uuringuala kaguservas on metsasemad piirkonnad, mujal esineb neid vähe. Kokku katavad metsakõlvikud võimalikust fosforiidi kaevandamise uuringualast 0,73 km<sup>2</sup> ehk 17,9%. Põlula perspektiivsel uuringualal leidub täies ulatuses lisaks fosforiidile ka põlevkivi.

Põlula perspektiivsel uuringualal jääb rahvastikutihedus vahemikku 4–11 in/km<sup>2</sup>. Perspektiivse uuringuala piiridesse jääb rahvastikutiheduse ruutkaardist ka alasid, kus asustustihedus on kuni 35 in/km<sup>2</sup>, kuid taolistes tihedamalt asutatud piirkondades ei esine perspektiivse uuringuala ulatuses eraõuesid. Seetõttu ei ole eeldatavasti need inimesed otseselt kaevandustegevusest mõjutatud. Põlula perspektiivsel uuringualal asub 15 eraõue, millele lisandub 61 eraõue, mis on kaudselt mõjutatud, paiknedes fosforiidi kaevandamiseks määratletud ala välispiirist kuni kilomeetri kaugusel. Fosforiidi kaevandamise perspektiivsel uuringualal asub ka kolm tootmisõue, lisaks jääb selle ida- ja kirdepiirist väljapoole viis tootmisõue. Põlula perspektiivsel uuringualal paiknevad katastriüksused on pea täies ulatuses eraomandis, moodustades kokku 3,60 km<sup>2</sup> ehk 88,2% piiritletud alast.

Muinsuskaitseobjektidest paikneb perspektiivse uuringuala lõunaosas kivikalme „Kakumägi“, „Önnemägi“ ja keskosas kaitstav asulakoht. Perspektiivset uuringuala ümbritseva ühekilomeetrise puhvri lõunaosas asub ka kivikalme ning selle lääneosas linnus. Kohalikke piiranguid analüüsitud andmete põhjal piiritletud territooriumil ei esine, ent perspektiivsest uuringualast põhja suunas jääb selle välispiirist mõnes paigus vähem kui 400 m kaugusele inimeste poolt hinnatud ilus teelõik. Lisaks on kogu perspektiivne uuringuala defineeritud väärtusliku maastikuna ja sellel esineb 3,09 km<sup>2</sup> väärtuslikke põllumaid, moodustades 75,7% potentsiaalsest fosforiidi kaevandamisalast.

Tehnilisest infrastruktuurist läbib Põlula perspektiivse uuringuala keskosa ida-läänesuunaliselt avaliku tee kaitsevöönd. Tegemist on Nurkse-Põlula maanteega, mille aasta keskmine liiklustihedus on 200 sõidukit ööpäevas. Lisaks jääb perspektiivsele uuringualale mitmeid väiksemaid teid, mis suuremas osas hargnevad eelnimetatud maanteest põhja ja lõuna suunas. Ala kesk- ja lääneosa läbivad elektripaigaldised nagu maakaabelliinid, õhuliinid, mastitõmmitsad või toed ning nende kaitsevööndid. Elektriõhuliinide puhul on tegemist madalpingeliinidega ja loodeservas esineb keskpingeliin nimipingega 10 kV. Nurkse-Põlula maanteega paralleelselt kulgevad ka sidehitised ning neid ümbritsevad kaitsevööndid.

### 3.3.3. Ulvi

Ulvi perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad piirangud on visualiseeritult kujutatud lisas 5. Ulvi perspektiivne uuringuala ei kattu looduskaitsealadega, ent selle välispiirist lääne ja edela suunas jääb mõnel juhul vaid ligikaudu 100 m kaugusele Kunda jõe hoiuala, mis ühtib selles piirkonnas Natura 2000 Sirtsu loodusala. Samasse kanti, ent fosforiidi kaevandamiseks sobivamast alast veidi kaugemale jääb ka kaitsealune Põlula park parkmetsaga. Kaitstavate liikide elu- ja kasvukohti teadaolevalt Ulvi perspektiivsele uuringualale ei jää, küll aga esineb neid seda ümbritsevas ühekilomeetrises puhvris. Piiritletud alast kagusse jääb I kaitsekategooria lendorava (*Pteromys volans*) elupaik, millega seoses asub seal ka Kõrma lendorava püsilupaik. Lisaks on samas piirkonnas III kaitsekategooria kuklase

(*Formica sp.*) elupaik ja hariliku käoraamatu (*Gymnadenia conopsea*) ning Wulfi turbasambla (*Sphagnum wulfianum*) kasvukohad. Perspektiivsest uuringualast lääne suunas paiknevad II kaitsekategooria paksukojalise jõekarbi, veelendlase ning III kaitsekategooria euroopa harjuse elupaigad. Piiritletud fosforiidi kaevandamise uuringualast loodes asub kaitstavatest looduse üksikobjektidest Külmaveski allikate ja allikajärve piiranguvöönd. Vähesel määral lõikub määratletud perspektiivne uuringuala põhja- ja lääneosas ka rohevõrgustiku servaaladega, moodustades sellest 0,38 km<sup>2</sup> ehk 8,9%.

Looduslikest objektidest jääb perspektiivset uuringuala ümbritsevasse kilomeetrisesse puhvrise mitmeid veekogusid ja neid ümbritsevad ranna või kalda piiranguvööndeid, mis paiknevad piiritletud territooriumist lääne suunas. Seal asuvad nii Ulvi veskijärv, Iluski ja Põlula allikad kui ka päris perspektiivse uuringuala läänepiiri läheduses Kunda jõgi, millesse suubub lõuna pool puhvrise jääv Voore jõgi. Ulvi piirkonnas määratletud ala edelaserv on metsasem, millele lisaks võib metsavööndit täheldada edelast ida suunas kulgemas ning vähesel määral perspektiivse uuringuala põhjaservas. Metsakõlvikutena defineeritud piirkonnad moodustavad fosforiidi kaevandamiseks piiritletud alast 1,40 km<sup>2</sup> ehk 33,0%. Maavaradest leidub perspektiivsest uuringualast 78,0% ehk 3,32 km<sup>2</sup> suurusel alal ka põlevkivi, mille varud on koondunud loode-lõunasuunalisest mõttelisest joonest idasse.

Kaevandustegevusest otseselt mõjutatud aladel on asustustihedus < 4–8 in/km<sup>2</sup>. Vaadates ka neid rahvastikutiheduse kaardi ruute, mis üleüldiselt kattuvad teatud määral perspektiivse uuringualaga, siis küündib asustustihedus väärtuseni 232 in/km<sup>2</sup>. Nendel aladel ei esine aga perspektiivse uuringuala piirides eraõuesid, mistõttu on sealsed elanikud eeldatavalt kaevandustegevusest vaid kaudselt mõjutatud. Suurim asustustihedus paikneb analüüsi põhjal määratletud alast läänes. Ulvi perspektiivsel uuringualal paikneb täielikult kümme eraõue ja üks tootmisõue, lisaks jääb üks eraõue selle idapiirile. Täiendavalt on ühekilomeetrises puhvrise kaudselt mõjutatud 54 eraõue ning kaheksa tootmisõue. Ulvi perspektiivsel uuringualal paiknevad katastriüksused on suuremas osas eraomandis, vaid lääneosas on neid vähem. Eraomandis maatükid moodustavad kokku 3,73 km<sup>2</sup> ehk piiritletud alast 87,7%.

Muinsuskaitse nähtustest on perspektiivset uuringuala ümbritseva puhvri idaosas kaks asulakohta, millest üks paikneb kohe määratletud ala välispiiri lähedal ja teine jääb mõnevõrra kaugemale. Kasutatud andmestike põhjal paiknevad fosforiidi kaevandamise uuringuala kagupiirist enam kui 0,5 km kaugusel looduslike pühapaikadena ülesmärgitud Riula (Rihula) mägi ja allikas. Lisaks kulgeb võimalikku kaevandamisala ümbritsevas ühekilomeetrise puhvri loodeosas ka üks ilus teelõik. Ulvi perspektiivne uuringuala on täies ulatuses määratletud kui väärtuslik maastik ja selle piiridesse jääb suuri maatükke, mis on kirjas väärtuslike põllumaadena. Taoliseid põllumajanduseks hinnatud alasid on piirkonnas 2,57 km<sup>2</sup> ehk piiritletud territooriumist 60,6%.

Ulvi perspektiivsel uuringualal suuremaid avalikke sõiduteid ei paikne, seda läbivad vaid väiksemad muud tüüpi teed. Elektrirajatistega seonduvalt esineb piiritletud alal elektripaigaldiste kaitsevööndeid, mis ümbritsevad elektrimaakaabelliine, elektriõhuliine ja nende mastitõmmitsaid või tugeseid. Elektriõhuliinide puhul on tegemist madal- ja keskpingeliinidega, mille nimipinged on vastavalt alla 1 kV ja 10 kV. Muudest tehnorajatistest tulenevaid piiranguid Ulvi piirkonnas ei esine.

## 4. Arutelu

Töös rakendati käsitletava ülesande jaoks kohandatud multikriteeriumilise analüüsi põhimõtteid koos GIS võimalustega. Sellele metoodikale tuginedes suudeti edukalt välja selgitada kolm Eesti fosforiidi kaevandamiseks perspektiivset uuringuala, mille põhjal vastata magistritööks seatud uurimisküsimustele. Määratletud territooriumitest üks jääb Toolse maardla piirkonda, mille nimi on vastavalt Toolse perspektiivne uuringuala, ja kaks jäävad Rakvere maardla aladele, millest läänepoolsem on nimetatud kui Põlula ning idapoolsem kui Ulvi perspektiivne uuringuala. Need kaks maardlat on ka Raukase ja Teedumäe (1997) poolt esile tõstetud kui fosforiidi kaevandamiseks perspektiivsed alad ning nendesse piirkondadesse on juba varasemalt planeeritud kaevanduste rajamist (Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016). Töö tulemusena piiritletud territooriumid erinevad lisaks asukohale ka sealse fosforiidi kvaliteedi ja piirkonnas esinevate piirangute poolest. Tabelis 2 on esitatud koondatud andmed kolme perspektiivse uuringuala kohta.

Tabel 2. Määratletud perspektiivsete uuringualade omadused.

Perspektiivne uuringuala	Pindala (km <sup>2</sup> )	Fosforiidikihi paksus (m)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> sisaldus (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> tootlus (Mt)	Esinevad piirangud	Sobivushinnang
Toolse	14,78	1,03–5,00	5,64–13,42	10,12	0...-8	-2...12
Põlula	4,08	6,60–8,94	12,05–19,58	10,70	-3...-9	3...10
Ulvi	4,25	4,90–7,88	12,38–21,74	10,27	-2...-8	3...10

Kõik kolm perspektiivset uuringuala on määratletud nii, et nende P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tootlused oleksid samas suurusjärgus ja piiritletud territooriumid selle alusel omavahel võrreldavad. Aluseks võetud fosforiidi kaevandamise ja eeldatava fosforiühendi tootluse poolest oleksid taolised kaevandused võrreldava suurusega näiteks Soome Siilinjärvi fosforiidikaevandusega (Lauri *et al.*, 2018; U.S. Geological Survey, 2022). Sellise kaevandusmahu korral oleks maavarast saadava kontsentradi kogus oluliselt suurem, kui on varasemate analüüside põhjal välja toonud Reinsalu (2016). Määratletud tootlusega kaevanduste rajamisel oleks tegemist suurima fosforiidi kaevandamisega Eestis läbi ajaloo, ületades varasemad maksimaalsed kaevandusmahud (Raukas & Teedumäe, 1997) ja töötlemisel saadud kontsentradi kogused (Reinsalu, 2016).

Ilmneb, et Toolse perspektiivne uuringuala on pindalaliselt kahest Rakvere maardlas määratletud territooriumist üle kolme korra suurem. Selle põhjuseks on Toolse piirkonna madalam fosforiidi kvaliteet ja sellest tulenevalt potentsiaalsel kaevandamisel saadav väiksem maavara tootlus ruutmeetri kohta. Toolse perspektiivse uuringuala maksimaalne fosforiidikihi paksus ja P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> protsentuaalne sisaldus on üldjoontes võrreldavad Põlula ning Ulvi territooriumite vastavate minimaalsete väärtustega. Reinsalu (2016) on samuti välja toonud, et Toolse maardlas paiknevad fosforiidikihid on keskmise paksusega ja Rakvere maardlas on tegemist paksude kihtidega. Piiritletud alade fosforiidikihi paksused jäävad Raukase ja Teedumäe (1997) poolt väljatoodud vahemikku, ent fosforiühendi sisalduse poolest ületavad Rakvere maardlas määratletud perspektiivsed uuringualad allikas nimetatud maardla keskmisi P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldusi. Täiendavat väärtust lisavad piiritletud kaevandamiseks sobivatele piirkondadele haruldaste muldmetallide ja teiste maavarade leidumine (Raukas & Teedumäe, 1997).

Määratletud aladel esinevate kaevandamistegevust negatiivselt mõjutavate piirangute poolest on kõigil aladel ühes pikslis maksimaalsed väärtused samas suurusklassis, ent Toolse perspektiivsele uuringualale jääb ka piirkondi, kus piirangud üldse puuduvad. Võrreldes omavahel Rakvere maardlas piiritletud uuringualasid, on näha, et Ulvi territooriumil esineb piiranguid keskmiselt veidi vähem. Sobivushinnangute põhjal on pikslite väärtuste varieeruvus suurem Toolse perspektiivsel uuringualal ning Põlula ja Ulvi aladel jäävad väärtused samasse

vahemikku. Ehkki Toolses piiritletud territooriumil on pikslites esinevate piirangute keskmine väärtus väiksem ja maksimaalne sobivushinnangu väärtus suurem kui Rakvere maardlas määratletud aladel, on sealne keskmine sobivushinnang kaevandamiseks madalam.

Seega paiknevad Eesti fosforiidi kaevandamiseks sobivamad alad kasutatud meetodika kohaselt nii fosforiidi kvaliteedist kui ka esinevatest piirangutest tulenevalt Rakvere maardlas. Üldjoontes võib määratletud uuringualad järjestada fosforiidi kaevandamise perspektiivsuse poolest langevas trendis järgnevalt: Põlula, Ulvi ja Toolse. Kõikidel eelnimetatud perspektiivsetel uuringualadel tuleb aga arvestada täiendavaid geoloogilisi tegureid, mis puudutavad maavara sügavust või kaevandamist raskendavaid asjaolusid (Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016). Toolse piiritletud uuringuala eeliseks võib Rakvere maardlas määratletud alade ees pidada suhteliselt suurt haruldaste muldmetallide sisaldust, väikest kahjulike lisandainete osakaalu ja maavara paiknemist väiksemal sügavusel (Raukas & Teedumäe, 1997), mistõttu ei ole eelnev paremusjärjestus lõplik.

