



EESTI
GEOLOOGIAATEENISTUS

Eesti riiklik kriitiliste toormete üldgeoloogiliste uurimistööde programm



RAKVERE 2025

Kaanefoto: Lähivõtte sulfiidsest mineralisatsioonist granaat-pürokseengneisis. Foto S. Nirgi

Eesti riiklik kriitiliste toormete üldgeoloogiliste uurimistööde programm

Töögrupi juht: Tiit Kaasik

Töögrupi liikmed: Tiit Kaasik, Kalle Kirsimäe, Johannes Vind, Tarmo All

Eesti Geoloogiateenistuse direktor: Sirli Sipp Kulli

Sisukord

Taust, vajadus ja seosed strateegiliste dokumentidega	5
1. Olemasolevad teadmised Eesti kriitiliste toormete esinemise ja leviku kohta ning nende otsingupotentsiaal	7
1.1. Eesti settelise aluspõhja geoloogiline ehitus ja kriitiliste toormete esinemise potentsiaal	7
1.2. Eesti kristalse aluskorra geoloogiline ehitus ja rööbistatavus Skandinaavia aluskorraga	11
1.2.1. Eesti kristalse aluskorra metallogenees.....	14
1.2.2. Maagistumispotentsiaal Eesti aluskorraga geoloogiliselt rööbistuvates Kesk-Rootsi ja Lõuna-Soome aluskorra vööndites	16
2. Programmi fookus.....	19
3. Programmi tegevuskava.....	22
3.1 Aluskorra kivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs	25
3.2 Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs.....	27
3.3 Teadmiste ja (suur)andmete analüüs ning süntees	29
3.4 Uuringupuuraukude rajamine uute potentsiaalselt maagistunud struktuuride kirjeldamiseks	30
3.5 Huvigruppide kaasamine ja avalikkuse informeerimine	31
4. Programmi elluviimine	32
5. Programmi ajakohastamine	32
Terminite selgitused	33
Kasutatud kirjandus	33
Lisad	37
Lisa 1. Programmi esimese viie aasta tegevuste koond	37

Taust, vajadus ja seosed strateegiliste dokumentidega

Programmi koostamise vajadus tuleneb Euroopa Liidu (EL) kriitilise tähtsusega toorainete määruse ((EU) 2024/1252) artiklist 19, mille punkti 1 kohaselt peavad kõik liikmesriigid 24. maiks 2025 koostama riikliku üldgeoloogiliste uurimistööde programmi, mis on suunatud kriitilise tähtsusega toorainete ja neid sisaldavate mineraalide otsingutele (vt Joonis 1). Määruses on selgitatud, et paljude ELi liikmesriikide, sh Eesti olemasolevad teadmised toorainete esinemise kohta pärinevad ajast, mil strateegiliste tehnoloogiate arendamiseks vajalike kriitilise tähtsusega toorainete varustuskindlus ei olnud prioriteet. Ajakohase geoloogilise teabe puudumine kriitilise tähtsusega toorainete kohta suurendab nende tarneriski ja seab ohtu siseturu toimimise. Seetõttu on vajalik koostada riiklikud programmid kriitilise tähtsusega toorainete ja neid sisaldavate mineraalide otsinguks, et saada ja ajakohastada kriitilise tähtsusega toorainete esinemist puudutavat teavet. Programmid võivad muuhulgas hõlmata geoloogilist kaardistamist, geokeemilisi uuringuid, geoteaduslikke uuringuid ja olemasolevate geoloogiliste andmekogude info täiendavat analüüsi. Uurimisprogrammides tuleb kaaluda ka uudsete meetodite kasutamist, mis võimaldavad suurendada uurimissügavust. Programmi tegevused ja loodav uus teadmine suurendab uute maardlate leidmise tõenäosust, mis omakorda peaks stimuleerima täiendavaid investeeringuid uurimistegevusse.



Joonis 1. ELi kriitilised ja strateegilised toormed.

Eesti maapõueuuringute kontekstis on kriitiliste toormete osas viimase kümnendi fookusesse tõusnud settelise aluspõhja maavarad karbifosforiit ja graptoliitargilliit kui vastavalt fosfori, haruldaste muldmetallide ja vanaadiumi võimalikud toormed. Samas on Eesti aluspõhja, sealhulgas aluskorra, potentsiaali uuritud ebapiisavalt värviliste metallide (Cu, Pb, Zn), akumetallide (Li, Co jt), haruldaste muldmetallide ning väärismetallide (Au, Ag, Pt-rühma elemendid) maagistumise esinemise osas ning nende maavarade võimalik majanduslik potentsiaal on teadmata.

Eesti Vabariigi Maapõuepoliitika põhialustes aastani 2050 (Keskkonnaministeerium, 2017) on sätestatud, et Eesti maapõue ja seal leiduvaid loodusvarasid uuritakse ning kasutatakse Eesti ühiskonnale võimalikult suurt väärtust looval moel, arvestades keskkonnavalasid, sotsiaalseid, majanduslikke, geoloogilisi ja julgeoleku aspekte. Samas dokumendis on sätestatud, et geoloogilise informatsiooni kogumiseks ja maapõueressursside kasutuselevõtuks ning maksimaalseks väärindamiseks vajalikke uurimistöid tehakse mahus ja suundades, mis vähemalt säilitavad ning hoiavad ajakohasena olemasoleva teadmusbaasi. Teadmusbaasi suurendatakse eelistatult majandusliku potentsiaaliga maapõueressursse iseloomustava teabega.

Maavarad, eriti kriitilised toormed, on tähtsad ja otseselt seotud Euroopa Liidu roheleppe, aga ka ÜRO säästva arengu eesmärkide (nälja kaotamise, jätkusuutliku energeetika, tööhõive ja majanduskasvu, säästva tootmise ja tarbimise) täitmisega ning „Eesti 2035“ arenguvajaduste valdkondadega (ettevõtluskeskkond, elurikkus ja keskkond).

Programmi koostamisel on oluliselt toetunud juba olemasolevale Eesti Geoloogiateenistuse Eesti kristalse aluskorra kivimite strateegiliste maavarade otsingute ja uuringute teekaardile (Eesti Geoloogiateenistus, 2023).

Käesoleva programmi eesmärk on tuvastada majandusliku potentsiaaliga kriitiliste toormete maagistumisvööndite ja struktuuride esinemine ja piiritleda potentsiaali omavates asukohtades võimalusel kriitiliste toormete leiukohad.

Programm on koostatud perspektiiviga aastani 2040 ja programmi detailsem tegevuskava on esitatud esimese viie aasta kohta aastani 2030.

1. Olemasolevad teadmised Eesti kriitiliste toormete esinemise ja leviku kohta ning nende otsingupotentsiaal

Geostruktuursetl asub Eesti Ida-Euroopa platvormi loodeosas Fennoskandia kilbi mattunud lõunanõlval ja selle geoloogilises ehituses on kolm kompleksi: kristalne aluskord, mis koosneb 1,5 kuni 1,9 miljardit aastat tagasi moodustunud moonde- ja tardkivimitest, setteline aluspõhi, mille liivakivid, savid ja erinevad karbonaatsed kivimid moodustusid ligikaudu 570 kuni 390 miljonit aastat tagasi ning viimaste jääaegade ja jäävaheaegade kujundatud pinnakate.

Eesti pinnakattesetendites ei ole teadaolevalt huvipakkuvaid kriitiliste toormete ilminguid, välja arvatud Fe-Mn konkretsioonide ilmingud Läänemeres (nt Soome laht, Väinameri). Need ei oma siiski praeguste teadmiste kohaselt majanduslikku potentsiaali.

Eesti aluspõhja setendites on huvipakkuvad kriitiliste toormete ilmingud (fosforiidi puhul maardlad) suuresti teada. Uute kriitiliste toormete leidmiseks üldgeoloogilistel otsingutel on suurima potentsiaaliga Eesti kristalne aluskord, mille senine uurituse tase on ebapiisav.

1.1. Eesti settelise aluspõhja geoloogiline ehitus ja kriitiliste toormete esinemise potentsiaal

Aluspõhjalise settekompleksi moodustavad Eestis Balti paleobasseini setendid. Balti paleobasseini settekompleksi moodustavad Neoproterosoikumi-Fanerosoikumi purdsetendid, karbonaadid ja vähemal määral evaporiidid. Settekompleksi läbilõige on kõige paksem (> 2000 m) ja stratigraafiliselt kõige täielikum basseini edelaosas. Samas basseini põhja- ja keskosas (Eestis, Põhja-Lätis ja Venemaa loodeosas) esinevad ainult Neoproterosoikumi Ediacara ja Alam-Paleosoikumi setendid (Nikishin et al., 1996).

Eesti alal moodustavad aluspõhjalise settekompleksi Ediacara kuni Devoni settekivimid. Aluspõhjaline settekompleks lasub kristasel aluskorral, mille pealispinna sügavus varieerub u 100 meetrist Põhja-Eestis kuni 600 meetrini Pärnu-Võru joonel. Aluskorra pealispind on tugevalt kulutatud ja keskmiselt 3 m/km lõunasuunalise kallakusega. Edela-Eestis kasvab aluskorra pealispinna ja aluspõhjasetendite kallakus >5 m/km. Eesti-Läti piiril, Mõniste piirkonnas asub ca 200 km pikkune ja 30 km laiune Valmiera-Lokno kerkeala, kus aluskorra pealispind tõuseb enam kui 200 m kõrgemale.

Kriitiliste toormete seisukohalt on aluspõhja settekompleksidest kõrgeima perspektiiviga Kallavere kihistu karbifosforiit ja sellel lasuv Türisalu kihistu mustade kiltade kompleks – graptolliitargilliit. Fosforiit (ja fosfor) on ELi kriitiliste toormete nimistus ning valdavas osas kaetakse EL fosforiiditoorme

vajadus imporditava fosforiiditoorme ning sellest valmistatud toodanguga, kuid samas on ka ELi enda geoloogilised varud piiratud.

Fosforiit ja haruldased muldmetallid

Eestis paiknevad ELi ühed suurimad fosforiidivarud, mis on geoloogiliselt hästi uuritud. Põhja-Eestis on fosforiidikihi levikuala eraldatud neljaks maardlaks: Rakvere, Toolse, Tsitre ja Aseri. Neist suurimad on Rakvere ja Toolse maardlad, mille varudeks on hinnatud Rakvere maardla piirkonnas vähemalt 4% P_2O_5 sisaldusega varuna 1938 Mt, keskmise P_2O_5 sisaldusega 11,4%; Toolse maardlas on vähemalt 4% P_2O_5 sisaldusega varu 644 Mt, keskmise P_2O_5 sisaldusega 9,0% (Maavarade register, 2025).

Eesti karbifosforiiti on samuti käsitletud võimaliku kaasneva haruldaste muldmetallide toormena. Keskmised haruldaste muldmetallide sisaldused Toolse, Aseri ja Rakvere maardlates olid vastavalt 364, 340 ja 262 mg/kg, mis on eraldiseisvate haruldaste muldmetallide maakide kontekstis madalad sisaldused, aga võivad siiski omada potentsiaali fosforiga koosväärimisel (Joosu et al., 2023). Samas varieeruvad haruldaste muldmetallide sisaldused fosforiidis suurtes piirides (100–900 mg/kg). Toolse ja Aseri maardlates suurenevad haruldaste muldmetallide sisaldused koos fosfori sisalduse kasvuga. Rakvere maardla fosforiitides ei kasva haruldaste muldmetallide sisaldused reeglina üle 300 mg/kg ning ei suurene toorme rikastamisel koos P_2O_5 sisaldusega. See tähendab, et suurima fosforiidivaru, Rakvere maardla fosforiidi rikastamisel ei ole oodata ka haruldaste muldmetallide sisalduse kasvamist ja nende väärimisel selle maardla puhul potentsiaali ei ole (Lumiste et al., 2025).

Graptoliitargilliit

Karbifosforiidil lasuvas Türisalu kihistu graptoliitargilliidis on ELi kriitiliste toormete nimistu elementidest vanaadium, mille keskmine sisaldus fosforiidi maardlate levialal esinevas graptoliitargilliidis on 957 mg/kg. Arvestades selle ala Türisalu kihistu väikest paksust (ca 1,5 m), on siiski tegemist piiratud ressursiga, mille iseseisev maavarana kasutuselevõtmine ei ole majanduslikult otstarbekas. Lääne- ja Loode-Eestis küünib Türisalu kihistu paksus siiski rohkem kui nelja meetrini ning sealne graptoliitargilliidi vanaadiumi koguressurss on oluliselt suurem. Vanaadiumile lisaks sisaldab graptoliitargilliit kõrgendatud kontsentratsioonis ka uraani ja molübdeeni. Seega on terve Eesti ala lõikes tegemist suure tonnaažiga, kuid madalakvaliteetse strateegilisi metalle sisaldava ressursiga. Kuigi nende metallide leviku seaduspärasusi ja metallogeneesi mudeleid graptoliitargilliidis on täpsustatud rea hiljutiste uuringutega, siis arvestades, et tegemist on mittekonventsionaalse metallimaagi lasundiga, ei ole senini piisavalt teavet rikastunud metallide kandjate osas. Ka on

graptoliitargilliidi puhul kaardistatud Zn ja Pb rikastumispiirkonnad, kuid selgitamist nõuab vastavate ilmingute detailsem levik, sealhulgas potentsiaalne seos Zn-Pb maagistumise ilmingutega karbonaatsetes kompleksides. Graptoliitargilliit on kujunemiselt ja koostiselt võrreldav Rootsis leviva Alum Shale'i kompleksiga, mille käimasolevad ressursiuuringud on keskendunud Vikeni ja Tåsjö uuringualadele. Laiemas pildis on graptoliitargilliidi kasutuselevõtmise raskuskohtadeks madalad kasulike elementide sisaldused ja majanduslikult mõistliku väärindamise tehnoloogia puudumine, mille osas on põhjendatud teadusuuringute jätkamine.

Fosforiidi ja kaasnevate ressursside uuringud

Fosforiidi ja kaasnevate ressursside (haruldased muldmetallid fosforiidis, graptoliitargilliit ja glaukoniitliivakivi) uuringud on Eesti Geoloogiateenistuses (EGT) töös olnud selle moodustamisest 2018. aastal ja Eesti ülikoolides ka varasemalt. Aastatel 2020-2022 teostas EGT fosforiidi ja kaasnevate ressursside uuringu, mille põhifookuses olid ajaloolised andmed. Projekti peamine eesmärk oli hinnata fosforiidi ja kaasnevate ressursside majanduslikku potentsiaali ning valmistada ette materjalid jätku-uuringuteks. Töö käigus digiteeriti vanad fosforiidi uuringute aruanded, mille põhjal loodi andmebaas, mis sisaldab üle 6000 puuraugu ja üle 21 000 keemilise analüüsi. Loodud andmebaasi põhjal koostati fosforiidi ruumimudel Toolse ja Rakvere maardlatest. Ajalooliste andmete valideerimiseks puuriti ka 37 uut puurauku Toolse, Rakvere ja Aseri maardlate ümbruses. Saadud puursüdamikke analüüsiti põhjalikult erinevate geokeemiliste ja -tehniliste meetoditega. Saadud tulemustest võib järeldada, et ajalooliste andmete kvaliteet on üldiselt hea. Tuginedes loodud andmestikule, teostati ruumianalüüs, et leida võimalikud perspektiivsed uuringualad järgnevateks uuringuteks. Alade valiku kriteeriumideks olid eelkõige geoloogilise varu suurus ja kvaliteet, kuid samuti võeti arvesse asukohta asustatud piirkondade suhtes ning esialgseid hinnanguid keskkonnamõju osas. Analüüsi tulemusena on tõenäoliselt väiksemad tehnoloogilised riskid ja sotsiaalsed vastuolud laiendatud Aru-Lõuna alal, mis suures osas kattub olemasoleva Aru-Lõuna lubjakivikarjääriga. Selle ala üheks nõrkuseks on aga suhteliselt väiksem varu.

Teostatud uuringud löid tugeva baasi fosforiidi ja kaasnevate ressursside detailsemaks uurimiseks. Vabariigi Valitsuse juures tegutsev Teadus- ja Arendusnõukogu otsustas 2022. aasta sügisel toetada geoloogiateenistuse edasisi teadus-arendusuuringuid 6,1 miljoni euroga. Aastatel 2023–2026 toimuvate uuringute eesmärgiks on saada täpsem ülevaade Eesti fosforiidi ja kaasnevate ressursside majanduslikust potentsiaalist ning elu- ja looduskeskkonna mõjudest. Soovitakse leida vastuseid küsimustele, kuidas on tehnoloogiliselt võimalik eraldada fosforiidist haruldasi muldmetalle ning mustast kildast vanaadiumit ja milliseid lõpptooteid on fosforist otstarbekas toota. Tehnoloogiliste uuringute käigus kaardistatakse tekkivaid keskkonnamõjusid ning hinnatakse majanduslikku

perspektiivi, samuti teostatakse ka parima tehnoloogia skaleerimise katsetused. Kuna fosforiidi väärindamine on otseselt sõltuv lähtematerjali omadustest, on kavas detailselt analüüsida Aru-Lõuna uuringualal leviva fosforiidilasundi mäetehnilisi ja geokeemilisi omadusi. Samuti on kavas täiendada hüdrogeoloogilist mudelit, mille abil on võimalik täpsemalt hinnata võimaliku kaevandamise mõju põhjaveele. Uuringu käimasoleva etapi tulemused avalikustatakse 2026. aasta II kvartali lõpus pärast mida saab teha otsuseid, kas ja kuidas nende toormete kasutuselevõtmisega edasi liikuda.

Polümetalse maagistumise ilmingud

Kõrvuti karbifosforiidi ja sellega kaasnevate potentsiaalsete maavaradega on Eesti settelises aluspõhjas juba vähemalt üle-eelmisest sajandist tuntud polümetalse maagistumise ilmingud.

Seni teadaolevalt on peamised settelise aluspõhja hüdrotermaalsed ilmingud tuntud Virumaal Haljala(-Vanamõisa)-Uljaste-Sonda piirkonnas ja Hiiumaal Kärkla kraatri vallidel. Enam tuntud hüdrotermaalse sulfiidse maagistumise leiud esinevad Siluri karbonaatkivimites kontaktil Kesk-Devoni setenditega Viljandimaal Navesti-Võhma piirkonnas, Jõgevamaal Oostriku ja Kalana piirkonnas ning Laeva piirkonnas Tartumaal. Nimetatutest kaks kõige massiivsemat teadaolevat hüdrotermaalse maagistumise ilmingut on Kärkla kraatrivallist kirdes ja läänes paiknev Zn-Pb maagistumine lõhelistes karbonaatkivimites ja Haljala-Uljaste-Sonda piirkonna Zn-Pb (Cu-Mo-Ag) maagistumine Ediacara liivakivides (Petersell et al., 1991). Nende maagistumisilmingute levik ja teke ning seosed suuremaskaalaliste geoloogiliste protsessidega ei ole selged. Enamasti on tegemist hajusa mineralisatsiooniga ning massiivset hüdrotermaalset sulfiidset mineralisatsiooni esineb harva. Suurem osa rikkalikumatest ja esinduslikumatest ilmingutest on omased karstunud kirde-edela suunalistele rikketsoonidele, mis lõikavad Ordoviitsiumi-Siluri karbonaatset läbilõiget ja samuti Haljala-Vanamõisa ja Uljaste-Sonda sulfiidse mineralisatsiooni alal murenenud aluskorral lasuvatele Ediacara liivakividele, kus mineralisatsioon esineb laigulise liivakivide tsementatsioonina.