Vaatamata kasutatud analüüsimeetodile perspektiivsete uuringualade väljaselgitamiseks, ei ole võimalik kõiki piiranguid määratletud territooriumitel vältida. Siiski saavutati lahendid, mille puhul on kattumine kaevandamistegevust negatiivselt mõjutavate või kaevandamise poolt negatiivselt mõjutatud teguritega viidud võimalikult minimaalseks, võttes arvesse ka asjasse puutuvate nähtuste suhtelist olulisust ülesande kontekstis. Potentsiaalse fosforiidi kaevandamise korral on oluline hinnata nii avalduvaid mõjusid kui ka võimalikke leevendusmeetmeid, millest viimased on väga olulised määramaks, kas kaevandamine ikkagi tegelikkuses ellu viiakse (Dey & Ramcharan, 2008). Nagu Davis ja Tilton (2005) kirjeldavad, sõltuvad reaalsed ettevõtmise tagajärjed suurel määral lõpuks kasutatavast poliitikast ning regulatsioonidest.

Ehkki kaevandamine võib tuua inimgruppidele nii positiivseid kui ka negatiivseid mõjusid, on inimesed fosforiidi kaevandamise teemadel enamasti negatiivselt meelestatud (Paat *et al.*, 2021). Taoline suhtumine võib tuleneda minevikus fosforiidi kaevandamisega kaasnenud nähtusest ja ühiskondlikest liikumistest, mis inimeste mälestustes veel edasi elavad. Fosforiidisõjani viisid nii looduskeskkonnaga kui ka sotsiaalsete aspektidega seotud probleemid (Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016; T. Oja suuline kommentaar, 18.05.2022) ja Reinsalu (2016) on välja toonud, et Eestis varasemalt toimunud fosforiidi kaevandamisega kaasnesid vastavalt piirkonnale isegi hävitavad tagajärjed. 2021. aastal läbiviidud uurimuses hinnati samuti kõige olulisemaks Eesti potentsiaalse fosforiidi kaevandamisega kaasnevaid keskkonnavalaseid mõjusid (Paat *et al.*, 2021). Eelnevaid asjaolusid arvesse võttes on eriti oluline erinevate nähtustega arvestada ning nendega kattuvust vähendada. Taoline põhjalik planeerimistegevus võimaldab ka inimeste teadlikkust tõsta, sellega seonduvalt nende vastumeelsust vähendada ning täiendavate analüüside soovivate tulemuste korral alustada läbimõeldud maavara kaevandamisega (Erzurumlu & Erzurumlu, 2015).

Fosforiidi kaevandamist planeerides tuleb kõigi määratletud alade puhul silmas pidada nii ulatuslikke veerežiimi häiringuid kui ka graptoliitargilliidi esinemisel selle käsitlemist (Raukas & Teedumäe, 1997) ning Rakvere maardlas täiendavalt arvestada maavara paiknemisega suurel sügavusel (Reinsalu, 2016). Nagu eelnevalt välja toodud, soovib EGT määratletud perspektiivsetel uuringualadel läbi viia hüdrogeoloogilisi ning mäenduslikke uuringuid, et hinnata Eesti fosforiidi kaevandamise võimalikkust ja tasuvust (Kurvits *et al.*, 2022). Eestlased on sellega seonduvalt oluliseks pidanud kaevandamise meetodi valikut ning kasutatavate tehnoloogiate keskkonnasäästlikkust (Paat *et al.*, 2021). Kaevandamise tasuvuse puhul tasub arvesse võtta, et ettevõtmise mõttekus sõltub suuresti fosforiidi nõudlusest (Reinsalu, 2016), mistõttu on see eeldus juba täidetud praeguseid ühiskondlikke tendentse silmas pidades. Samas on täiendavad uuringud olulised, kuna varasemalt on välja toodud, et fosforiidi kaevandamine Eestis ei tasu end siiski ära (Raudsep, 2008; Raukas & Teedumäe, 1997; Reinsalu, 2016).

Eesti fosforiidi kasutuselevõtt on oluline teema, mida käsitleda, sest siinsetel aladel paiknevad suurimad passiivsed fosforiidirud Euroopas (Soesoo & Kirsimäe, 2020). Fosforiidi kaevandamise realiseerumine Eestis võimaldaks varustada nii siseriiklikke tööstusharusid kui ka eksportida fosforiidi tooret või sellest toodetudprodukte väljapoole. See on oluline fosfori suurenenud nõudlust ja Euroopa fosforiidirudude vähest kasutamist arvesse võttes (Soesoo & Kirsimäe, 2020) ning fosfori ja fosforiidi kriitilist tähtsust EL-i jaoks silmas pidades (Lauri *et al.*, 2018). Eesti fosforiidi kaevandamise abil suudaks EL vähendada sõltuvust maavara impordist liiduvälistest riikidest, kuna praegu tuuakse sisse vastavat tooret ligikaudu 4 Mt aastas (Soesoo & Kirsimäe, 2020). Taoline liidusisene fosforiidi kaevandamine ja töötlemine haakub ka Euroopa Komisjoni (2020) eesmärkidega. Samuti on potentsiaalse fosforiidi kaevandamise puhul toorme väärimisvõimalusi peetud oluliseks nii üldiste arvamuste kohaselt (Davis & Tilton, 2005) kui ka Eesti huvirühmade poolt (Paat *et al.*, 2021).

Siinses uurimuses töötati välja käsitletava ülesande jaoks sobiv metoodika, milles kasutati multikriteeriumilist analüüsi kohandatud kujul, rakendades eelnimetatud meetodi põhimõtteid kombineerituna GIS võimalustega. Taoline lähenemine võimaldas käsitletavat ülesannet struktureerida, arvestada hulgaliselt erinevaid kriteeriume, kaasata ekspertide hinnanguid ja analüüsida ruumilist teavet, mis on välja toodud multikriteeriumilise analüüsi ning GIS eelistena (Belton & Stewart, 2002; Carver, 1991; Jankowski, 1995; Jankowski & Richard, 1994; Malczewski, 2006; Malczewski & Rinner, 2015; Mardani *et al.*, 2015). Antud töös määratletud fosforiidi kaevandamise perspektiivsetel uuringualadel on võimalik vajadusel veel läbi viia multikriteeriumilist analüüsi selle esialgsel kujul pärast EGT uuringute teostamist. Selle tulemusena selginevad täiendavalt piiritletud uuringualade teatud omadused, mille põhjal kolme kaevandamise uuringuala omavahel võrrelda. Magistritöös esitatud perspektiivsete uuringualade piire on võimalik ka täiendavalt täpsustada ning need sujuvama kujul vektorformaati viia. Hetkel esitati need analüüsis kasutatud rasterkihtidest tulenevalt piksli täpsusega, mille küljepikkus on 62,5 m, kuna see oli praeguse ülesande kontekstis piisava detailsusega.

Töös kasutatud metoodikat on võimalik kasutada ka teiste ruumilist planeerimist puudutavate küsimuste osas, et välja selgitada teatud ettevõtmiseks perspektiivsed alad nii tegevust pärssivaid kui ka soodustavaid tegureid arvesse võttes. Siinses töös normeeriti kaevandamist positiivselt mõjutava fosforiidi tootluse andmekiht pikslites esinevate piirangute maksimaalsete väärtuste põhjal, mis tähendab, et nii negatiivsed kui ka positiivsed tegurid avaldasid perspektiivsete kaevandusalade määratlemisel sama suurt osakaalu. Kaevandamise planeerimisel on ka varasemalt ilmnunud, et soodustavad ning piiravad tegurid on mõlemad ühtviisi olulised ettevõtmise arengus (Jiskani *et al.*, 2020). Taolisele metoodikale tuginedes võiks ka analüüsida, kas tänased Eesti kaevandusalad paiknevad kaevandamiseks kõige sobivamates piirkondades. Samuti saaks antud metoodikat rakendades katsetada, kas ja kuidas muutuvad määratletud fosforiidi kaevandamise perspektiivsed uuringualad erineva taustaga inimeste hinnanguid arvesse võttes.

Teostatud analüüsi oleks võimalik täiustada, kaasates erineva taustaga eksperte ülesande kontekstis asjakohaste kriteeriumite väljaselgitamisel ning neile olulisushinnangute määratlemisel. Praegusel juhul tulenes ühetaolise taustaga inimeste hinnangute arvestamine probleemi taustast ja asjaolust, et käsitletav teema on alles algusetapis, mistõttu väljastpoolt spetsialiste ning erinevaid huvirühmi ei kaasatud. See võib aga mõjutada analüüsi tulemust (Dey & Ramcharan, 2008). Fosforiidiuuringute edasistes etappides ja antud metoodika kasutamisel teiste probleemküsimuste korral, on kindlasti oluline ka laiemat üldsust kaasata, et tagada huvirühmadega arvestamine ja leida kompromisse vastuoluliste soovide vahel. Erinevate huvirühmade, sealhulgas kohalike elanike kaasamise olulisust on rõhutatud nii Eestis kui mujal (Davis & Tilton, 2005; Erzurumlu & Erzurumlu, 2015; Paat *et al.*, 2021).

## Kokkuvõte

Magistritöö eesmärk oli välja selgitada kolm Eesti fosforiidi kaevandamiseks perspektiivset uuringuala. Täpsemalt oli analüüsi aluseks Toolse ja Rakvere maardlate piirkonnad, millest esimeses sooviti määratleda üks ning teises kaks uuringuala. Töös kasutati multikriteeriumilise analüüsi põhimõtteid koos GIS võimalustega, et ekspertgrupi hinnanguid kaasata, andmeid töödelda ja soovitud tulem saavutada. Taolisele metoodikale tuginedes suudeti edukalt määratleda kolm fosforiidi kaevandamiseks perspektiivset uuringuala ja vastata tööks seatud uurimisküsimustele, võttes arvesse nii fosforiidi kvaliteeti analüüsitud piirkondades kui ka seal esinevaid kaevandustegevust piiravaid või välistavaid looduslikke ja looduskaitselisi, sotsiaalseid ning majanduslikke tegureid.

Toolse maardlas piiritleti Toolse jõest läände jääv 14,78 km<sup>2</sup> suurune Toolse perspektiivne uuringuala ja Rakvere maardlasse jäävad Kunda jõe vasakkaldale Põlula ning paremkaldale Ulvi perspektiivsed uuringualad, mille pindalad on vastavalt 4,08 km<sup>2</sup> ja 4,25 km<sup>2</sup>. Kõik analüüsi põhjal väljaselgitatud fosforiidi kaevandamise perspektiivsed uuringualad on hinnangulise P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tootluse poolest samas suurusjärgus (10–11 Mt), et need oleksid omavahel võrreldavad. Kolmest territooriumist pindalaliselt suurim on Toolses määratletud ala, kuna selle piirkonna fosforiidi kvaliteet on madalaim. Rakvere maardlas piiritletud territooriumitest on Põlulas suurem fosforiidikihi paksus, kuid Ulvi piirkonnas esineb mõnevõrra kõrgem fosforiühendi P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> protsentuaalne sisaldus.

Uurimuse üheks oluliseks osaks oli määratletud perspektiivsetel uuringualadel potentsiaalse fosforiidi kaevandamise jaoks arvesse võetud asjakohaste piiravate tegurite esinemise ning ulatuse analüüs. Selle põhjal ilmnnes, et Toolse uuringualal esinevate piirangute väärtused piksli kohta olid keskmiselt madalamad kui kahes Rakvere maardlas piiritletud territooriumil. Küll aga kompenseeris fosforiidi tootlus Rakvere maardlas paiknevad piirangud ning keskmiste sobivushinnangute poolest piksli kohta on perspektiivsete uuringualade paremusjärjestus järgnev: Põlula, Ulvi, Toolse.

Analüüsitud piirangutest esineb Toolse fosforiidi kaevandamise perspektiivsel uuringualal III kaitsekategooria taime kasvukoht, vääriselupaik, veekogu piiranguvöönd, lubjakivivarud, aktiivne lubjakivikarjäär ning geoloogilised uuringualad. Põlula ja Ulvi perspektiivsed uuringualad kattuvad kogu ulatuses väärtuslike maastike ning suurel määral väärtuslike põllumajandusmaadega, Toolses on kattuvus nendega väiksem. Lisaks esinevad kahes Rakvere maardlas piiritletud uuringualal ulatuslikud põlevkivivarud. Toolses ja Põlulas piiritletud aladel paiknevad mõned sotsiaalselt hinnatud nähtused. Kõik piiritletud territooriumid kattuvad suuremal või väiksemal määral rohevõrgustiku ja metsaste aladega, transpordialaste ning tehnoarajatiste kaitsevöönditega. Rahvastikutihedus jääb perspektiivsete uuringualade poolt otseselt mõjutatud piirkondades väärtuseni kuni 11 in/km<sup>2</sup>. Määratletud aladel esineb keskmiselt üle kümne eraõue ja üksikud tootmisõued ning suur osa piirkondade katastriüksustest on eraomandis. Olulisi nähtusi jääb täiendavalt kõigi kolme perspektiivse uuringuala lähiümbrusesse, millega tuleb ettevõtmise planeerimisel samuti arvestada.

Töös määratletud fosforiidi kaevandamise perspektiivsed uuringualad ja nende analüüsil saadud tulemused võimaldavad hinnata piiritletud territooriumite sobivust kaevandamiseks, seal esinevaid piiranguid ning alade põhjal läbi viia lisauuringuid kõnealuse maavara potentsiaalset kaevandamist silmas pidades. Täiendavad analüüsid on vajalikud, et välja selgitada, millised on kaasnevad geoloogilised tingimused ning võimalused antud piirkondades. Seeläbi saab hinnata, kas ja kuidas Eesti fosforiidivarusid kasutusele võtta, milliste piirangutega arvestada ning millised leevendusmeetmed on vajalikud. Nendele aspektidele tuginedes on võimalik planeerida jätkusuutlik ja läbimõeldud kaevandustegevus.

# Allocation and analysis of perspective exploration areas for mining Estonian phosphorite

Karoliina Kurvits

## *Summary*

Phosphorus is a very important element in biochemical processes but is often a limiting factor for productivity (Turner & Raboy, 2019). This element is widely used to make fertilizers but is also used in different chemical, food and even in electronic and machinery production (European Commission, 2020). Phosphorite is a mineral resource that can be used as a source for phosphorus. As the demand for phosphorus is rising (Soesoo & Kirsimäe, 2020), the potential areas for phosphorite mines must be examined and analyzed for their productivity as well as for limiting factors. In the 20<sup>th</sup> century there were some active phosphorite mines in Estonia, but the last one was terminated over 30 years ago (Raukas & Teedumäe, 1997). Those Estonian phosphorite mines left a terrible impact on the landscape and natural environment. Nowadays, most people still have a negative mindset towards it, even though times have changed, and so have the possibilities and technologies.

The aim of this thesis was to allocate three perspective exploration areas for mining Estonian phosphorite in Toolse and Rakvere phosphorite deposit areas. The perspective exploration areas were defined by taking into account datasets that favour, restrict or exclude some areas for potential mine sites by using multicriteria analysis in combination with GIS. Multicriteria evaluation can help decision makers to make reasonable decisions, especially when considering different criteria, and for activities with large scale impacts (Belton & Stewart, 2002; Chakhar & Martel, 2004; Jankowski, 1995; Malczewski, 2006). Multicriteria analysis has been used to specify suitable areas for mine sites by comparing and ranking different alternative sites (Dey & Ramcharan, 2008; Farkaš & Hrastov, 2021; Gudissa *et al.*, 2020; Hudeji *et al.*, 2013) but according to the author of this thesis, it hasn't been used when trying to find initial perspective exploration areas for mining.

Therefore, to adjust the methodology for the current spatial problem, this paper used multicriteria analysis principles in GIS software ArcGIS Pro 2.8.1 to on the one hand deal with phosphorite quality dataset that favours phosphorite mining, and on the other hand to take into account nature and nature protection, social and economic phenomena that present restrictions when allocating mine sites. All the data originates from Estonian national institutions. Expert group (consisted mostly of specialists from the Geological Survey of Estonia) opinions were included to determine the data (criteria) that is important for this problem, and to define criteria weights. Then, vector data layers were converted into raster format and each raster layer was combined with its weight. After that, restrictive phenomena were combined, phosphorite productivity for each raster pixel was calculated and normalized, and then the normalized phosphorite dataset could be summarized with combined restrictive phenomena layer to get phosphorite mining suitability scores for each pixel. Larger suitable areas were first defined by ArcGIS query, and then were adjusted and specified manually by taking into account necessary phosphorite productivity for mining in each area, phosphorite quality layers and different restrictive datasets.

One perspective exploration area was defined in Toolse deposit area, which is called Toolse perspective exploration area (14,78 km<sup>2</sup>), and two perspective exploration areas were defined in Rakvere deposit, which are called Põlula (westward, 4,08 km<sup>2</sup>) and Ulvi (eastward, 4,25 km<sup>2</sup>). The phosphorus productivity for each of the perspective exploration areas was defined to be in the range of 10–11 Mt, so that the areas could be compared to one another.

Because of the lower quality of phosphorite in Toolse deposit, the perspective exploration area is over three times larger than the areas in Rakvere deposit. The phosphorite layer is the thickest in the Põlula perspective exploration area, but the highest content of  $P_2O_5$  (%) is apparent in the Ulvi defined site.

Important part of this thesis was also to analyze and describe which limiting factors occur in the perspective exploration areas and to what extent. It appeared that the defined area in Toolse had the lowest average restriction dataset values per pixel, but when looking at the suitability scores the average values were higher for the perspective exploration areas in Rakvere deposit. This is a result from the higher quality phosphorite that is found in those areas which compensates the slightly higher number of restrictions. According to the suitability scores, the ranking of the perspective exploration areas from best to worst is the following: Põlula, Ulvi, Toolse. Important limiting factors can be found on every perspective exploration area and in their vicinity.

This thesis was able to allocate three perspective exploration sites for phosphorite mining in Estonia and give answers to the formulated research questions. It is important to conduct additional surveys and analysis based on the defined areas, which was the point of extracting these perspective exploration areas for the Geological Survey of Estonia (Kurvits *et al.*, 2022). The institution will do hydrogeological, mining and profitability studies for these areas to evaluate and compare the areas on those aspects. Thorough analyzes and planning is the way to consider different relevant phenomena and to implement sustainable mining activities.

## Tänuavaldused

Aitäh Tõnu Ojale magistritöö juhendamise ja nõuannete eest. Suured tänud Mariliis Arenile, kes sellise magistritöö teema välja pakkus, töö valmimisele kaasa elas ja soovitusi andis. Suur aitäh Lauri Joosule sisukate vastuste eest tekkinud küsimustele ja kelle nõuannetele põhinedes ning kellega koostööd tehes see töö selliseks vormus. Tänan Hando-Laur Habichtit põhjaliku tagasiside ja soovitude eest. Aitäh ka teistele Eesti Geoloogiateenistuse liikmetele, kellega sai lõputööga seonduvalt mõtteid vahetatud ning arutelusid peetud. Soovin väga tänada enda perekonda, kes on mulle kogu teekonna jooksul toeks olnud. Aitäh, et olete mu mõtteid ja arutluskäike ära kuulanud, mulle nõu ning igapidi kindlust andnud. Suur aitäh vanavanematele, kes mind pidevalt innustasid ja minusse ikka uskusid. Vanaisa, see töö valmis Sinule mõeldes! Tänan enda sõpru ülikooliaastate ning loodud mälestuste eest. Ilma kõigi eelnimetatud inimesteta ei oleks see magistritöö valminud, sellisel kujul kindlasti mitte.

## Kasutatud allikad

- Bakhtavar, E., Lotfian, R. (2017). Applying an integrated fuzzy gray MCDM approach: A case study on mineral processing plant site selection. *International Journal of mining and Geo-Engineering*, 51:2, 177–183, DOI: 10.22059/ijmge.2017.232091.594669
- Belton, V., Stewart, T. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. New York: Springer.
- Bitarafan, M. R., Ataei, M. (2004). Mining method selection by multiple criteria decision making tools. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104:9, 493–498. Vaadatud 13.04.2022  
[https://www.researchgate.net/publication/279557048\\_Mining\\_method\\_selection\\_by\\_multiple\\_criteria\\_decision\\_making\\_tools](https://www.researchgate.net/publication/279557048_Mining_method_selection_by_multiple_criteria_decision_making_tools)
- Carver, S. J. (1991). Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 5:3, 321–339, DOI: 10.1080/02693799108927858
- Chakhar, S., Martel, J.-M. (2004). Towards a Spatial Decision Support System: Multi-Criteria Evaluation Functions Inside Geographical Information Systems. *Annales du LAMSADE*, 2, 97–124. Vaadatud 10.04.2022  
[https://www.researchgate.net/publication/255607164\\_Towards\\_a\\_Spatial\\_Decision\\_Support\\_System\\_Multi-Criteria\\_Evaluation\\_Functions\\_Inside\\_Geographical\\_Information\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/255607164_Towards_a_Spatial_Decision_Support_System_Multi-Criteria_Evaluation_Functions_Inside_Geographical_Information_Systems)
- Davis, G. A., Tilton, J. E. (2005). The resource curse. *Natural Resources Forum*, 29:3, 233–242, DOI: 10.1111/j.1477-8947.2005.00133.x
- Dey, P. K., Ramcharan, E. K. (2008). Analytic hierarchy process helps select site for limestone quarry expansion in Barbados. *Journal of Environmental Management*, 88, 1384–1395, DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.07.011
- Dmytrenko, D. (2020). *A GIS-based multi-criteria evaluation of the wind energy potential of Kherson and Zaporizhzhia oblasts of Ukraine* (Master's thesis). University of Tartu. Vaadatud 15.03.2022 <https://dspace.ut.ee/handle/10062/68395>
- Eesti Geoloogiateenistus (2022). *Eesti geoloogilise baaskaardi (1:50 000) reaalsus- ja andmemudel*. Rakvere: Eesti Geoloogiateenistus.
- Erzurumlu, S. S., Erzurumlu, Y. O. (2015). Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis. *Resources Policy*, 46, 6–14, DOI: 10.1016/j.resourpol.2014.10.001
- Esri (2022a). *Light Gray Canvas Base*. Vaadatud 17.05.2022  
<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=291da5eab3a0412593b66d384379f89f>
- Esri (2022b). *World Countries (Generalized)*. Vaadatud 17.05.2022  
<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=2b93b06dc0dc4e809d3c8db5cb96ba69>
- Euroopa Komisjon (2020). *Kriitilise tähtsusega toorainetega seotud vastupanuvõime: teekond suurema julgeoleku ja kestlikkuse poole*. Brüssel: Euroopa Komisjon. Vaadatud 22.03.2022  
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2020:0474:FIN:ET:PDF>

- European Commission (2014). *Report on Critical Raw Materials for the EU*. Vaadatud 23.03.2022  
<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/10010/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>
- European Commission (2020). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report*. DOI: 10.2873/11619
- Farkaš, B., Hrastov, A. (2021). Multi-Criteria Analysis for the Selection of the Optimal Mining Design Solution—A Case Study on Quarry “Tambura”. *Energies*, 14:11, 3200, DOI: 10.3390/en14113200
- Gudissa, L., Raghuvanshi, T. K., Meten, M., Chemed, Y. C. (2020). A GIS-AHP Based Approach for Optimal Quarry Site Location Around Harer and Dire-Dawa Towns, Eastern Ethiopia. DOI: 10.21203/rs.3.rs-58834/v1
- Hekmat, A., Osanloo, M., Shirazi, A. M. (2008). New approach for selection of waste dump sites in open pit mines. *Mining Technology*, 117:1, 24–31, DOI: 10.1179/174328608X343768
- Hudej, M., Vujic, S., Radosavlevic, M., Ilic, S. (2013). Multi-Variable Selection of the Main Mine Shaft Location. *Journal of Mining Science*, 49:6, 950–954, DOI: 10.1134/S1062739149060154
- Ismayilova, I. (2020). *Suitability analysis for alvars in Estonia using Random Forest and GIS based Multi Criteria Decision Making approach* (Master's thesis). University of Tartu. Vaadatud 15.03.2022 <http://dspace.ut.ee/handle/10062/68400>
- Jankowski, P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9:3, 251–273, DOI: 10.1080/02693799508902036
- Jankowski, P., Richard, L. (1994). Integration of GIS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21:3, 323–340, DOI: 10.1068/b210323
- Jasinski, S. M., Kramer, D. A., Ober, J. A., Searls, J. P. (1999). Fertilizers: Sustaining Global Food Supplies. *U.S. Geological Survey Fact Sheet* 155-99, DOI: 10.3133/fs15599
- Jiskani, I. M., Shah, S. A. A., Qingxiang, C., Zhou, W., Lu, X. (2020). A multi-criteria based SWOT analysis of sustainable planning for mining and mineral Industry in Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1108, DOI: 10.1007/s12517-020-06090-3
- Karadogan, A., Kahrman, A., Ozer, U. (2008). Application of fuzzy set theory in the selection of underground mining method. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 108:2, 73–79. Vaadatud 13.04.2022  
[https://www.researchgate.net/publication/271742049\\_Application\\_of\\_fuzzy\\_set\\_theory\\_in\\_the\\_selection\\_of\\_underground\\_mining\\_method](https://www.researchgate.net/publication/271742049_Application_of_fuzzy_set_theory_in_the_selection_of_underground_mining_method)
- Kurvits, K., Joosu, L., Vind, J., Lumiste, K., Kaasik, T., Sipp Kulli, S., Jürgenson, J., Aren, M., Habicht, H.-L., Polikarpus, M., Kaljuste, V. (2022). *Osa II. Fosforiidi perspektiivsete uuringualade määratlemine. Uurimistöö: Fosforiidi perspektiivsete uuringualade määratlemine ja mäenduslik ning hüdrogeoloogiline analüüs*. Rakvere: Eesti Geoloogiateenistus. [avaldamisel]

- Lauri, L. S., Eilu, P., Brown, T., Gunn, G., Kalvig, P., Sievers, H. (2018). *SCRREEN: Identification and quantification of primary CRM resources in Europe*. Vaadatud 21.03.2022 <http://screen.eu/wp-content/uploads/2018/03/SCRREEN-D3.1-Identification-and-quantification-of-primary-CRM-resources-in-Europe.pdf>
- Looduskaitseeadus (2021). Vaadatud 30.08.2021 <https://www.riigiteataja.ee/akt/116062021003>
- Maa-amet (2021). *Koondbilanss seisuga 2020*. Vaadatud 04.03.2022 [https://geoportaal.maaamet.ee/docs/geoloogia/koondbilanss\\_2020.pdf?t=20210527113152](https://geoportaal.maaamet.ee/docs/geoloogia/koondbilanss_2020.pdf?t=20210527113152)
- Maa-amet (2022). *WMS/WFS teenused*. Vaadatud 24.04.2022 <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Teenused/WMSWFS-teenused-p65.html>
- Maapõueseadus (2021). Vaadatud 29.04.2022 <https://www.riigiteataja.ee/akt/110072020059>
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20:7, 703–726, DOI: 10.1080/13658810600661508
- Malczewski, J., Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. New York: Springer.
- Mardani, A., Jusoh, A., MD Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, 28:1, 516–571, DOI: 10.1080/1331677X.2015.1075139
- Ordoviitsiumi skeem (s.a). *Eesti stratotüüpsed paljandid*. Vaadatud 21.02.22 <https://sisu.ut.ee/stratotuup/ordoviitsium-skeem>
- 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, DOI: 10.1016/j.exis.2021.100911
- Raudsep, R. (1982). Eesti fosforiit ja selle uued maardlad. *Eesti Loodus*, 8, 517–523.
- Raudsep, R. (2008). Estonian georesources in the European context. *Estonian Journal Of Earth Sciences*, 57:2, 80–86, DOI: 10.3176/earth.2008.2.03
- Raukas, A. (2018). Briefly about Estonia. *Dynamiques environnementales*, 42, 284–291, DOI: 10.4000/dynenviron.2230
- Raukas, A., Teedumäe, A. (Eds). (1997). *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Tallinn: Estonian Academy Publishers. <https://geoloogia.info/geology/>
- Reinsalu, E. (2016). *Eesti mäendus: maapõueinseneri õpik*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
- Safari, M., Kakei, R., Ataei, M., Karamoozian, M. (2012). Using fuzzy TOPSIS method for mineral processing plant site selection. *Arab J Geosci*, 5, 1011–1019, DOI: 10.1007/s12517-010-0234-y
- Saki, G., Dehghan, H., Shokri, B. J., Bogdanovic, D. (2020). Determination of the most appropriate tools of multi-criteria decision analysis or underground mining method selection—a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1271, DOI: 10.1007/s12517-020-06233-6