Aluspõhja karbonaatsete kivimite sulfiidse maagistumise uuringud (Eensaar, 2017a,b, Gaškov, 2017) näitavad, et karbonaatkivimites levinud kaltsiidi-sfaleriidi-galenii hüdrotermaalne sulfiidistumine on seotud kõrge soolsuse (>20%) ja mõõduka temperatuuriga (60 kuni 200 °C) fluidisündmus(t)ega, mis on liikunud mööda rikkevööndeid ligikaudu 400 miljonit aastat tagasi, samal ajal, kui Skandinaavias kujunes Kaledoonia mäeahelik. Nende Eesti settelise aluspõhja rikkevööndites liikunud hüdrotermaalsete fluidide ja polümetalse mineralisatsiooni iseloom on olemuselt sarnane nn Mississippi Valley Type (MVT) maagistumiskeskondadega, mis moodustavad suurimaid teadaolevaid Pb-Zn maardlaid maailmas (Leach et al., 2010). Kuigi senini teadaolevad Eesti settelise aluspõhja sulfiidse maagistumise ilmingud (nt Haljala-Vanamõisa, Navesti-Võhma, Laeva ja Kärkla) on lokaalse

ruumilise levikuga ning ei oma otsest majanduslikku perspektiivi, on nende ilmingute genees ja geotektooniline taust sarnane nn MVT maagistumisele, mis võib tähendada, et sulfiidse maagistumise potentsiaal Balti paleobasseinis ei ole veel lõpuni selge ja väärrib täiendavat tähelepanu teadusuuringute näol.

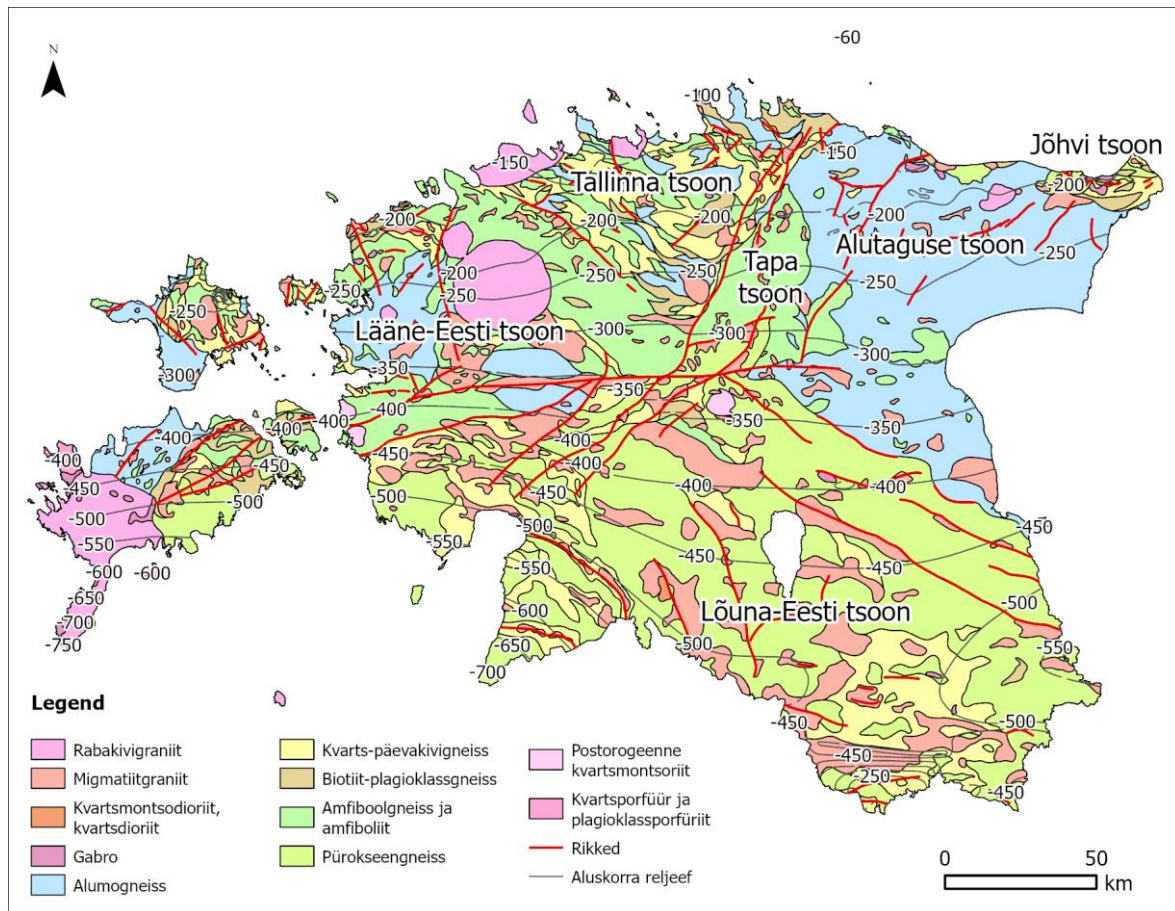
Dolokivi kui magneesiumitoore

Potentsiaalselt on Eesti aluspõhja sette kivimite kompleksis leiduvate dolokivide näol tegemist võimaliku magneesiumitoormega. Dolokivid koosnevad, nagu nimi viitab, mineraalist nimega dolomiit, mis on kaltsium-magneesium-karbonaatne mineraal. Metalliline magneesium on ELi nimistus toodud kui kõrge varustuskindluse ja suure majandusliku mõjuga ressurss. Metallilise kujul magneesium on nii ELi kriitiliste kui ka strateegiliste toorainete nimekirjas. Siiski tuleb arvestada, et kõik tuntud magneesiumi tootmise protsessid on energiamahukad, nt maailmas kõige enam kasutatava Pidgeoni protsessis (termiline reduktsioon) on energiakulu 366 MJ ühe kilogrammi magneesiumi kohta. Samuti on protsessid kõrge CO₂ intensiivsusega – sõltuvalt konkreetsest tehnoloogiast emiteeritakse karbonaatse toorme puhul ühe kilogrammi metallilise magneesiumi saamiseks karbonaatide lagunemisel ca 4 kilogrammi CO₂, seda eeldusel, et tegemist on ideaalse dolomiidiga ehk siis dolomiidiga, kus magneesiumi ja kaltsiumi moolisuhe on 1:1 (magneesiumi sisaldus ca 13% massi järgi). Eestis teadaolevalt nii puhast dolomiiti ei leidu. Väiksema magneesiumisisalduse puhul on suurem osakaal kaltsiumil ning termilisel töötlemisel laguneb lisaks magneesiumkarbonaadile ka kaltsiumkarbonaat, mis suurendab CO₂ heidet. Karbonaatide lagunemisest tingitud heitele lisandub veel ka termilise töötlemise jaoks vajaliku energia tootmisel (lagunemise temperatuurid 800-1000 C) emiteeritav CO₂, mille kogus sõltub otseselt kasutatavast tehnoloogiast. Seega ei ole magneesiumi tootmine Eesti dolomiidist olemasolevate tehnoloogiatega majanduslikult ega ka keskkonnakaitseliselt otstarbekas. Samas on olemasolev geoloogiline info kõrgema magneesiumisisaldusega dolokivide kohta võrdlemisi hea ja sobivate tehnoloogiate tekkimisel on võimalik nende kasutuspotentsiaali uuesti hinnata.

1.2. Eesti kristalse aluskorra geoloogiline ehitus ja rööbistatavus Skandinaavia aluskorraga

Paleo- ja Mesoproterosoikumi vanuseline Eesti kristalne aluskord (1,93–1,54 mld aastat; Kirs *et al.*, 2009, Rämö *et al.*, 1996) koosneb põhiosas orogeensetest Svekofenni moonde- ja tardkivimitest ning Svekofenni moondekompleksi lõikavatest anorogeensetest rabakivigraniitide plutoonidest (Puura *et al.*, 1996). Kristalse aluskorra kulutuspiind lasub Põhja-Eestis alates umbes 100 meetri ning Lõuna- ja

Edela-Eestis umbes 600 meetri sügavusel, olles lõuna suunas 3 m/km kaldu (Joonis 2). Aluskorral lasuvad Neoproterosoikumi ja Paleosoikumi setendid: liivakivid, savid ja karbonaatkivimid.



Joonis 2. Kristalse aluskorra kaart ja pealispinna absoluutkõrgus (Koppelmaa, 2002)

Kristalne aluskord koosneb kahest suurest üksusest: Põhja- ja Kirde-Eestis domineerivad amfiboliitse faatsiese migmatiseerunud moondekivimid ning Lõuna- ja Lääne-Eestis granuliitse faatsiese moondekivimid (Puura *et al.*, 1996; Soesoo *et al.*, 2004). Aluskorda läbivad loode- ja läänesuunalised deformatsioonivööndid, millest olulisim on umbes 30 km laiune loodesuunaline Paldiski-Pihkva deformatsioonivöönd (PPDZ), mis eraldab mainitud üksuseid.

Üksused jagunevad omakorda petrooloogiliste ja geofüüsikaliste tunnuste alusel kuueks tsooniks: Tallinna, Tapa, Alutaguse, Jõhvi, Lääne-Eesti ja Lõuna-Eesti.

Tallinna tsoon koosneb amfiboliitse faatsiese gneissidest ja metasetetest (amfibooligneissid, biotiit-plagioklassigneissid, kvarts-päevakivigneissid, vilgugneissid ning sulfiidised grafiitgneissid ja magnetiitgneissid). Tapa tsooni iseloomustavad granaat- ja pürokseenkvartsiidid, Al-rikkad gneissid (granaat-kordieriit-sillimaniit) ning pürokseen-, amfibool- ja biotiitgneissid, mis on kõrgenenud Fe- ja S-sisaldusega. Alutaguse tsooni iseloomustavad peamiselt metasettelised Al-rikkad gneissid ja biotiit-

plagioklassgneisid ning amfiboliitse faatsiese küünekivigneisid, amfiboliidid ja kvarts-päevakivigneisid. Jõhvi tsoonis levivad peamiselt migmatiseerunud pürokseen-, kvarts-päevakivi-, biotiit-plagioklass-, amfibool- ja granaat-kordieriidigneisid. Jõhvi magnetanomaalia alale on omased anomaaliat põhjustavad magnetiidigneisid. Lääne-Eesti tsoonile on iseloomulikud peamiselt metasettelised amfiboliidid, biotiit-plagioklassgneisid ja amfiboliitse kuni granuliitse faatsiese kvarts-päevakivigneisid. Lõuna-Eesti tsooni iseloomustavad tüüpiliselt granuliitse moondefaatsise metavulkaanilised moondekivimid, mille põhilisteks kivimiteks on amfiboolpürokseeniit ja biotiit-pürokseengneisid koos kvarts-päevakivigneissidega.

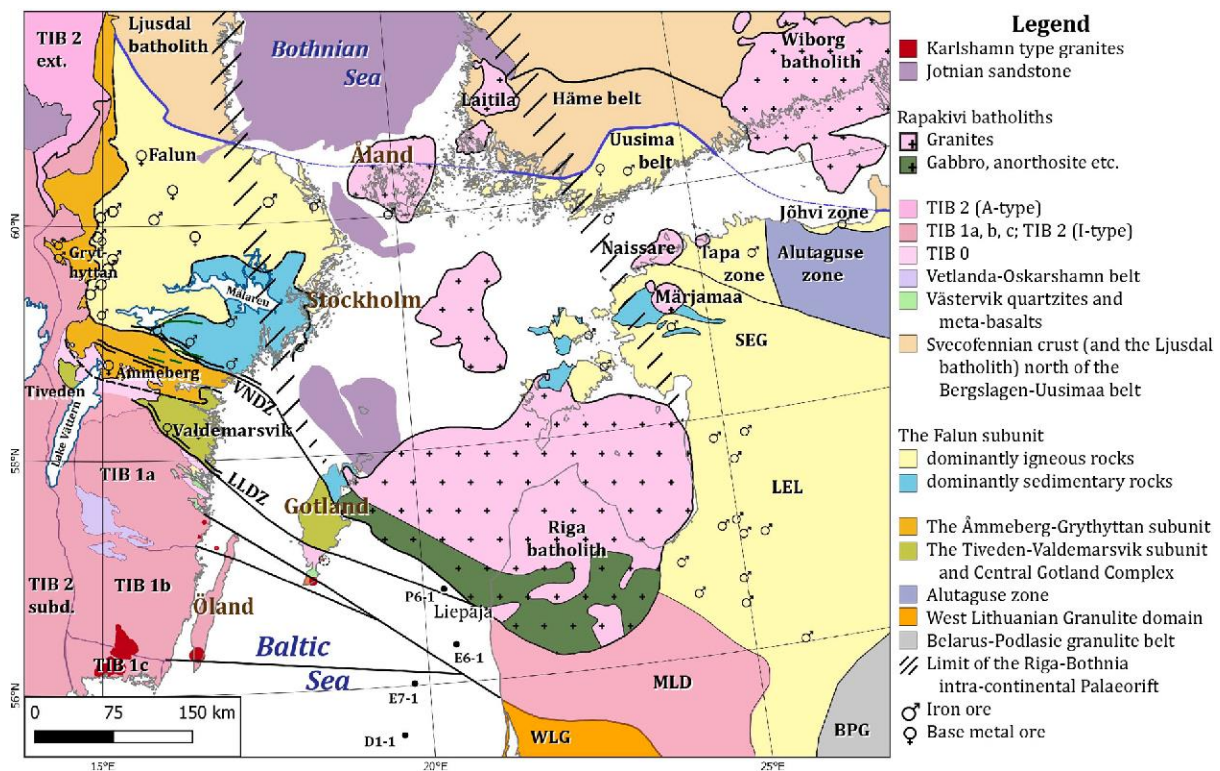
Moondekivimite komplekside vanus on 1,9–1,8 mld aastat (Kirs *et al.*, 2009; Soesoo *et al.*, 2006). Vanimad on arvatavasti Alutaguse vööndi kivimid (1,90–1,88 mld aastat). Lõuna-Eesti granuliitse faatsiese moondekivimite moonde vanused on 1,84–1,80 mld aastat. Teadaolevate šoõniitsete Muhu, Virtsu ja Taadikvere plutoonide vanused on umbes 1,83 mld aastat (Kirs *et al.*, 2009). Noorima osa kristalsest aluskorrast moodustavad Fennoskandia rabakivide provintsi kuuluvad rabakivide plutoonid, mis moodustusid 1,67–1,62 mld (Märjamaa, Neeme, Ereda, Naissaare ja Taebla) ning 1,59–1,54 (Riia) mld aastat tagasi (Rämö *et al.*, 1996).

Struktuuriliselt peetakse Eesti kristalset aluskorda samastuvaks Fennoskandia kilbi Svekofenni kompleksiga (Huhma *et al.*, 1991). Kompleks koosneb orogeensete vööndite ja mikrokontinentide mosaiigist (Lahtinen *et al.*, 2005; Bogdanova *et al.*, 2006; 2008; 2015; Korja *et al.*, 2006). Orogeensete vööndite vanused vähenevad Karjala-Koola Arhaikumivanuselisest tuumast väljapoole lõuna- ja läänesuunas.

Eesti kristalse aluskorra moondekivimid on petrooloogiliselt, geokeemiliselt ja vanuseliselt rööbistatavad Lõuna- ja Lääne-Soome ning Kesk-Rootsi aluskorra kivimitega (Bogdanova *et al.*, 2015). Tallinna tsoon moodustab suure tõenäosusega sama vööndi Soome Uusimaa kristalse aluskorra plokiga (Kähkönen, 2005) ning sama vööndiga on seostatavad ka Jõhvi tsooni Fe- ja S-rikkad moondekivid. Valdavalt metasetetest koosneva Alutaguse tsooni setendid (turbidiidid) moodustusid arvatavasti saarkaarte taguses basseinis, mis ulatus praeguse Loode-Venemaa Laadoga järveni. Lääne-Eesti tsoonis domineerivad metasettelised amfiboliitse kuni granuliitse faatsiese moondekivimid ja Lõuna-Eesti granuliitse faatsiese metavulkaniidid sarnanevad Kesk-Rootsi Bergslageni domeeni lõunaosas levivate kivimitega.

Sundblad *et al.* (2021) tõlgenduse alusel moodustavad Bergslagen, Uusimaa/Põhja-Eesti ja Lõuna-Eesti (viimane on osa nn Liivimaa megadomeenist koos Ida-Läti ja Leeduga) loode-kagu suunalise petrooloogiliselt ja geokronoloogiliselt seotud tektooniliste domeenide vööndi mõlemal pool Läänemerd (Joonis 3). Nii Tallinna kui Jõhvi tsooni magnetiidigneisside ja sulfiidide maagistumise vasted

esinevad Uusimaa tsoonis Lõuna-Soomes. Sarnaselt Lõuna-Soomes levivatele moondekivimitele (Kurhila *et al.*, 2011) on ka Põhja-Eesti kivimid tugevalt migmatiseerunud. Nii Uusimaa kui ka Põhja-Eesti struktuursed tsoonid sarnanevad Bergslageni piirkonnale Lõuna-Kesk-Rootsis, mida iseloomustavad 1,91–1,89 mld aasta vanused vulkaaniliste ja subvulkaaniliste kivimitega seotud Fe-kvartsiidid ja sulfiidne maagistumine koos hajutatud metakarbonaatide ja skarnistumisega. Alutaguse metaturbidiitide tsoon on seevastu rööbistatav samalaadsete setenditega Novgorodi domeenil, mis on struktuuriselt omakorda rööbistatavad Fennoskandias Botnia domeeni ja Lõuna-Kesk-Soomega.



Joonis 3. Eelkambriumi geoloogiline kaart Läänemere põhjaosast (Sundblad *et al.*, 2021) BPG – *Belarus-Podlasie granulite belt* (Valgevene-Podlaasia granulitiitne vöönd), LEL – *Latvian-East Lithuanian domain* (Läti ja Ida-Leedu domeen), MLD – *Mid-Lithuanian domain* (Kesk-Leedu domeen), SEG – *South Estonian domain* (Lõuna-Eesti domeen), WLG – *West Lithuanian domain* (Lääne-Leedu domeen), TIB – *Transscandinavian Igneous Belt* (Transkandinaavia magmakivimite vöönd) (Bergman *et al.*, 2012; Bogdanova *et al.*, 2015; Grigelis ja Puura, 1978; Koistinen, 1994; Salin *et al.*, 2019). Sinine joon tähistab Bergslageni regiooni (kollane ala Rootsi territooriumil) põhjapoolset piiri ning selle jätkumist Uusimaa vööndis ning Jõhvi tsoonis. LLDZ – Linköping-Lofthammari deformatsiooni tsoon, VNDZ – Vingåker-Nyköpingi deformatsiooni tsoon (Stephens ja Wahlgren, 1993)

1.2.1. Eesti kristalse aluskorra metallogenees

Eesti kristalse aluskorra geoloogia ning selle maavarade potentsiaali uurimise ajalugu ulatub eelmise sajandi esimesse poolde, kui puuriti esimesed sügavad otsingupuuraugud Jõhvi Magnetilise Anomaalia (JMA) piirkonna magnetiitgneissidesse. Süstemaatilised geoloogilised otsingud kristalsetes kivimites käivitusid 1960ndatel aastatel Põhja-Eestis, millega kaasnes gravimeetriline ja magnetomeetriline

kaardistamine mõõtkavas 1 : 50 000 (osaliselt ka 1 : 25 000) kuni 1 : 200 000. 1991. aastal kristalse aluskorra maavarade otsingutööd katkesid ning taastusid alles 2018. aastal seoses Eesti Geoloogiateenistuse poolt läbi viidud JMA uuringutega. Aastatel 2020–2023 viidi läbi Jõhvi ja Uljaste piirkonna sulfiidse maagistumise uuringud ResTA programmi „Potentsiaalselt kasulikud komponendid ja maagistumise genees Eelkambriumi kivimite polümetalse maagistumise ilmingutes“ raames.

Teadaolevatest kristalse aluskorra maagistumisnähtustest on olulisimad Mn-rikkad magnetiitgneisid, magnetiit-püriit-pürroitiini mineralisatsioon Al-gneissides koos sulfiidse mineralisatsiooniga grafiitgneissides, samuti haruldaste muldmetallide mineraliseerumine anortosiit-rabakivides.