- Soesoo, A., Kirsimäe, K. (2020). Estonian Paleozoic shelly phosphorites: a continent-scale resource for phosphorus and potential for rare earth elements. *EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-6062*, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-6062
- Straka, M., Bindzár, P., Kaduková, A. (2014). Utilization of the multicriteria decision-making methods for the needs of mining industry. *Acta Montanistica Slovaca*, 19:4, 199–206. Vaadatud 13.04.2022 [https://www.researchgate.net/publication/279325037\\_Utilization\\_of\\_the\\_multicriteria\\_decision-making\\_methods\\_for\\_the\\_needs\\_of\\_mining\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/279325037_Utilization_of_the_multicriteria_decision-making_methods_for_the_needs_of_mining_industry)
- Turner, B. L., Raboy, V. (2019). Phosphorus cycle. DOI: 10.1036/1097-8542.508930
- U.S. Geological Survey (2002). *World phosphate mines, deposits, and occurrences*. Vaadatud 17.05.2022 <https://mrdata.usgs.gov/phosphate/>
- U.S. Geological Survey (2022). *Mineral commodity summaries 2022*. Reston: U.S. Geological Survey. DOI: 10.3133/mcs2022
- Volkova, A., Latõšov, E., Siirde, A. (2010). Use of multi-criteria decision analysis for choosing an optimal location for a wood fuel based cogeneration plant: a case study in Estonia. *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'10): The 6th WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'10)*, 89–94. Vaadatud 13.04.2022 [https://www.researchgate.net/publication/266463431\\_Use\\_of\\_multi-criteria\\_decision\\_analysis\\_for\\_choosing\\_an\\_optimal\\_location\\_for\\_a\\_wood\\_fuel\\_based\\_cogeneration\\_plant\\_a\\_case\\_study\\_in\\_Estonia](https://www.researchgate.net/publication/266463431_Use_of_multi-criteria_decision_analysis_for_choosing_an_optimal_location_for_a_wood_fuel_based_cogeneration_plant_a_case_study_in_Estonia)
- Yang, X., Tamm, K., Piir, I., Kuusik, R., Trikkel, A., Tõnsuaadu, K. (2021). Evaluation of Estonian phosphate rock by flotation. *Minerals Engineering* 171, 107127, DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107127
- Yap, J. Y. L., Ho, C. C., Ting, C.-Y. (2019). A systematic review of the applications of multi-criteria decision-making methods in site selection problems. *Built Environment Project and Asset Management*, 9:4, 548–563, DOI: 10.1108/BEPAM-05-2018-0078

# Lisad

## Lisa 1. Perspektiivsete uuringualade määratlemiseks kasutatud andmed

Andmekiht	Allikas	Väljavõtte kuupäev	Arvesse võetud andmed	
<b>Loodus ja looduskaitsealad</b>				
Loodusreservaat	EELIS: Keskkonnaagentuur	17.08.2021	Kõik esitatud alad	
Sihtkaitsevöönd				
Piiranguvöönd				
Kaitsealad		18.08.2021	Looduskaitsealade kaitsevöönditega mittekattuvad kaitsealad	
Hoiualad			Kõik esitatud alad	
I kaitsekategooria loomad			Kaitstavate alade ja sama liigi püselupaigaga mittekattuvad liikide elupaigad ja kasvukohad	
I kaitsekategooria taimed				
I kaitsekategooria seened ja samblikud				
II kaitsekategooria loomad				
II kaitsekategooria taimed				
II kaitsekategooria seened ja samblikud				
III kaitsekategooria loomad				
III kaitsekategooria taimed				
III kaitsekategooria seened ja samblikud				
Natura 2000 loodusalad				Kõik esitatud alad
Natura 2000 linnualad				
Kaitstavad üksikobjektid				Kaitstavate aladega mittekattuvad objektid ja vööndid kombineeritult
Kaitstavate üksikobjektide kaitsetsoonid				
Projekteeritavate kaitstavate üksikobjektide planeeritavad kaitsetsoonid				Kaitstavate aladega mittekattuvad objektid ja vööndid kombineeritult
Kohalike omavalitsuste kaitstavad loodusobjektid				
Kohalike omavalitsuste kaitstavate loodusobjektide piiranguvööndid	Kaitstavate aladega mittekattuvad püselupaigad			
Püselupaigad	Kaitstavate aladega mittekattuvad vääriselupaigad			
Vääriselupaigad	Kõik vastavates planeeringutes esitatud alad			
Rohevõrgustik				
Maakonna- ja üldplaneeringud	11.08–07.10.2021	Kõik vastavates planeeringutes esitatud alad		
Veekogude mõjualad	19.08.2021			
Mets	Maa-amet	31.08.2021	ETAK kõlvikud, mille puistu tüübiks on mets	
<b>Sotsiaalsed nähtused</b>				
Rahvastikutiheduse ruutkaart	Statistikaamet	17.08.2021	Rahvastikutiheduse arvestamine ETAK kõlvikute eraõue tüüpi aladel	
Kultuurimälestised	Muinsuskaitseamet	23.08.2021	Kaitstavad mälestised, muinsuskaitsealad ja neid ümbritsevad kaitsevööndid kombineeritult	
Muinsuskaitseobjektide kaitsevööndid				
Väärtuslikud maastikud	Maakonna- ja üldplaneeringud	11.08–07.10.2021	Kõik vastavates planeeringutes esitatud alad	
Miljööväärtuslikud objektid, alad				

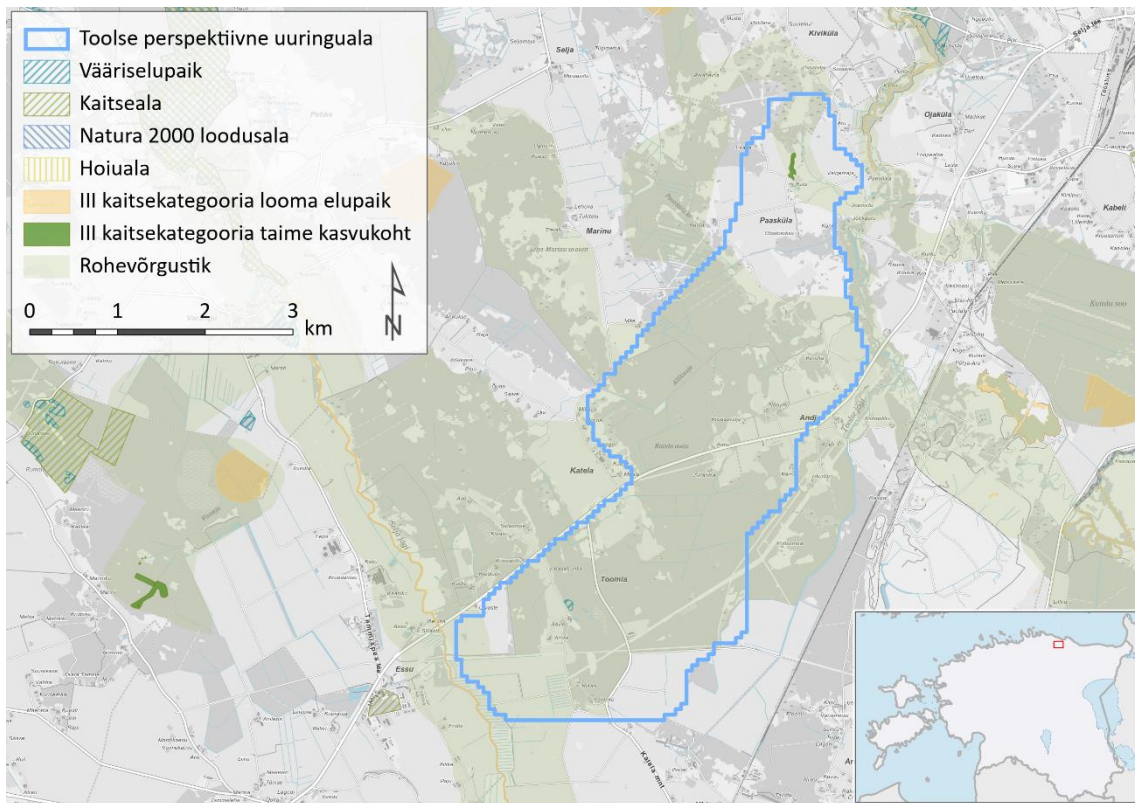
Kohaliku tähtsusega kaitsealused objektid	Maakonna- ja üldplaneeringud	11.08–07.10.2021	Kõik vastavates planeeringutes esitatud alad		
Kaunid kohad, vaated, vaatamisväärsused					
Pärandkultuur ja -objektid					
<b>Majanduslikud nähtused</b>					
Katastriüksused	Maa-amet	31.08.2021	Eraomandis või kinnistamata eraomandis katastriüksused		
Õuealad			ETAK tootmisõue tüüpi kõlvikud (eraõuede paiknemise arvestamine rahvastikutiheduse all)		
Ohtlikud käitised			Päästeamet	Tootmisõuedega mittekattuvad ohtlikud ja suurõnnetuse ohuga ettevõtted	
Riigikaitsealine mõjuala	Maa-amet	23.08.2021	Kõik riigikaitsealiste ehitiste piiranguvööndid		
Sidevõrkude mõjualad			Aktiivse mäeeraldisega mittekattuvad sideehitiste kaitsevööndid		
Ühisveevärgi- ja kanalisatsioonivõrkude mõjualad			Alad, mille tüübiks ühisveevärgi- ja kanalisatsiooni vöönd		
Transpordialased mõjualad			Aktiivse mäeeraldisega mittekattuvad avalikult kasutatava tee ja raudtee kaitsevööndid		
Elektrivõrkude mõjualad			Kõik aktiivse mäeeraldisega mittekattuvad elektripaigaldiste kaitsevööndid		
Gaasivõrkude mõjualad			Kõik gaasipaigaldiste kaitsevööndid		
Muud teed, tänavad			31.08.2021	Aktiivse mäeeraldisega mittekattuvad ETAK teed, mille tüüp on muu tänav või tee	
Liiv ja kruus			Keskkonnaregister	17.08.2021	Kõik esitatud maavarade maardlate plokid
Lubjakivi ja dolokivi					
Põlevkivi					
Turvas					
Muu					
Aktiivne uuringuala	06.09.2021	Alad, mille puhul ei ole EGT või TÜ viimas läbi üldgeoloogilist uurimust			
Taotletav uuringuala	17.08.2021	Kõik esitatud alad			
Aktiivne mäeeraldis					
Aktiivse mäeeraldisega teenindusmaa					
Taotletav mäeeraldis					
Taotletava mäeeraldisega teenindusmaa					
Väärtuslikud põllumajandusmaad	Maakonna- ja üldplaneeringud	11.08–07.10.2021	Kõik vastavates planeeringutes esitatud alad		
Fosforiidikihi paksus (m)	EGT	28.10.2021	Kogu interpoleeritud rasterkiht		
Fosforiidikihi P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> sisaldus (%)					

## Lisa 2. Kaevandustegevust negatiivselt mõjutavate kriteeriumite kaalumise

Kriteerium	Kaal	Põhjus
<b>Loodus ja looduskaitse nähtused</b>		
Loodusreservaat	3	Rangema kaitsega looduskaitsevööndid
Sihtkaitsevöönd		
Piiranguvöönd	2	Kõige leebemate piirangutega looduskaitsevöönd, kus on teatud tingimustel eeldatavalt võimalik kaevandada (KMH läbiviimise vajadus)
Kaitsealad		Piiranguvööndisse kuuluvad kaitsealad ning kaitsealused pargid, puistud
Hoiualad		Kaitstav ala, millel esinevate liikide ja nende elupaikade, kasvukohtade hävitamine ning kahjustamine on keelatud
I kaitsekategooria loomad		Rangema kaitsekategooriaga liigid, mille elupaigad ja kasvukohad kattuvad enamikul juhtudel või täielikult looduskaitsealadega seadusest tuleneval määral
I kaitsekategooria taimed		
I kaitsekategooria seened ja samblikud		
II kaitsekategooria loomad		
II kaitsekategooria taimed		
II kaitsekategooria seened ja samblikud		
III kaitsekategooria loomad		1
III kaitsekategooria taimed		
III kaitsekategooria seened ja samblikud		
Natura 2000 looduslad	3	Üleeuroopalise tähtsusega alad
Natura 2000 linnualad		
Kaitstavad üksikobjektid	2	Eeldatav kaevandustegevuse võimalikkus, kasutades leevendusmeetmeid
Kaitstavate üksikobjektide kaitsetsoonid		
Projekteeritavate kaitstavate üksikobjektide planeeritavad kaitsetsoonid		
Kohalike omavalitsuste kaitstavad loodusobjektid		
Kohalike omavalitsuste kaitstavate loodusobjektide piiranguvööndid		
Püsielupaigad		Kehtib sihtkaitsevööndi või piiranguvööndi kaitsekord
Vääriselupaigad	1	Looduskaitseaduse välised alad, otsene kaitsestaatus puudub
Rohevõrgustik		Maakonna- või üldplaneeringuga määratletud alad
Veekogude mõjualad	2	Ranna või kalda piiranguvööndis on maavara kaevandamine keelatud, kuid on teatud juhtudel on esinenud veekogude alt kaevandamist
Mets	1	Väike mõju kaevandamist piirava tegurina, vajadusel metsa majandamisest saadava tulu kompenseerimine
<b>Sotsiaalsed nähtused</b>		
Rahvastikutiheduse ruutkaart	2/3	Kaevandustegevus välistatud aladel, kus asustustihedus on $\geq 15$ in/km <sup>2</sup> (Lääne-Virumaa keskmine rahvastikutihedus) ning hõredamalt asustatud piirkondades esineb leevendusmeetmete või maade kokkuostmise võimalus
Kultuurimälestised	2	Eeldatavalt on võimalik allmaa meetodil kaevandamine, pealmaa meetod vähetõenäoline
Muinsuskaitseobjektide kaitsevööndid		
Väärtuslikud maastikud	1	Eeldatavalt ei ole tegemist kaevandamistegevust välistavate nähtustega, võimalik kasutada leevendusmeetmeid ja kaevandamisel allmaa meetodit
Miljööväärtuslikud objektid, alad		
Kohaliku tähtsusega kaitsealused objektid		