Neist ulatuslikem ja kõige enam uuritud on JMA-d põhjustav raua mineralisatsioon (Mn-rikkad magnetiitgneisid) Jõhvi tsoonis. Sarnane, aga oluliselt piiratuma ulatusega rauamineralisatsioon levib ka Tallinna tsoonis, olles avatud Sakusaare ning Munalaskme puursüdamikega. JMA geoloogilist ehitust ja võimalikku majanduslikku perspektiivi on uuritud erinevatel perioodidel alates 1930ndatest aastatest, sh viidi viimane uuring kaldpuuraukudega läbi aastatel 2018–2022 (Nirgi *et al.*, 2022). Seniste uuringute tulemused ei ole andnud alust rauamaagi kaevandamise planeerimiseks, kuna võrreldes Põhja-Euroopas tegutsevate kaevandustega on tuvastatud rauasisaldus madalam ja lasuvussügavus suur. Lisaks rauale leiti JMAs kaasaagsete uurimismeetoditega mitmeid teisi olulisi mineralisatsiooniilminguid. Näiteks leiti kõrgeenenud arseeni ja volframi sisaldused, mida kannab arsenopüriidi (FeAs), löllingiidi (FeAs₂) ja šeeliidi (CaWO₄) mineralisatsioon, samuti avastati puursüdamikes eheda vismuti-telluuri (Bi-Te) ja hõbeda-kulla (Ag-Au) ilmingud. Nende ilmingute leviku ja võimaliku majandusliku potentsiaali täpsemaks selgitamiseks on põhjendatud uuringute jätkamine.

Sulfiidse mineralisatsiooni suurim potentsiaal on senistel hinnangutel Tallinna ja Alutaguse tsoonides, kus levivad grafiiti sisaldavad gneisid, grafiitkildad ja kvartsiidid. Nendes kivimites esinevate sulfiidsete faaside (pürroitiin, püriit, kalkopüriit, sfaleriit ja galeniit) teadaolevad Cu sisaldused ulatuvad 3000 ppm ja Zn sisaldused üle 10000 ppm tasemele. Nende kivimite grafiidisaldus ulatub 10-15%-ni. Sulfiidsetes grafiitkiltades ulatuvad Au sisaldused 1 ppm-i tasemele, kuid enamasti on sisaldused foonilised. Haruldaste muldmetallide kõrgeenenud sisaldused on ennekõike registreeritud K-rikastes anortosiit-rabakivide plutoonides (näiteks Märjamaa plutooni rabakivides).

Kristalsete kivimitega seonduvate maavarade otsingute peamised tulemused on kokku võetud Petersell *et al.* (1991) uuringuaruandes. Varasemate uuringuprojektide tulemustest on heal tasemel üldgeoloogilised ja petrograafilised kirjeldused, kuid elementide sisaldused (ennekõike jälgelemendid) määrati peamiselt väheusaldusväärse poolkvantitatiivse spektraalanalüüsiga ning enamasti ei pööratud tähelepanu rohepöördeks oluliste tehnoloogiliste metallide esinemisele.

Praeguse seisuga ei ole Eesti aluskorra kristalsetes kivimites teada maagistumisi, millel oleks kohene arvestatav majanduslik potentsiaal. Arvestades Eesti kristalse aluskorra petrooloogilist ja struktuurset sarnasust Lõuna-Soome ja Kesk-Rootsi aluskorraga, mis on tuntud Zn, Pb, Cu, Fe ja Au maagistumisprovintsidena, on siiski põhjust oletada, et sellist tüüpi mineralisatsiooni esineb ka Eesti kristalses aluskorras.

1.2.2. Maagistumpotentsiaal Eesti aluskorraga geoloogiliselt rööbistuvates Kesk-Rootsi ja Lõuna-Soome aluskorra vööndites

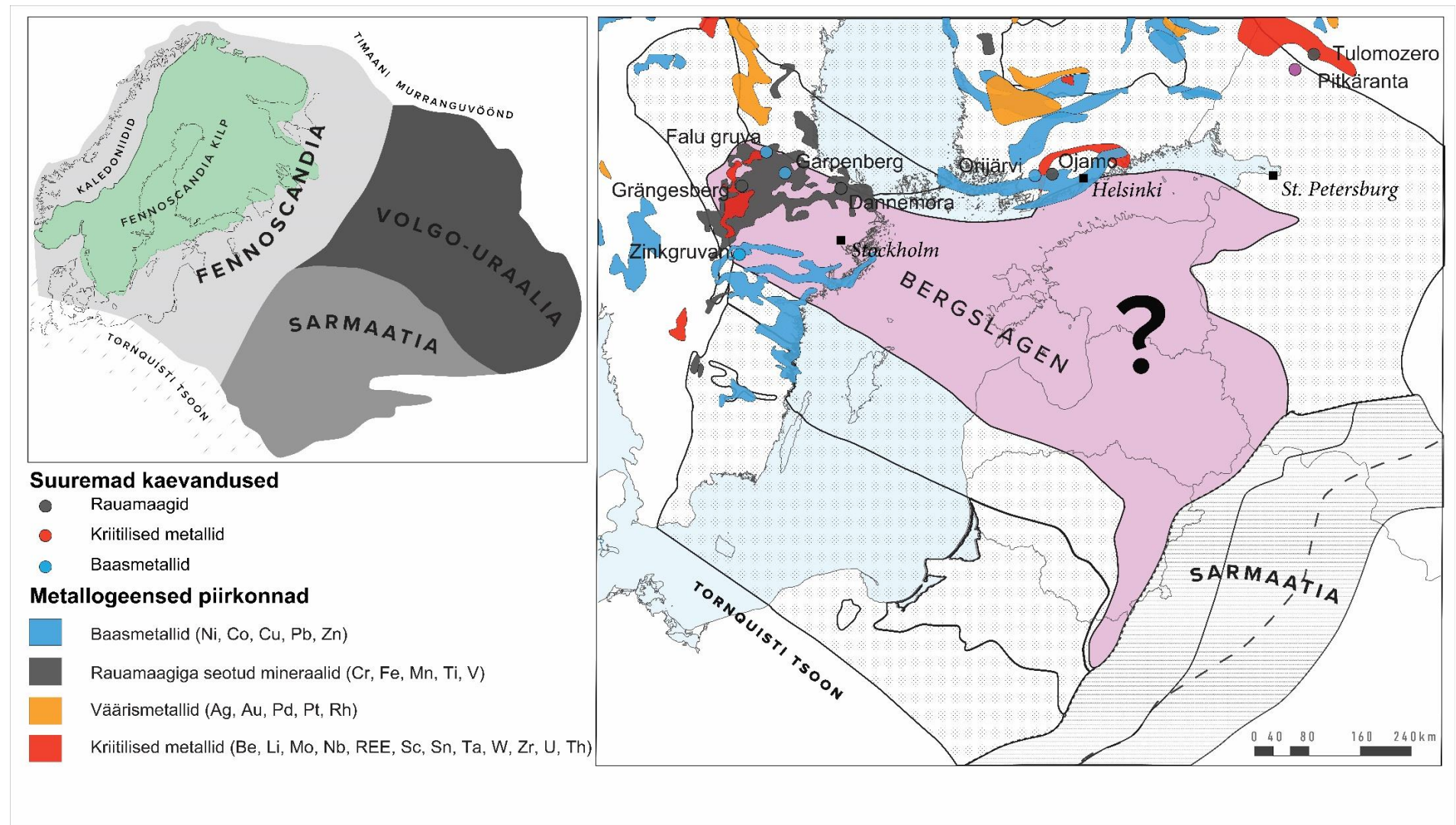
Kesk-Rootsi Bergslageni mikrokontinent moodustab koos Lõuna-Soome Uusimaa vööndi, Põhja- (Tallinna, Tapa, ja Jõhvi tsoonid), Lääne- ja Lõuna-Eesti ning Ida-Läti ja Leeduga ühtse loodekagusuunalise orientatsiooniga petrooloogiliselt ja geokronoloogiliselt seotud tektooniliste domeenide vööndi (Joonis 3). Bergslagen on ajalooliselt tuntud maagistumisprovintsi, kus erinevate metallilisi maavarasid on pidevalt kaevandatud alates keskajast. Bergslageni piirkonna aluskorrakivimites domineerivad Paleoproterosoikumi metasetendid (moondunud terrigeensed ja karbonaatsed settekivimid) ja metavulkaniidid, mis on moondunud Svekofenni orogeneesi käigus 1,96–1,75 mld aastat tagasi. Piirkonna lääneosa on mõjutatud ka Svekonorra deformatsioonist ja moondest (Stephens ja Jansson, 2020). Piiratult levivad 1,7 mld aasta vanused vulkaniidid ja setendid (Nyström, 2004). Bergslageni maagiprovintsis esineb erinevaid maagistumise tüüpe: Fe-kvartsiidid, magnetiit (-karbonaat) skarnistumine, vulkanogeenne ja hüdrotermaalne Zn-Pb-(Ag) sulfiidne maagistumine, W-Mo skarnistumine ning Au-kvarts ja Ag-Pb-Zn hüdrotermaalne mineralisatsioon (nt Sundblad, 1991; Allen *et al.*, 1996; Holtstam ja Mansfeld, 2001). Bergslageni maagiprovintsi on enam kui 1000-aastase kaevandamise ajaloo jooksul loodud tuhandeid kaevandusi, peamiselt Fe ja värviliste metallide sulfiidide kaevandamiseks (Joonis 4).

Valdav enamus Bergslageni provintsi maagistumisnähtustest esineb graniitsetes metavulkaniitides ja nendega seonduvates/vahelduvates (tihti skarnistunud) karbonaatsetes metasetendites. Olulisim maagistumisperiood Bergslagenis seondub otseselt Svekofenni orogeneesi migmatiseerumise ja granitiseerumise faasiga, mille maksimumi dateeritakse Bergslagenis 1,89–1,88 mld aastaga (Lundström, 1998). Struktuurselt seostub see aktiivse kontinentaalse ääre saarkaarte süsteemi magmatismiga (Allen *et al.*, 1996) ja sellest tuleneva sünvulkaanilise hüdrotermaalse mineralisatsiooniga (sh intensiivne ekshalatiivne ookeanipõhja hüdrotermaalne mineralisatsioon – *sedimentary exhalative deposits* - SEDEX). Järgnenud regionaalmoondegaga on nii maagikehad kui ka ümbriskivimid deformeerunud ja moondunud (sh maagistumise remobilisatsioon) erinevale moondeastmele koos skarnistumisega. Maagistumisnähtused peale 1,89–1,88 mld aasta põhifaasi on harvad, välja arvatud 1,8–1,7 mld aasta vanuste graniitsete intrusioonidega seotud lokaliseeritud

epigeneetiline mineralisatsioon, mis väljendub peamiselt W-Mo sisaldavas skarnistumises ja polümetalses mineralisatsioonis (Sundblad 1991). Kuigi Bergslageni maagiproovints on tuntud ennekõike massiivsete Svekofenni vulkanogeensete magnetiidi, sfaleriidi-galenii ja kalkopüriit-püriidi (Cu-Pb-Zn-Fe) maagistumisega, esineb Faluni piirkonnas Bi-Pb-Se-S mineralisatsiooni levikuga kaasnev eheda Au-Ag mineralisatsioon (Sundblad, 2003). Faluni Se-Au kandev maagistumine on tõenäoliselt kujunenud massiivseid orogeensetes protsessides moondunud sulfide lõikavas hüdrotermaalses süsteemis.

Kesk-Rootsi Bergslageni maagiproovintsi geoloogilist ehitust on põhjalikult uuritud enam kui saja aasta vältel ja teadmised piirkonna geoloogilisest ehitusest, maagistumise levikust ja seda kontrollivatest struktuuridest on väga detailsed Fe, värviliste ja väärismetallide ressursside osas. Siiski käivitas Rootsi Geoloogiateenistus juba 2017. aastal uue multidistsiplinaarse geofüüsikalise-geokeemilise kaardistamise programmi Bergslageni piirkonna taastuvenergeetika lahenduste ülesehitamiseks vajalike strateegiliste tähtsusega toormete otsinguteks ja uuringuteks, sealhulgas ajalooliste kaevandus- ja rikastusjäätmete kaardistamiseks (Geological Survey of Sweden, 2022).

Lõuna-Soome aluskorra metallogeneetilises potentsiaalis domineerivad Fe, Cu, Ni, Pb-Zn ja Au, aga ka strateegiliste tehnoloogiametallide Co, grafiidi ning Li maagistumised (Joonis 4). Ajalooliselt kaevandatud Jussarö Fe-kvartsiidid Soome lõunarannikul jätkuvad seejuures arvatavasti kagusuunalise vööndina sarnaste mineraloogiliste-geokeemiliste omadustega Jõhvi magnetilise anomaalia suunas.



Joonis 4. Rootsi ja Soome metallogeensete piirkondade võimalikud seosed Eesti aluskorraga ja suuremad olemasolevad kaevandused. Muudetud Bogdanova et al., (2015) ja Eilu, P., (2012) järgi

Ni-Cu maagistumine Lõuna-Soomes (Mäkinen ja Makkonen, 2004) on koondunud kahte vööndisse – jooneline, ligikaudu idakirde-lääneedelasuunaline 100 km pikkune Satakunta/Vammala vöönd Edela-Soomes ja 400–500 km pikkune loode-kagusuunaline Laadoga-Botnia lahe vöönd Kesk-Soomes. VMS (*volcanic hosted massive sulphide mineralization*) tüüpi värviliste ja väärismetallide mineralisatsioon on levinud Lõuna-Soomes Uusimaa vööndis. Neist olulisim on ajalooliselt kaevandatud Cu-Zn-Pb maagistumine Orijärvi Zn-Cu metallogeneetilises provintsis (Eilu ja Tontti, 2012), mis on seotud tugevalt muutunud happeliste ja aluselistes vulkaniitidega vahelduvate metasetenditega (Fe-kvartsiidid).

Lõuna-Soomes on tuntud Au-mineralisatsioon, mis levib peamiselt Edela-Soomes Bergslageni struktuurse analoogi piirkonnas Orijärvis. Samuti on tuntud ka Ag-Au-Cu-Pb-Zn epigeneetilised ning Bi-Te assotsiatsiooniga seotud orogeense tekkemehhanismiga Au-mineralisatsioonid, mille mineraloogiline assotsiatsioon ja geokeemiline iseloom sarnaneb Jõhvi magnetiitgneisside Au-Ag ilmingutega ja mis levivad Edela-Soomes Isovesi ja Jokisivu piirkonnas (Eilu *et al.*, 2003).

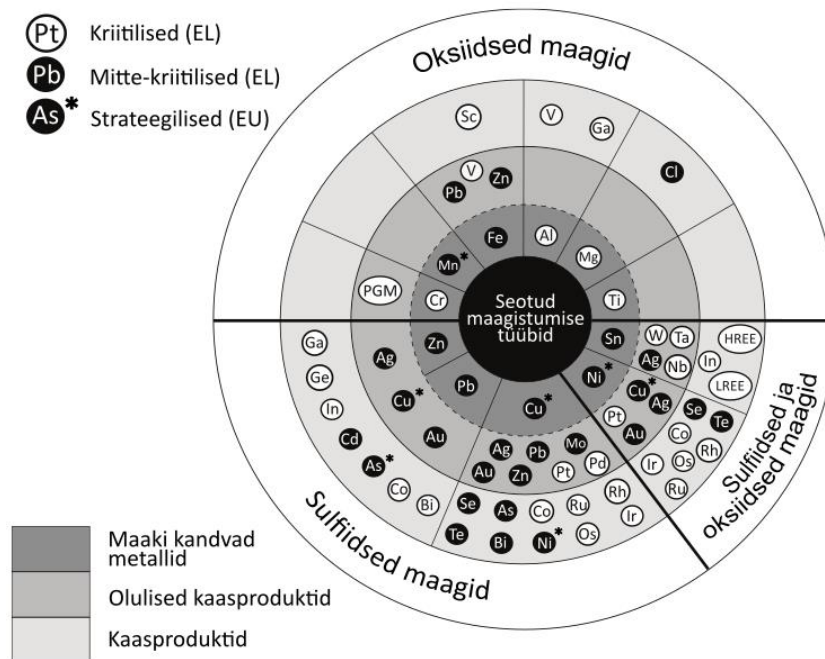
2. Programmi fookus

Eesti riiklik kriitiliste toormete üldgeoloogiliste uurimistööde programm keskendub kristalsele aluskorrale ja maavaradele, mille esinemispotentsiaal on suurim, lähtudes Eesti aluskorraga rööbistuvatest Fennoskandia maagistumisprovintsidest.

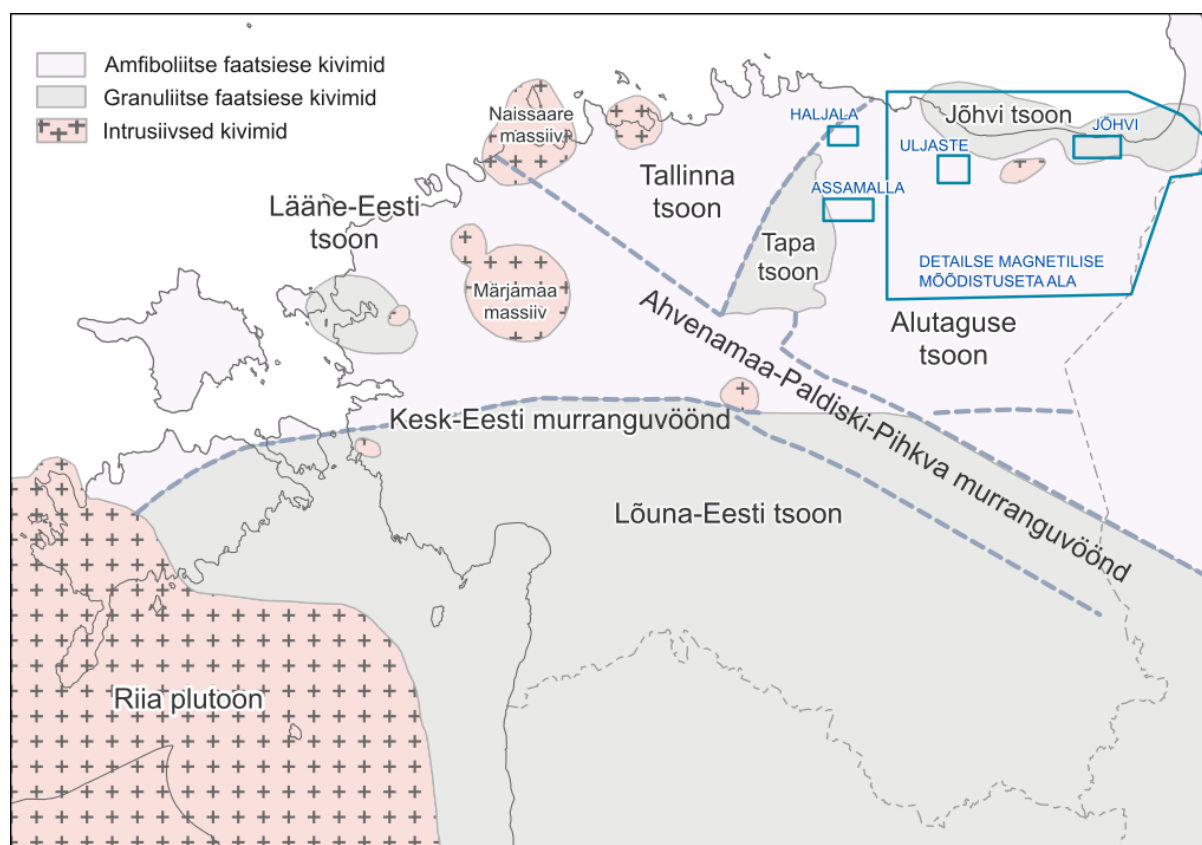
2021. aastal ilmus Põhjamaade (Soomes, Taani-Gröönimaa, Rootsi, Norra ja Island) geoloogiateenistuste koostöös aruanne “*The Nordic supply potential of critical metals and minerals for a Green Energy Transition. Nordic Innovation Report*” (Eilu *et al.*, 2021), mis kirjeldas rohepöörde elluviimiseks vajalike strateegiliste tehnoloogiliste metallitoormete (CRM – *Critical Raw Materials*), aga ka teiste suure majandusliku tähtsusega maavarade leviku potentsiaali Põhjamaades. Kriitilised ja/või strateegilised toormed esinevad tihti maagistunud kivimites, aga kaasnevate, mitte põhiliste komponentidena. Näiteks koobalti puhul on peamiseks metalliks nikkel ja koobalt on kaasnev metall. Seevastu on ELis kriitiliseks klassifitseeritud alumiinium põhiline maagis esinev metall. Lihtsustatud kujul näitab peamiste ja kaasnevate metallide seoseid joonis 5. Lähtudes Eilu *et al.*, 2021 aruandest ning ELi kriitiliste ja strateegiliste toormete nimekirjast, on Eesti kristalse aluskorra geoloogilise ehituse kontekstis põhjendatud eelkõige järgmiste metallide otsingud-uuringud (Tabel 1). Joonisel 6 on esitatud olemasolevate teadmiste põhjal piirkonnad, kust esmajoones neid metalle otsida võiks.