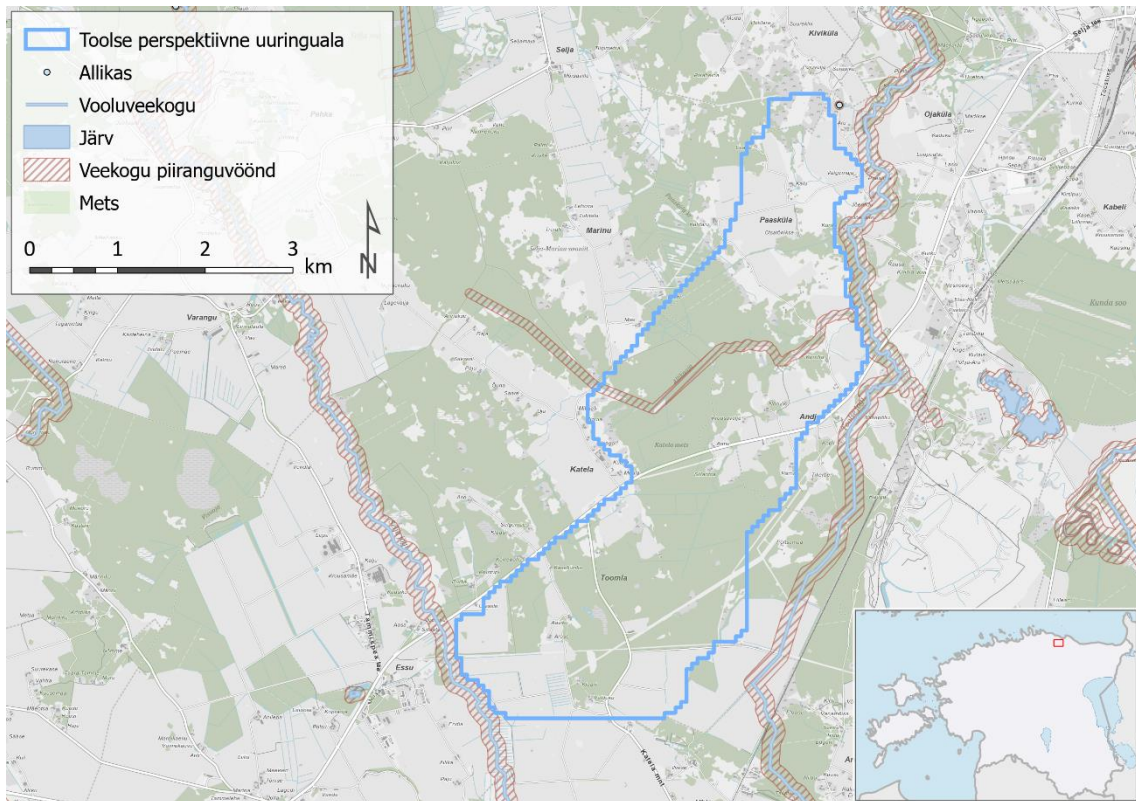
Kaunid kohad, vaated, vaatamisväärsused	1	Eeldatavalt ei ole tegemist kaevandamistegevust välistavate nähtustega, võimalik kasutada leevendusmeetmeid ja kaevandamisel allmaa meetodit
Pärandkultuur ja -objektid		
<b>Majanduslikud nähtused</b>		
Katastriüksused	1	Eraomandis katastriüksuste puhul on võimalik maade omandamine või kokkulepped maaomanikega
Õuealad	2	Eraomandis katastriüksuste puhul on võimalik maade omandamine või kokkulepped maaomanikega
Ohtlikud käitised	1	Eeldatavalt on kompenseerimine majanduslikult kulukas
Riigikaitseline mõjuala	2	Eeldatavalt keeruline ümber paigutada, kuid esineb läbirääkimiste võimalikkus
Sidevõrkude mõjualad	1	Väike mõju kaevandamist piirava tegurina, võimalik uute trasside rajamine
Ühisveevärgi- ja kanalisatsioonivõrkude mõjualad		
Transpordialased mõjualad	1/2	Suuremat piirangut kujutavad teed, mille keskmine liiklussagedus on üle 1000 auto ööpäevas, väiksema liiklustiheduse korral on teed on madalama tähtsusega
Elektrivõrkude mõjualad		Suuremat piirangut kujutavad elektriliinid, mille nimipinge on $\geq 35$ kV, muud elektripaigaldised on madalama tähtsusega ning kehtivatel mäeeraldistel on nähtused ajutise iseloomuga ja piirangut ei kujuta
Gaasivõrkude mõjualad		Maagaasi ülekandevõrk kujutab suuremat, muud gaasipaigaldised väiksemat piirangut
Muud teed, tänavad	1	Väiksema liiklustihedusega muud teed ja tänavad kujutavad väiksemad piirangut kaevandamistegevusele
Liiv ja kruus		Väike mõju kaevandamist piirava tegurina, võimalus komplekskaevandamiseks või väikeste varude mahakandmiseks
Lubjakivi ja dolokivi		
Põlevkivi		
Turvas		
Muu		
Aktiivne uuringuala		
Taotletav uuringuala		Võimalus koostööks ja kokkulepeteks uuringute läbiviijatega
Aktiivne mäeeraldis		Kahe maavara samaaegne kaevandamine võib osutada keeruliseks
Aktiivse mäeeraldise teenindusmaa		
Taotletav mäeeraldis		
Taotletava mäeeraldise teenindusmaa		
Väärtuslikud põllumajandusmaad		Ei ole seadusliku kaitse all ja seega eeldatavalt suurt piirangut kaevandamisele ei kujuta, võimalik kasutada leevendusmeetmeid

### Lisa 3. Toelse fosforiidi kaevandamise perspektiivse uuringuala piirangud

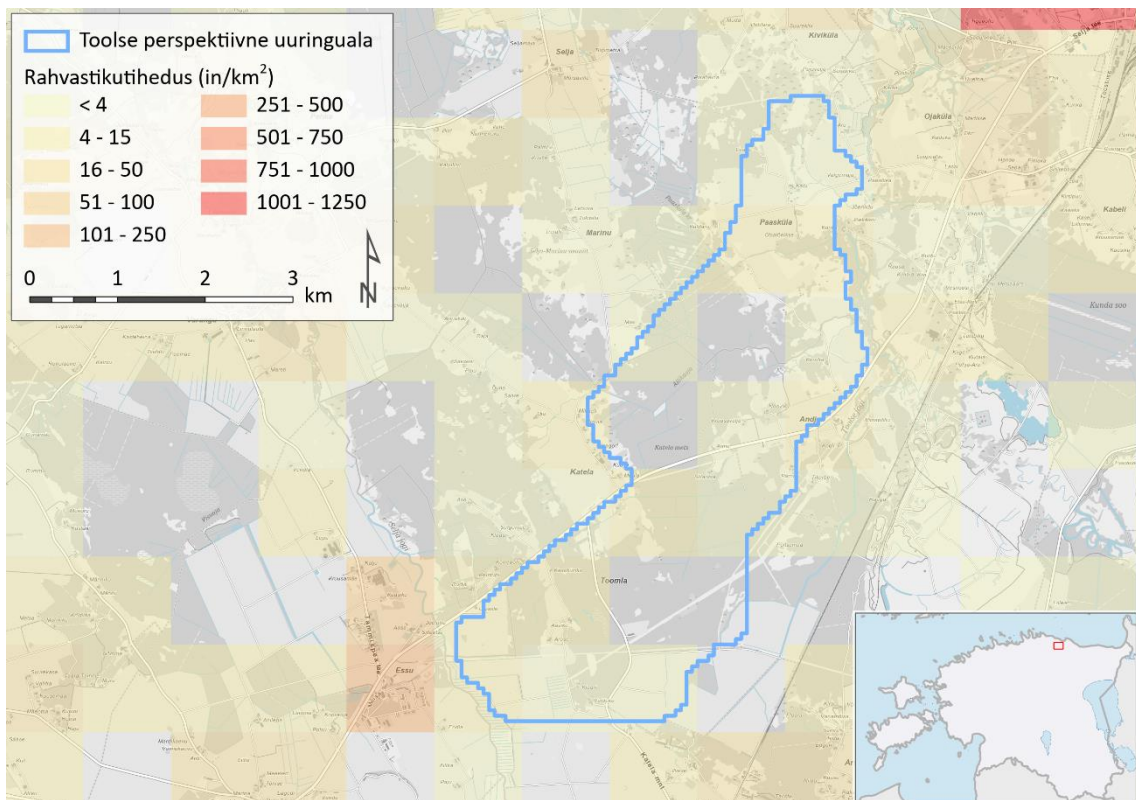


Lisa 3 joonis 1. Toelse perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad looduskaitsepiirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).<sup>1</sup>

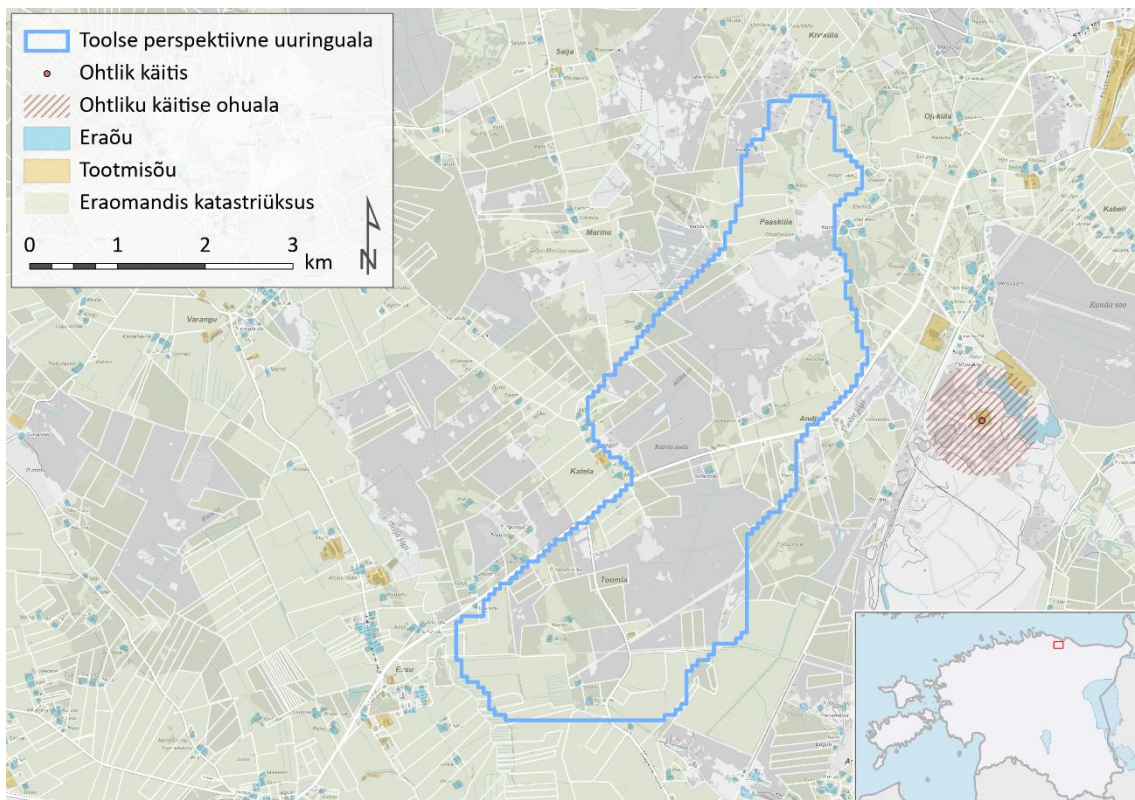
<sup>1</sup> Looduskaitsepiirangute joonisel ei ole seadusest tulenevalt kuvatud I ja II kaitsekategooria liikide elupaiku, kasvukohti ning püsielupaiku (Looduskaitseseadus, 2021).



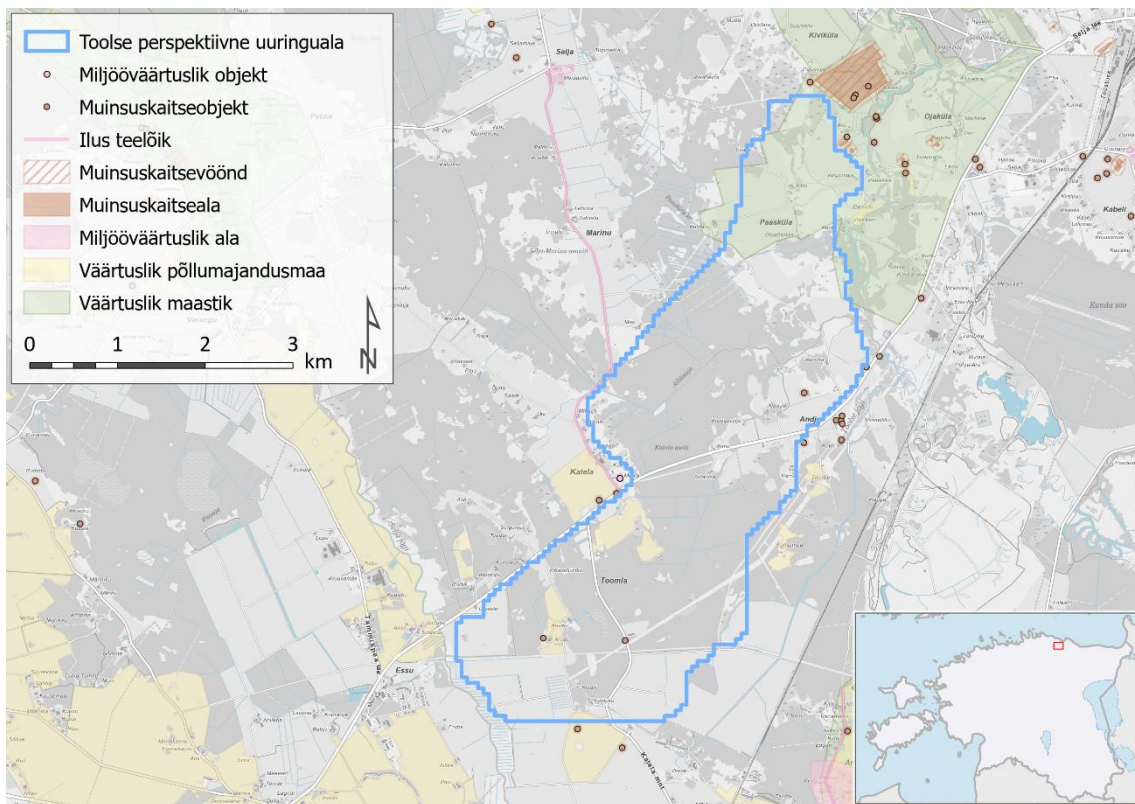
Lisa 3 joonis 2. Toole perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad looduslikud piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).



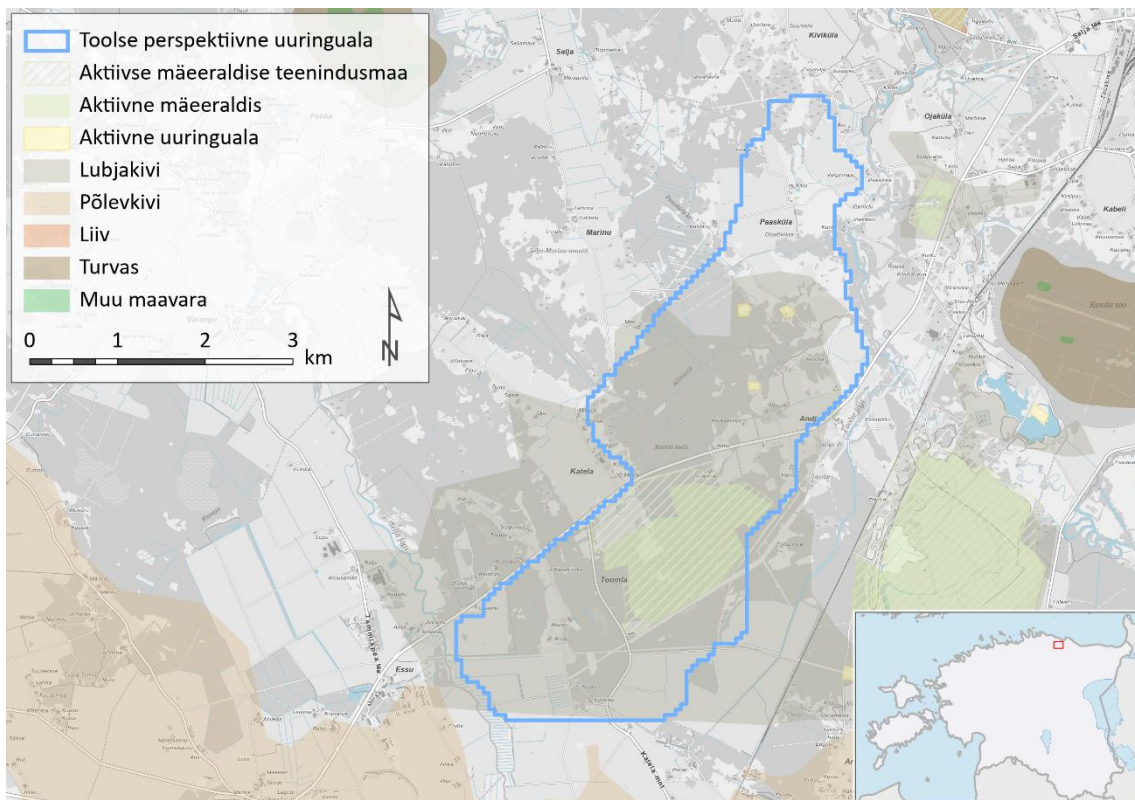
Lisa 3 joonis 3. Toole perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinev rahvastikutihedus (aluskaart: Maa-amet, 2022).



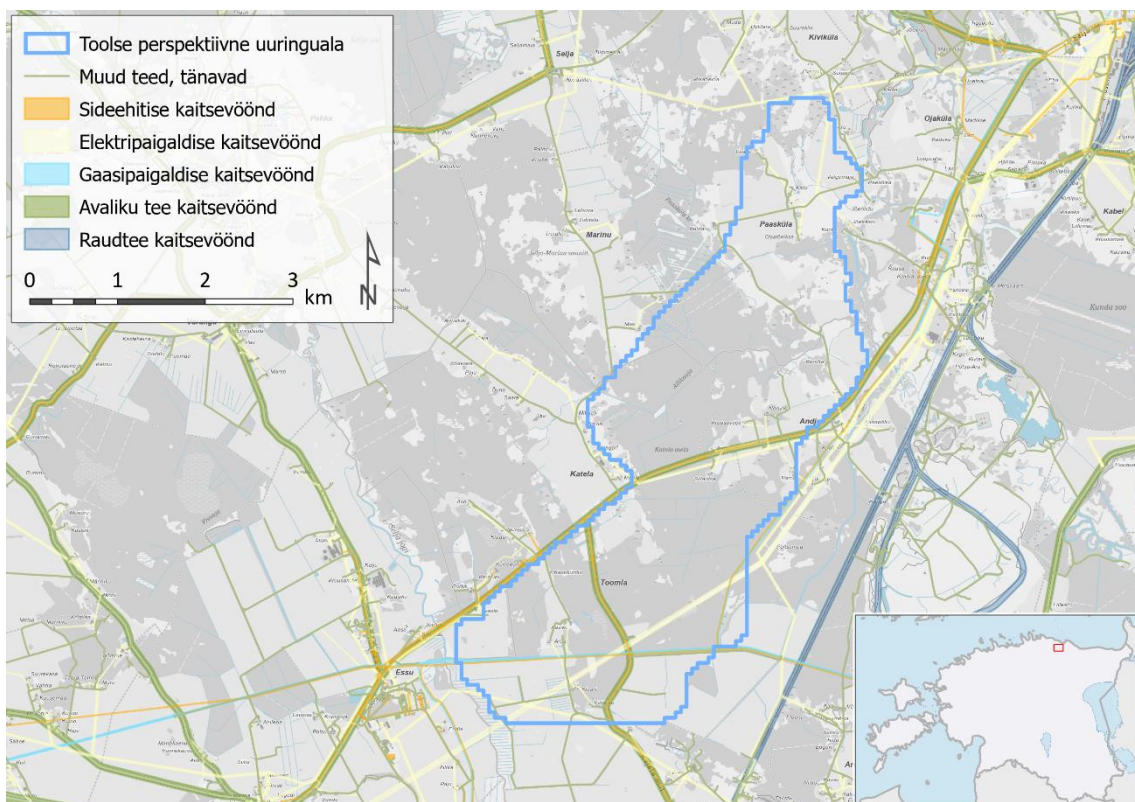
Lisa 3 joonis 4. Toole perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad maakasutusega seotud piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).



Lisa 3 joonis 5. Toole perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad sotsiaalsed väärtused koos väärtuslike põllumajandusmaadega (aluskaart: Maa-amet, 2022).

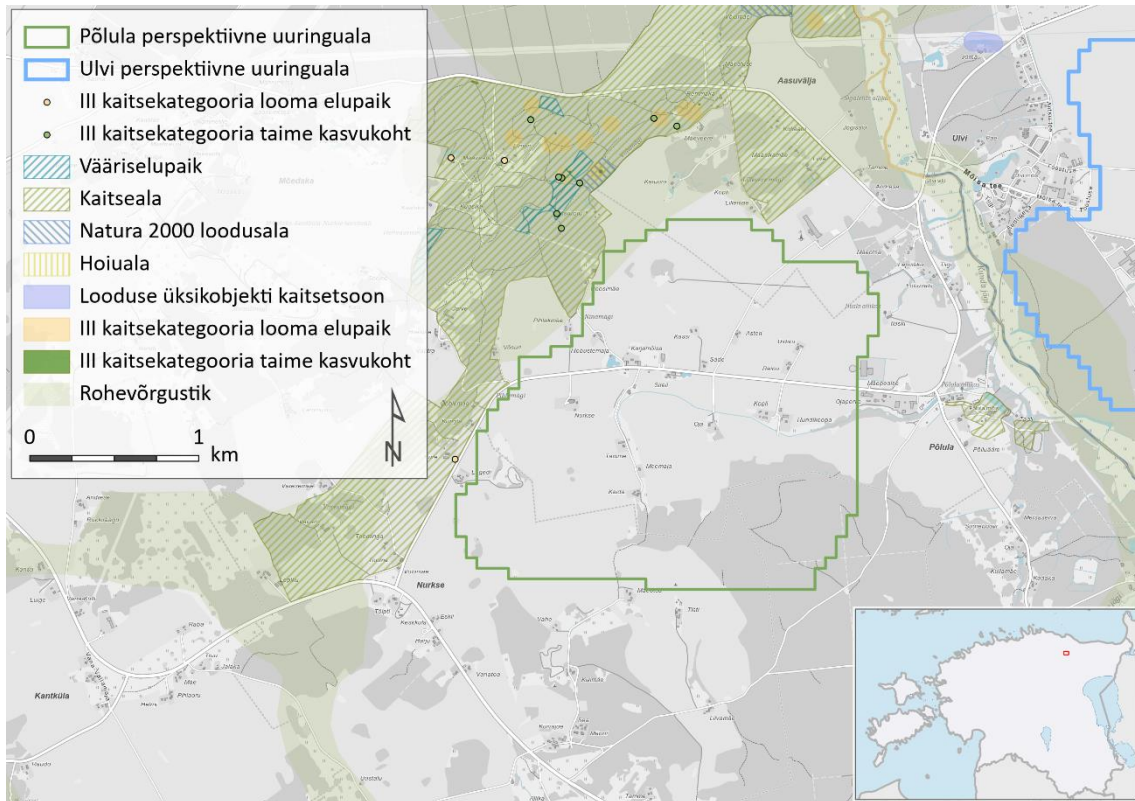


Lisa 3 joonis 6. Toole perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad geoloogilised piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).



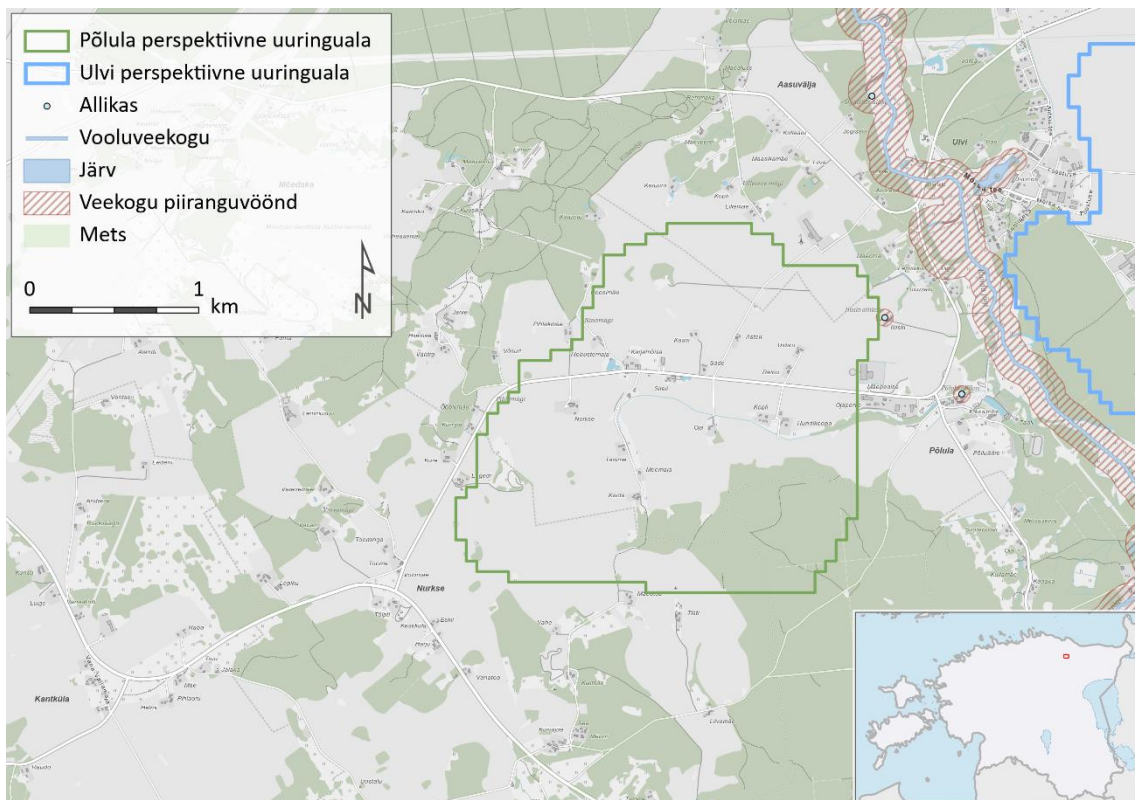
Lisa 3 joonis 7. Toole perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad transpordialased ning tehnorajatiste piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).

## Lisa 4. Põlula fosforiidi kaevandamise perspektiivse uuringuala piirangud

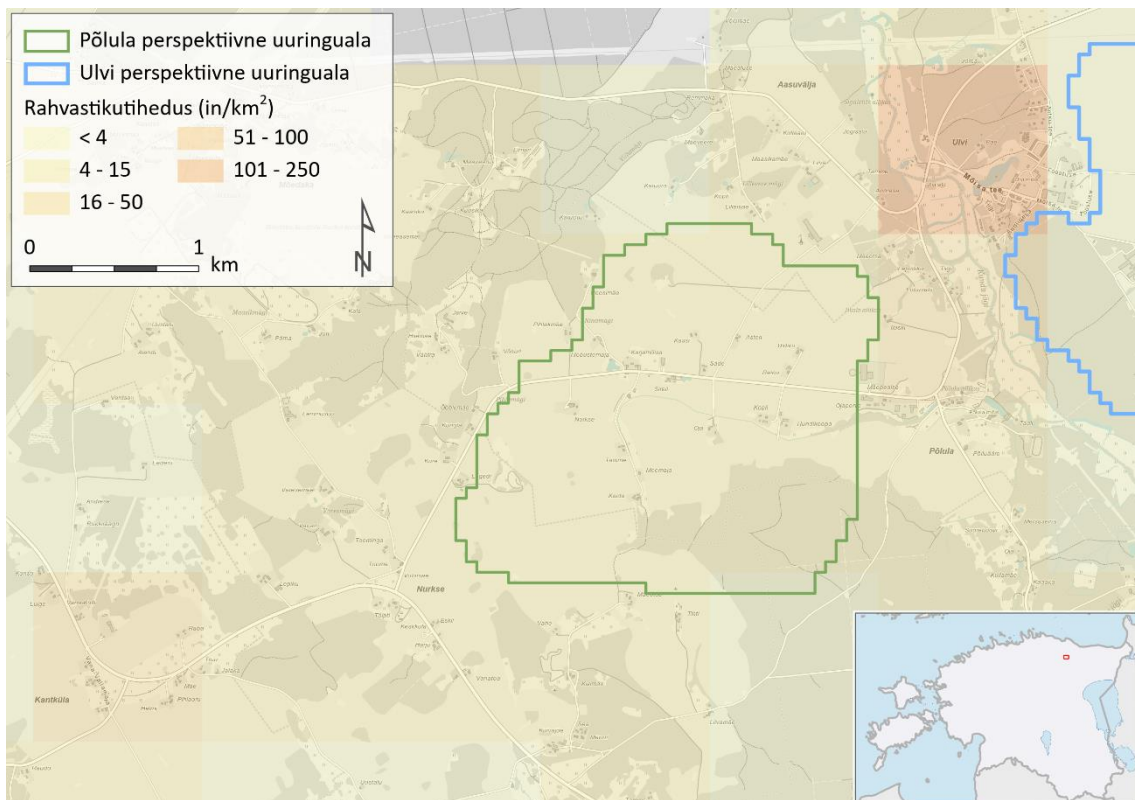


Lisa 4 joonis 1. Põlula perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad looduskaitsepiirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).<sup>2</sup>

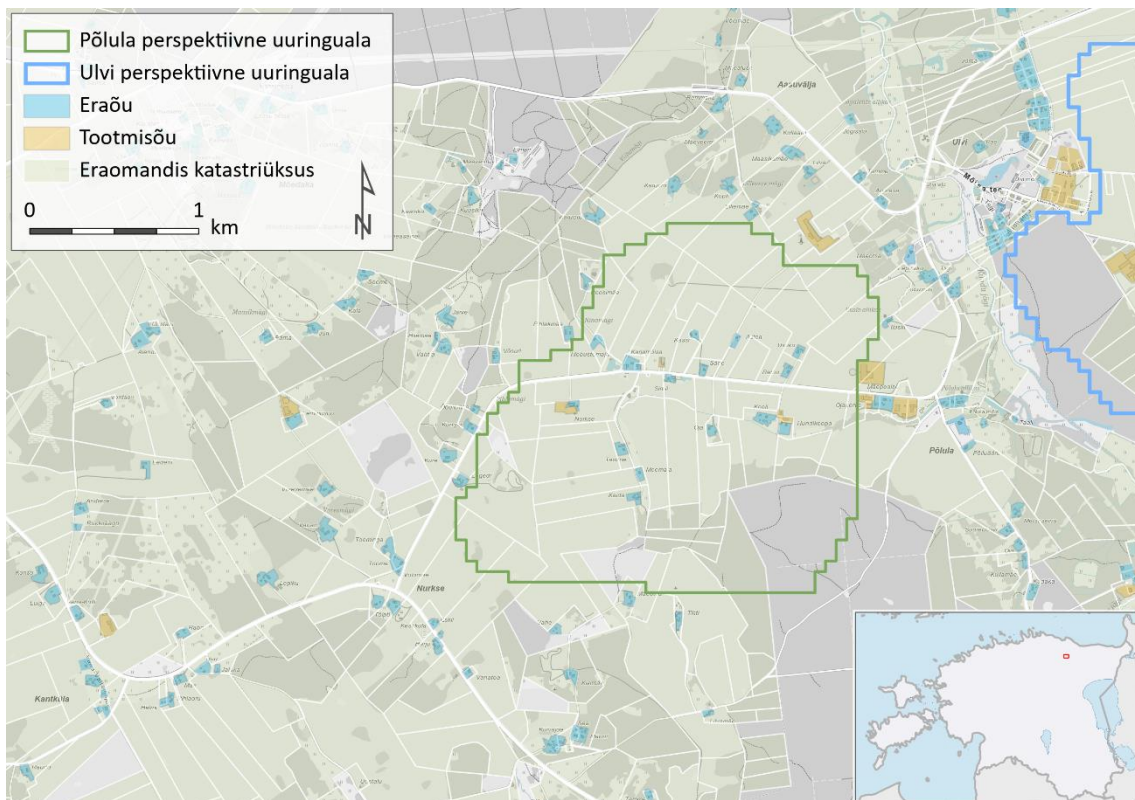
<sup>2</sup> Looduskaitsepiirangute joonisel ei ole seadusest tulenevalt kuvatud I ja II kaitsekategooria liikide elupaiku, kasvukohti ning püselupaiku (Looduskaitseseadus, 2021).