Tabel 1. Metallide loend, mille otsingud on praeguste teadmiste kohaselt põhjendatud. Paksus kirjas on näidatud ELis kriitiliseks klassifitseeritud metallid; tärniga (Ni*) on tähistatud EL-is strateegilisteks klassifitseeritud metallid.

Põhi-komponendid	Kaasnevad metallid	Kasutusvaldkond	Esinemisevorm	Fennoskandia rööbistuvad struktuurid	Potentsiaalne leviala
Pb – Plii Cu* – Vask	Bi – Vismut	Elektroonika, energeetika ja keemiatööstus	Sulfiidne maagistumine ja kaasproduktid	Bergslagen, Kesk-Soome saarkaarte kompleks, Uusimaa vöönd	Tallinna, Tapa, Jõhvi ja Alutaguse tsoonid
Ni* – Nikkel	Co – Koobalt	Akumetall, terasetööstus	Sulfiidne Ni-maagistumine aluselises süsteemides	Bergslagen, Kesk-Soome saarkaarte kompleks	Põhja-Eesti, Lääne-Eesti ja Alutaguse tsoon
Zn – Tsink	In – Indium	Elektroonikatööstus, CIGS päikesepaneelid (In)	Sulfiidne Zn-maagistumine	Bergslagen, Uusimaa vöönd	Põhja-Eesti, Lääne-Eesti ja Alutaguse tsoon
Li – Liitium	Sn, W, Ta, Nb	Akud	Li- ja haruldaste metallide pegmatoidid	Pegmatoidsed intrusioonid	Põhja- ja Lääne-Eesti
REE – Haruldased muldmetallid	Zr, Ti*, Nb	Kütuse-lemendid ja supermagnetid, terasetööstus (erisulamid)	Pegmatoidid, intrusiivid	Pegmatoidsed intrusioonid	Põhja-Eesti (Tallinna ja Jõhvi tsoonid), Lääne-Eesti pegmatoidsed graniidid ja anortosiit-rabakivide intrusioonid
Fe – Raud Ti* – Titaan	V – Vanaadium	Pigmendid (Ti), sulamid (V, Ti), akumetall (V)	Ilmeniit-magnetiit maagistumine aluselises kivimites	Toleitse rea aluselises kivimid	Lõuna- ja Lääne-Eesti
Sb – antimon	W – Volfram	Terasetööstus (kövasulamid)	Skarnistumine (karbonaatsete kivimite metasomatoos)	Bergslagen	Põhja-Eesti
Cu* Pb-Zn	Ag ja Au – Hõbe ja kuld	Elektroonika-tööstus	Sulfiidse maagistumisega kaasnev	Bergslagen, Uusimaa vöönd	Tallinna, Tapa ja Jõhvi tsoonid
Cr – Kroom	PGM – Plaatina grupi metallid	Elektroonika-, auto- ja meditsiinitööstus	Aluselises ja ultraaluselises intrusioonides	Kesk- ja Põhja-Soome	Postorogeensed aluselised ja ultraaluselised intrusioonid üle Eesti



Joonis 5. Põhi- ja kaasnevate metallide esinemist kujutav diagramm oksiidsetes ja sulfiidsetes maagisüsteemides (muudetud Frenzel, 2017 järgi).



Joonis 6. Piirkonnad, kus olemasolevate teadmiste põhjal on põhjendatud Eestis eelduslikult esinevate kriitiliste toormete otsingud. Muudetud All jt. (2003) järgi

3. Programmi tegevuskava

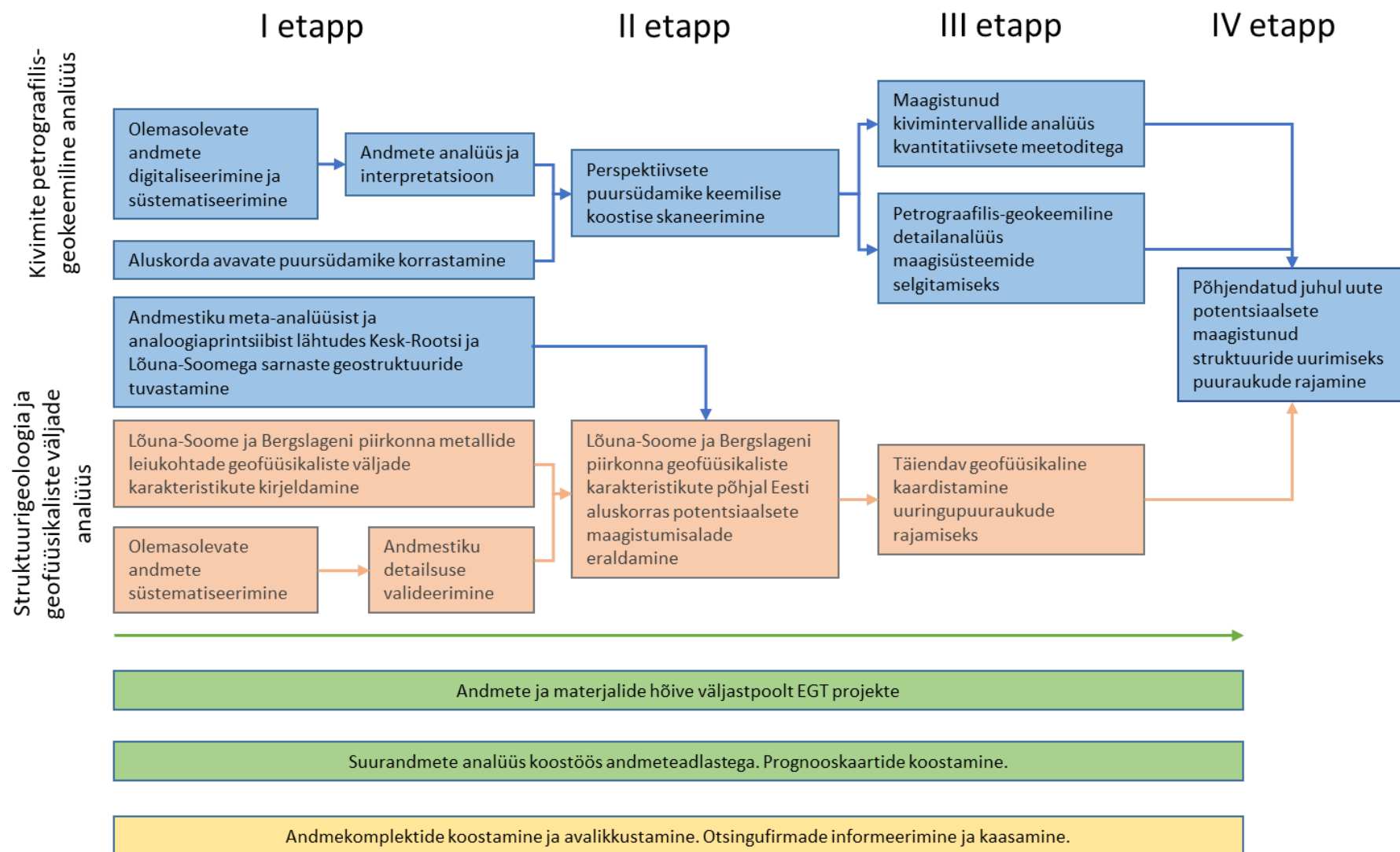
Analoogia sarnastes geoloogilistes tingimustes tuvastatud maagistumisega ning seni avastatud geofüüsikalised ja geokeemilised anomaaliad osutavad, et kriitilisi toormeid sisaldavate maavaravarude esinemist võib Eestis põhjendatult eeldada. Tänase parima teadmise kohaselt ei ole siiski Eesti aluskorrast veel avastatud selliseid strateegiliste ja kriitiliste toormetega seonduvaid ilminguid, mis lubaksid koheselt keskenduda maavara varu määratlemisele. Seetõttu keskendub programm eelkõige olemasoleva andmestiku uuesti tõlgendamisele, Eesti aluskorra metallogeneesi mudeli väljatöötamisele ja potentsiaalsete maagistumiskiirkondade selgitamisele. Võrreldes olemasoleva andmestiku kogumise ajaga on märkimisväärselt lisandunud keemilisi elemente (sh mitmed kriitilised toormed), mida otsitakse, ja arenenud andmeanalüüsi tööriistad. Alles sellise eeltöö lõpetamisel positiivsete tulemustega on võimalik jätkata uuringutega, mis keskenduksid maavara varu määramisele ning selle kasutamise majandusmõju ja kaevandamise keskkonnamõju hindamisele. Praeguse kriitiliste toormete otsingute ja uuringute fookuse dikteerib Eesti kristalse aluskorra geoloogilise ehituse sarnasus Kesk-Rootsi ja Lõuna-Soome geoloogiliste struktuuridega ning põhitähelepanu peab olema suunatud nendes teadaolevate ja/või perspektiivsete maagiprovincside ja -ilmingute analoogide otsingutele. Programmis kavandatud tegevused põhinevad programmi koostamiseni tehtud ja selle koostamise ajal käimasolevatel, sh akadeemilistel uuringutel. Programmi eesmärkide saavutamist toetavad programmi tegevustega paralleelselt toimuvad seotud (mittedubleerivad) uuringud ülikoolides. Samuti teevad seda erinevad ülikoolide, geoloogiateenistuste ja uurimisasutuste ühisprojektid, nt käimasolev DEXPLORE projekt, mille eesmärk on pakkuda uudseid meetodeid sügaval asuvate kriitiliste toormete maardlate otsinguteks, ja TEM-TA30, mille raames uuritakse Eesti aluskorra kriitiliste tehnoloogiliste ressursside metallogeneetilist potentsiaali.

Programmi tegevused jagunevad järgnevasse alateemadesse:

1. aluskorrakivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs;
2. struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs;
3. teadmiste ja (suur)andmete analüüs ning süntees;
4. uuringupuuraukude rajamine uute potentsiaalselt maagistunud struktuuride kirjeldamiseks;
5. huvigruppide kaasamine ja avalikkuse informeerimine.