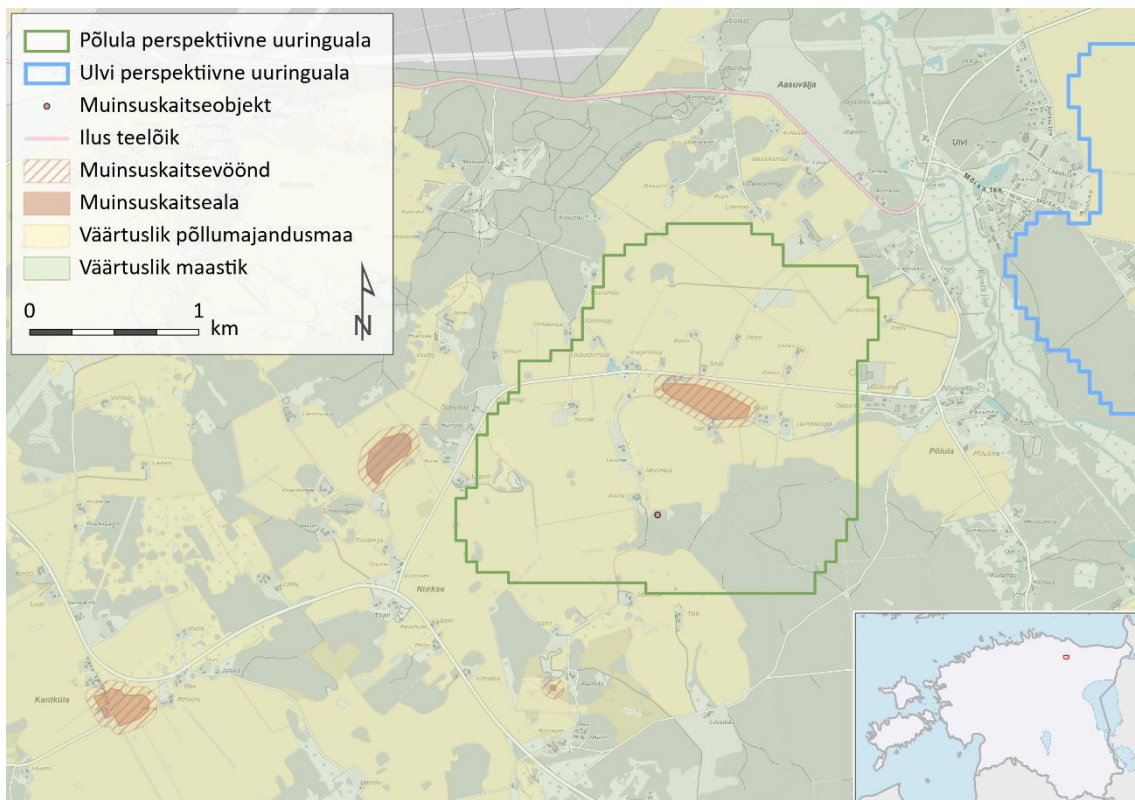
Lisa 4 joonis 2. Põlva perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad looduslikud piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).



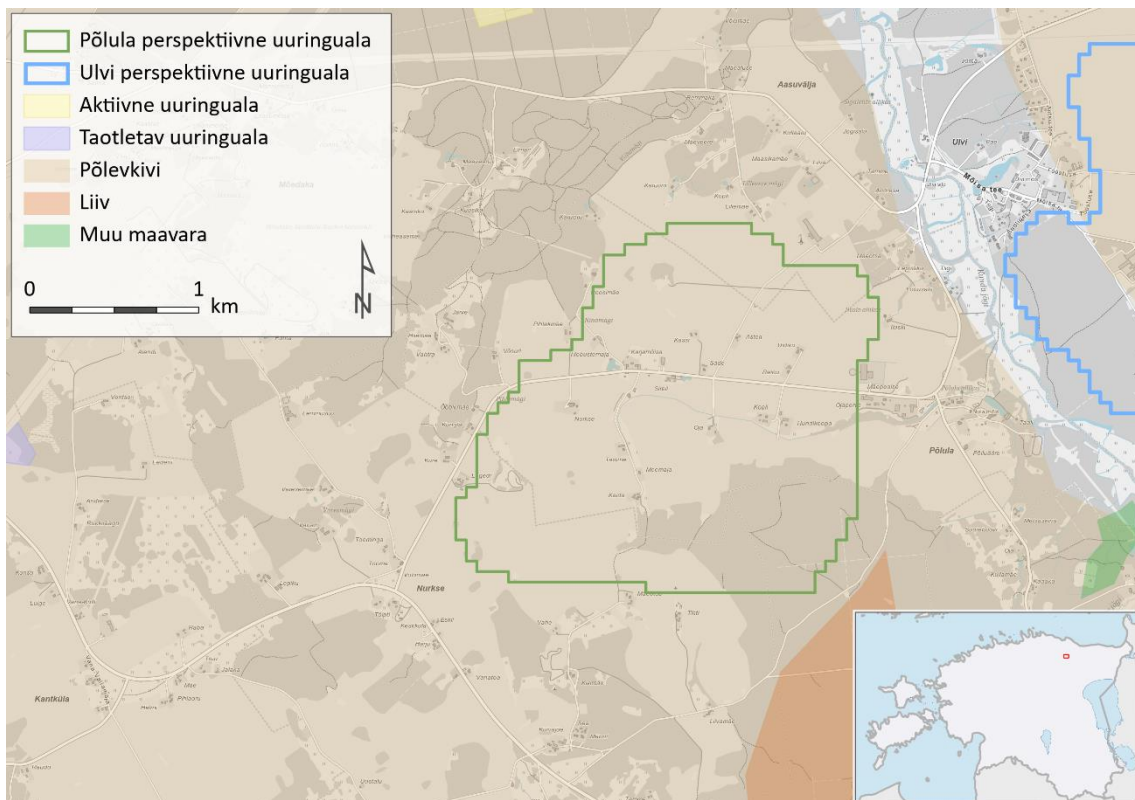
Lisa 4 joonis 3. Põlva perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinev rahvastikutihedus (aluskaart: Maa-amet, 2022).



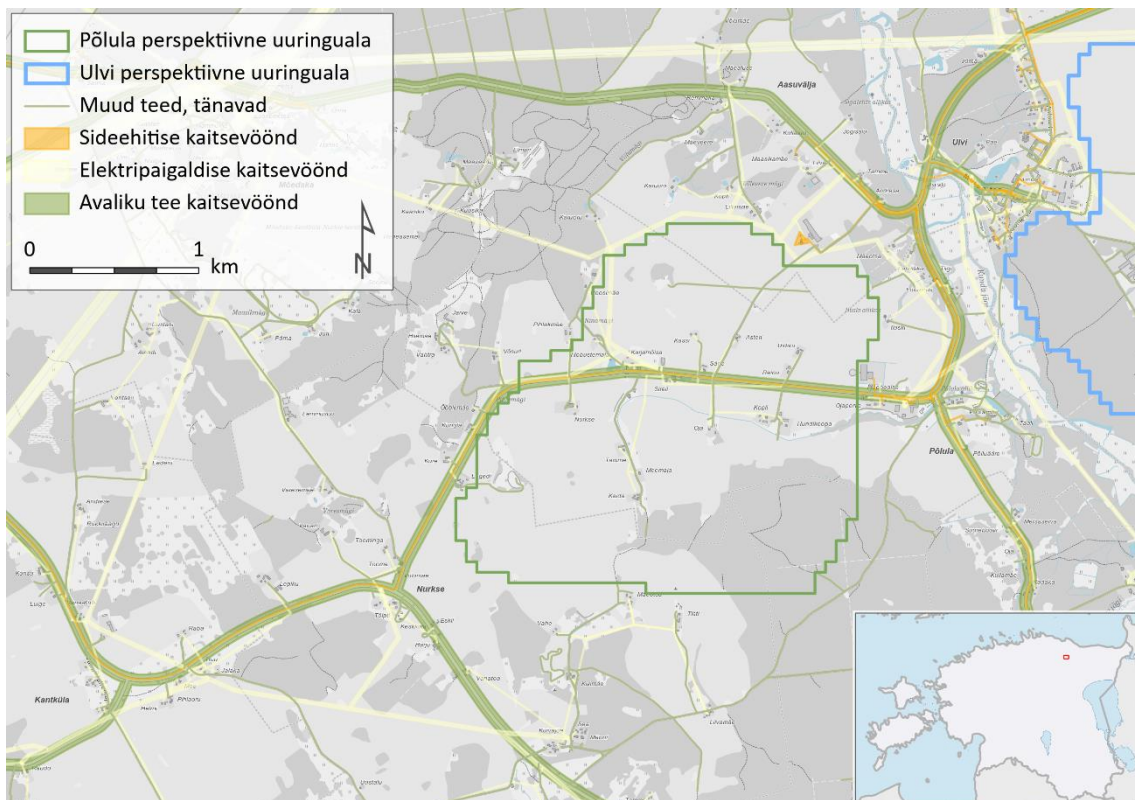
Lisa 4 joonis 4. Põlula perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad maakasutusega seotud piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).



Lisa 4 joonis 5. Põlula perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad sotsiaalsed väärtused koos väärtuslike põllumajandusmaadega (aluskaart: Maa-amet, 2022).

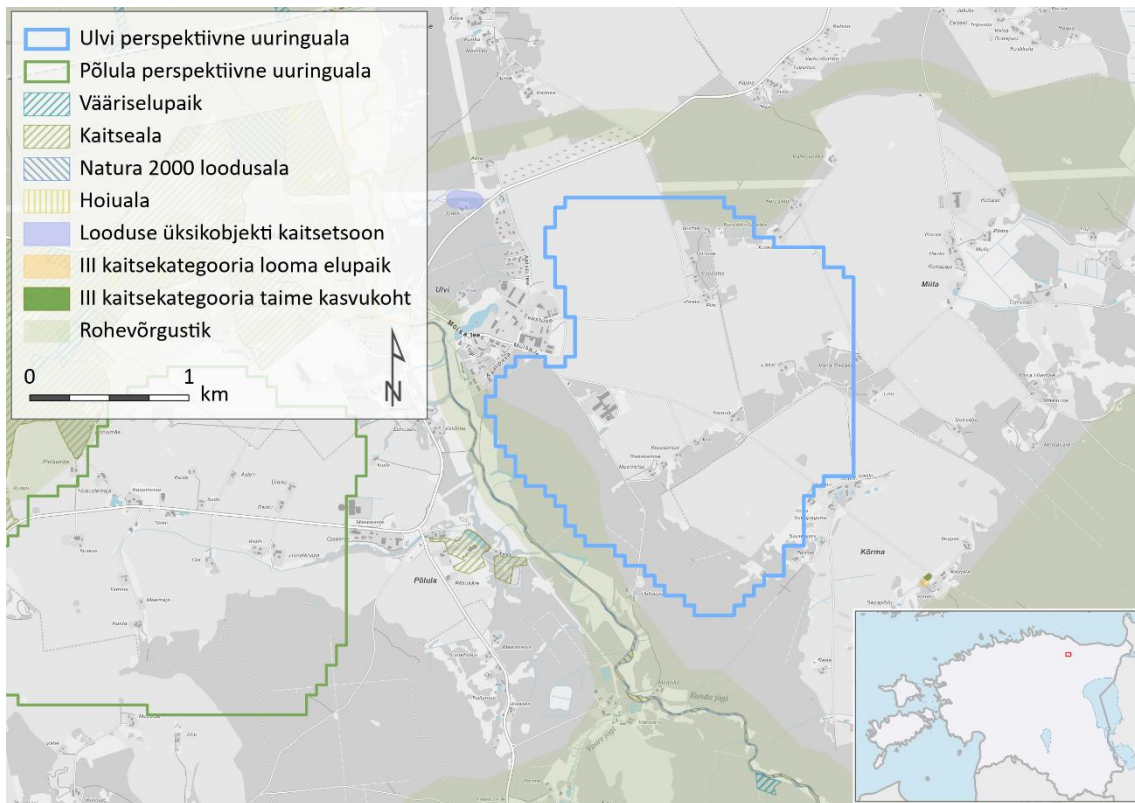


Lisa 4 joonis 6. Põlula perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad geoloogilised piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).



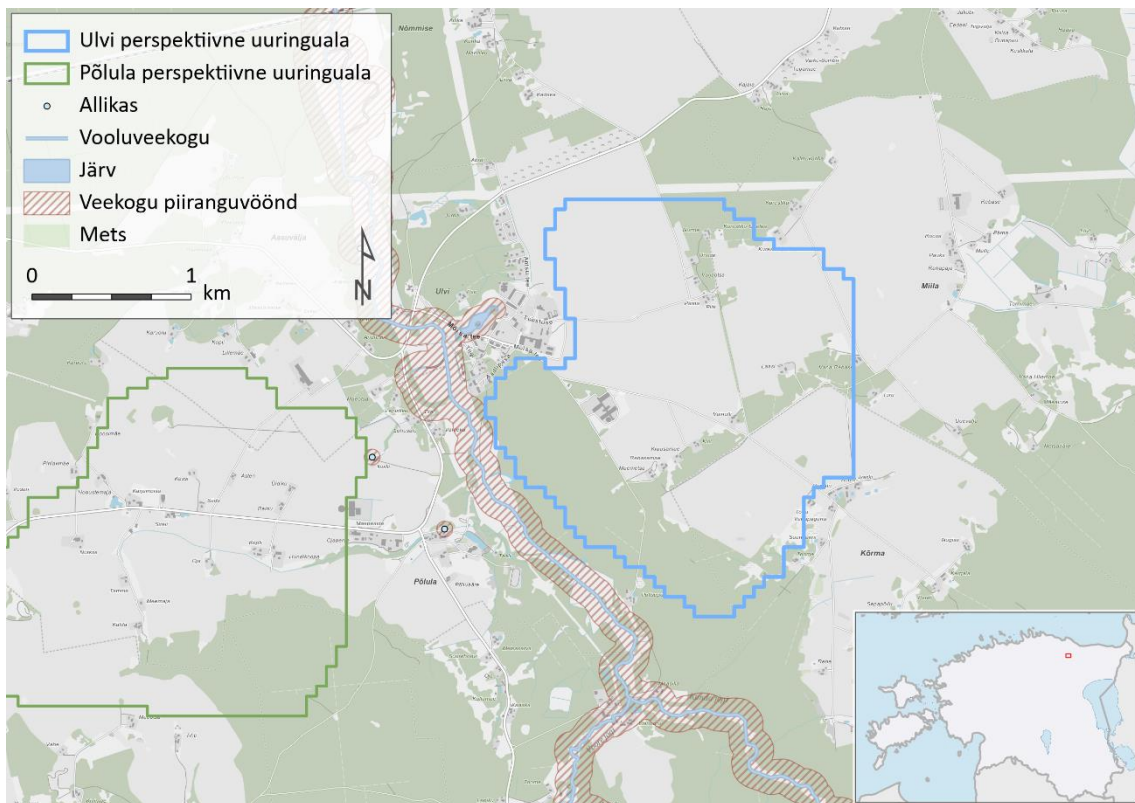
Lisa 4 joonis 7. Põlula perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad transpordialased ning tehnorajatiste piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).

## Lisa 5. Ulvi fosforiidi kaevandamise perspektiivse uuringuala piirangud

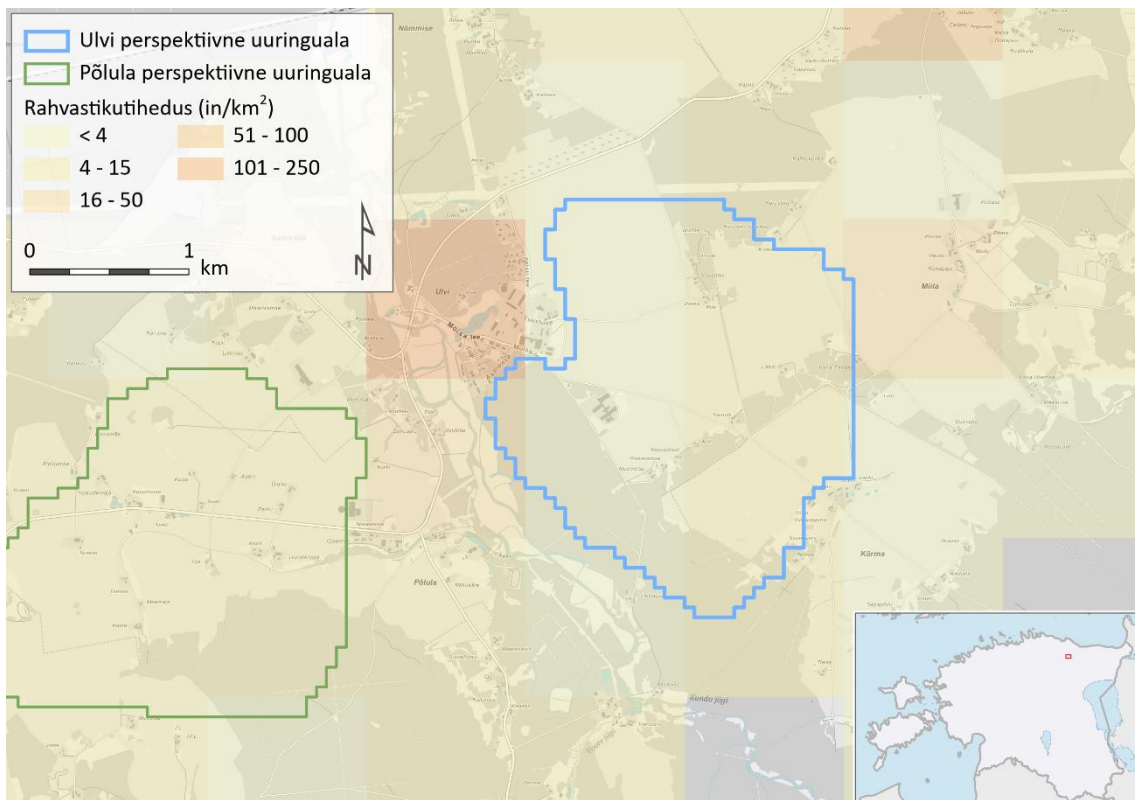


Lisa 5 joonis 1. Ulvi perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad looduskaitsetelised piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Looduskaitseteliste piirangute joonisel ei ole seadusest tulenevalt kuvatud I ja II kaitsekategooria liikide elupaiku, kasvukohti ning püsielupaiku (Looduskaitsetseadus, 2021).



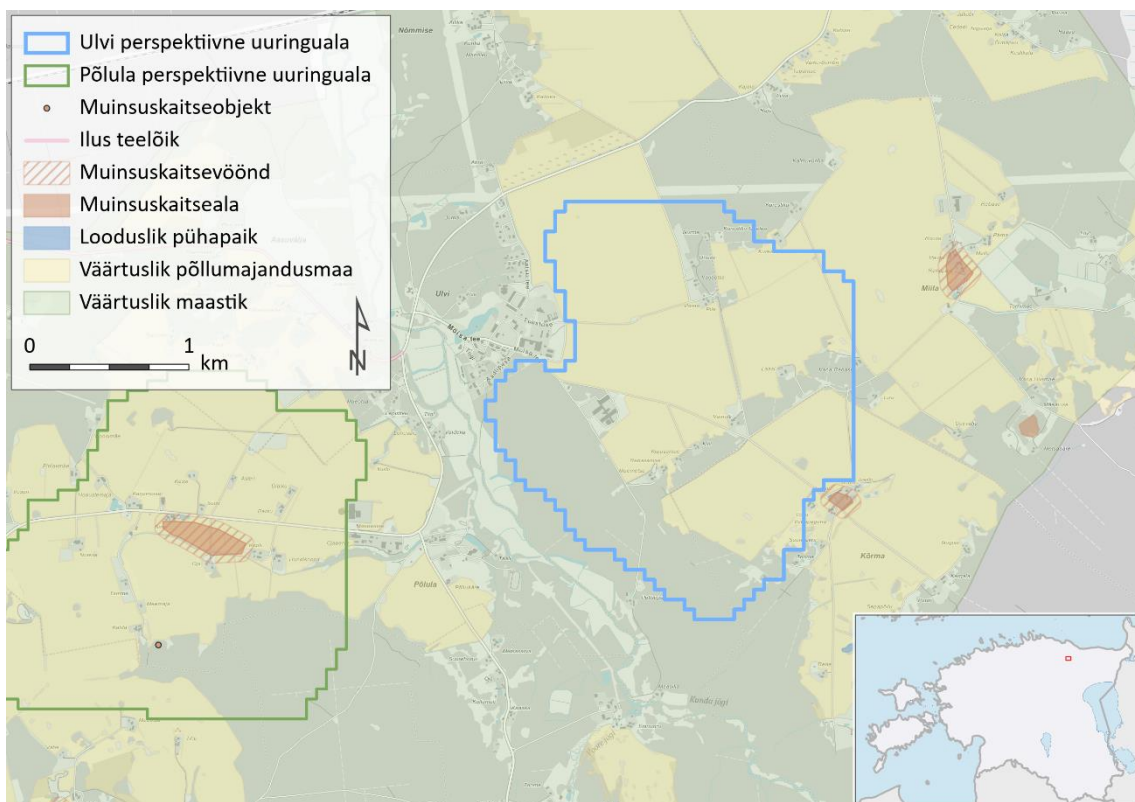
Lisa 5 joonis 2. Ulvi perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad looduslikud piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).



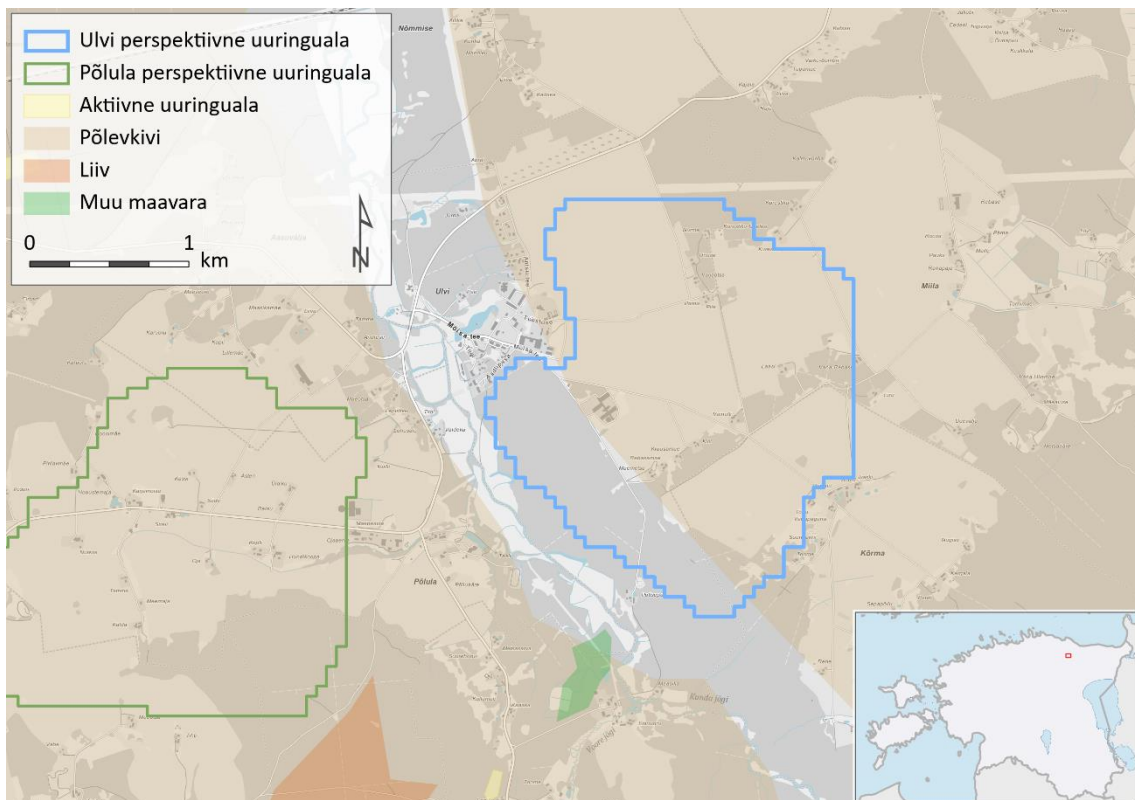
Lisa 5 joonis 3. Ulvi perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinev rahvastikutihedus (aluskaart: Maa-amet, 2022).



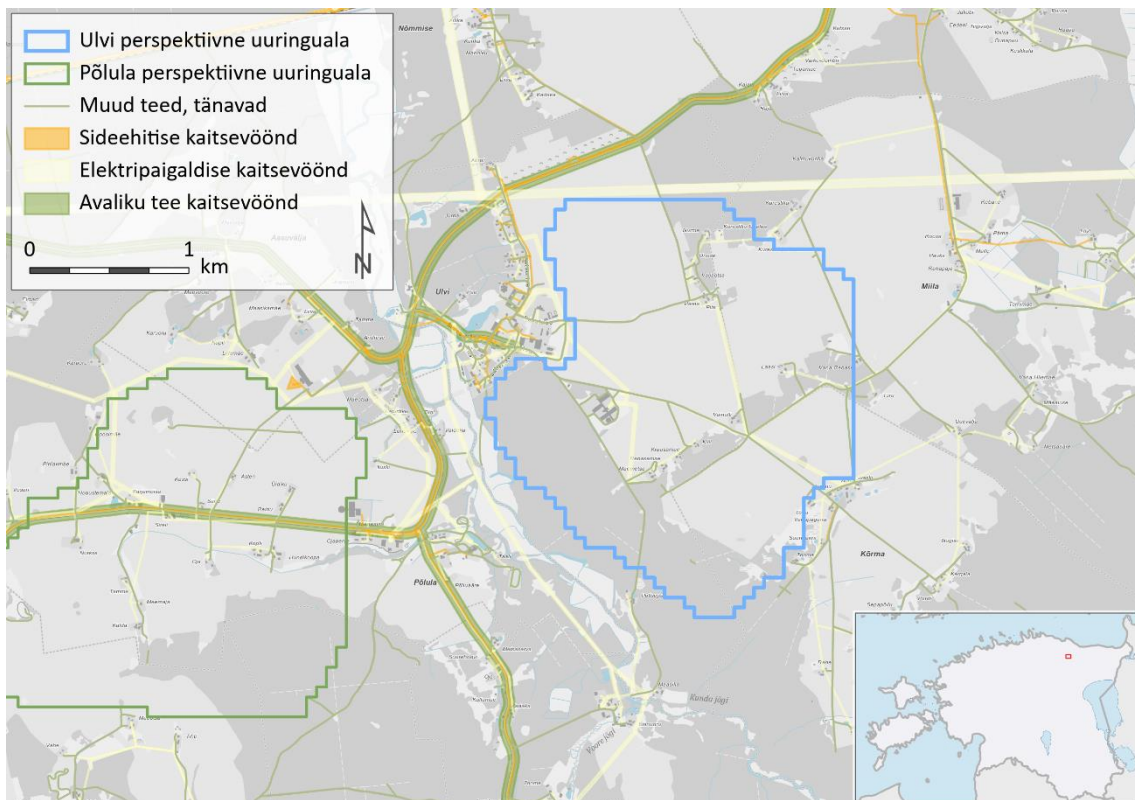
Lisa 5 joonis 4. Ulvi perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad maakasutusega seotud piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).



Lisa 5 joonis 5. Ulvi perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad sotsiaalsed väärtused koos väärtuslike põllumajandusmaadega (aluskaart: Maa-amet, 2022).



Lisa 5 joonis 6. Ulvi perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad geoloogilised piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).



Lisa 5 joonis 7. Ulvi perspektiivsel uuringualal ja selle ümbruses esinevad transpordialased ning tehnorajatiste piirangud (aluskaart: Maa-amet, 2022).

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

Mina, Karoliina Kurvits,

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

### **Eesti fosforiidi kaevandamise perspektiivsete uuringualade määratlemine ja analüüs,**

mille juhendaja on Tõnu Oja,

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.

*Karoliina Kurvits*  
**30.05.2022**