Alateemade tegevused jagunevad üksteisele järgnevateks etappideks, kus iga eelneva etapi tulemused on aluseks järgneva etapi kavandamisel ja täitmisel (Joonis 7). Alateema etappe võib info lisandumisel olla vajalik ka mitu korda läbida, mille käigus muutub detailsus, fookusala või muud uuringu rõhuasetused.

Programmi tegevuskavas on pikemat tööde perspektiivi aastani 2040 kirjeldatud üldisemalt iga alateema all. Esimese viie aasta tegevused, nende ajakava, eelarve ja täitjad on alateemade all esitatud detailselt tabeli kujul. Kõigi tegevuste koondülevaade on leitav lisast 1. Kavandatud tegevusi ajakohastatakse programmi ülevaatamise käigus.



Joonis 7. Eesti riikliku kriitiliste toormete üldgeoloogiliste uurimistööde programmi üldine tegevuskava

3.1 Aluskorra kivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs

Selle alateema raames viiakse läbi järgmised tegevused:

1. aluskorda avavate puursüdamike korrastamine ja andmebaasi sisestamine;
2. olemasolevate petrofüüsikaliste, keemiliste ja mineraloogiliste/petrograafiliste andmete digiteerimine, analüüs ja geoloogiline interpretatsioon;
3. aluskorra kivimite olemasolevate petrograafiliste ja struktuursete kirjelduste analüüs ning analoogiaprintsiibist lähtudes (Kesk-Rootsi ja Lõuna-Soome) sarnaste geostruktuuride/kivimikomplekside tuvastamine.

Eesti aluskorda on rajatud enam kui 500 puurauku, millest võeti kokku hinnanguliselt 32 500 meetrit puursüdamikku. Nõukogude perioodil läbi viidud süvakaardistamise peamiseks eesmärgiks oli maavarade otsing, tänu millele uuriti puursüdamikke võrdlemisi hea detailsusega, hõlmates nii petrofüüsikalisi, keemilisi (sh põhi- ja jälgelementide) kui ka petrograafilisi analüüse. Põhikomponentide keemilist analüüsi teostati reeglina kvantitatiivse nn silikaatanalüüsi meetodil ja petrograafilised analüüsid optilise polarisatsioonimikroskoopia meetodil. Suur osa puuritud puursüdamikest on praeguseni säilinud ja hoiul EGT Arbavere uuringukeskuse hoidlates. Lisaks hoiustatakse seal edasiste uuringute tarbeks kristalsete kivimite õhikuid (10 400 tk) ja ca 1500 lihvitud kivimpala aluskorra maagistunud intervallidest.

Jälgelementide analüüsiks kasutati enamasti poolkvantitatiivset (emissioon-)spektraalanalüüsi. Kuigi spektraalanalüüs ei ole võrreldav kaasaegsete kvantitatiivsete jälgelementide analüüsimeetoditega, on meetodi täpsus piisav uuritavate elementide sisalduste suurusjärgude ja trendide hindamiseks (Vind ja Tamm, 2021).

Kuna vastavalt nende puursüdamike puurimise ajal kehtinud geoloogilise otsingu metoodikale tehti spektraalanalüüs enamasti iga aluskorra puursüdamiku meetri kohta, siis on tegemist suuremahulise andmestikuga, mis võimaldab hinnata huvipakkuvate elementide levikupilti ja üldsisaldusi. Seega on nende andmete digiteerimine ja analüüs **esimeseks etapiks**, mis on vajalik järgnevate etappide teostamiseks. Programmi koostamise ajaks on andmed EGT poolt suuremas osas digiteeritud, kuid kasutatavuse lihtsustamiseks on vaja neid täiendavalt süstematiseerida ja andmebaasi viia.

Esimese alateema teise etapi ülesandeks on esimeses etapis koondatud info analüüsile tuginedes skaneerida välja valitud perspektiivseimate ja huvipakkuvamate kristalse aluskorra puursüdamike ja/või nende valitud lõikude keemilist koostist (põhi ja jälgelemendid va kerged elemendid - Be, Li) röntgenfluorestsents-spektromeetria (XRF) meetodil, et tuvastada ja/või kontrollida potentsiaalseid

eelpool loetletud elementide maagistumisilminguid. Kuna XRF-meetodil ei ole võimalik määrata kergete elementide levikuga seonduvaid mineraalseid muutusi, on vajalik võtta kasutusele ka teisi geokeemilis-mineraloogilisi ekspressmeetodeid (nt portatiivne Raman spektroskoopia, LIBS).

Programmi koostamise hetkeks on EGT skaneerinud projekti „Kriitiliste toormete üldgeoloogiline ja rakendusteaduslik uuring” raames 22 Põhja- ja Kirde-Eesti puursüdamiku aluskorra intervallid. Projekti tulemused on vormistatud aruandeks “Kriitiliste toormete ja nendega assotsieeruvate elementide tuvastamine ning uuringupotentsiaali hindamine Eesti aluskorras” (Nirgi jt, 2024). Projekti tulemused andsid uusi indikatsioone võimalike mineralisatsioonide kohta, kuid skaneerimisega on otstarbekas jätkata, et laiendada andmete ruumilist katvust ja suurendada seeläbi uute avastuste võimalust.

Eesti geoloogilise ehituse, olemasoleva info ja siiani tehtud tööde põhjal on põhjendatud keskenduda skaneerimisel Põhja-Eesti piirkonna puursüdamikele.

Paralleelselt aluskorra kivimite keemilise koostise kaardistamisega tuleb kaaluda aluskorra geokeemiliste anomaaliade tuvastamist vahetult aluskorral lasuvates ümbersetitatud murenemiskoorikutes, Ediacara settekompleksi alumistes kihtides ja Lääne-Eestis aluskorral lasuvates Kambriumi setendites. Analüüsida tuleb ka teiste kaudsete geokeemiliste meetodite, nagu maavaraotsingu eesmärgil läbiviidava pinnakatte süstemaatilise geokeemilise kaardistamise, rakendamise võimalusi Eestis.

Kolmanda etapi ülesandeks on elementide kaardistamise tulemuste ja analüüsi alusel valitud intervallide proovimine ja analüüs kvantitatiivsete meetoditega (ICP-MS/OES, XRF), et tuvastada tehnoloogiliste elementide sisaldusi, ning potentsiaalsete intervallide petrograafiline-mineraloogiline-geokeemiline detailanalüüs huvipakkuvate elementide kandjate ja nende leviku selgitamiseks.

Tabel 2. Aluskorrakivimite petrograafilis-geokeemilise analüüsi tegevused aastani 2030

Tegevus	Vastutaja(d)	Koostööpartner(i d)	Tähtaeg	Maksumus (eur)	Märkused
Olemasolevate andmete digitaliseerimine ja süstematiseerimine	EGT		2025-2025	0,05 milj	
Olemasolevate aluskorra puursüdamike skaneerimine (XRF) meetodil, mida täiendatakse	EGT		2025 - 2027	0,25 milj	Fookuses Põhja-Eesti piirkond ja eriti Kirde-Eesti.

kergemate elementide tuvastamiseks LIBS seadmega					
Kogutud andmete analüüs ja täpsemat uurimist eeldavate südamike ning intervallide määramine	EGT		2025-2028	0,1 milj	
Tuvastatud potentsiaalselt mineraliseerunud kivimite täpsemad laboratoorsed uuringud.	EGT		2026-2028	0,2 milj	Eelmiste tegevuste sisendi alusel välja valitud puursüdamike ja intervallide elementide ja mineraalide sisalduse kontrollimine täpsete meetoditega.

3.2 Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs

Selle alateema esimese etapi eesmärgiks on analüüsida geostruktuurset Kesk-Rootsis ja Lõuna-Soomes levivaid aluskorrakivimeid, mis on rööbitatavad Eesti aluskorra struktuursete plokkidega. Bergslageni maagiprovinci (laiemas mõttes) ja Lõuna-Soome struktuurigeoloogiline, geofüüsikaline ja metallogeneetiline analüüs keskendub eeskätt Eestis potentsiaalselt leviva maagistumise geneetilistele tüüpidele. Arvestades esimese alateema käigus kirjeldatud maagistumiselminguid teostatakse analoogiaprinsiibist lähtudes geofüüsikaliste väljade analüüs geoloogiliste struktuuride täpsemaks iseloomustamiseks.

Teine selle analüüsi oluline ülesanne on olemasoleva geofüüsikalise andmestiku detailsuse hindamine püstitatud eesmärgi täitmiseks. Selgitatakse, kas gravi- ja magnetomeetrilise andmestiku alusel on analoogiaprinsiibist lähtudes võimalik tuvastada võimalikke maagistumistsoone piisava usaldusväärsusega ning kas olemasolev andmestik on piisava kvaliteediga (sh andmetihedusega). Sellest analüüsist peab selguma, kas ja milliseid geofüüsikalisi uuringuid on vaja ja võimalik läbi viia otsingute efektiivsuse tõstmiseks ja/või potentsiaalsete puurimistööde ettevalmistamiseks järgnevates etappides. Sealhulgas peab esimese etapi analüüsist selguma, kas täiendav geofüüsikaline

kaardistamine seni aeromagnetomeetriliselt madala detailsusega kaardistatud ca 4000 km² suurusel alal Kirde-eesis on maavarade perspektiivist lähtudes põhjendatud.

Sõltuvalt esimese etapi järeldustest on teise alateema kolmanda etapi ülesandeks aluskorra struktuurse ehituse täpsustamine, viies läbi täiendavaid pindalalisi aeromagnetomeetrilisi kaardistustöid ning vajadusel detailseid maapealsed multimeetodilisi geofüüsikalisi uuringuid (magnetomeetria, gravimeetria, põhjendatud juhtudel teised meetodid).

Tabel 3. Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüsi tegevused aastani 2030

Tegevus	Vastutaja(d)	Koostööpartner(id)	Tähtaeg	Maksumus (eur)	Märkused
Olemasoleva magnetvälja ja raskuskiirenduse andmestiku piisavuse hindamine	EGT	TalTech, TÜ	2025	0,1 milj	
Kirde-Eesti piirkonna detailsem (möötkavas 1:25000 aeromagnetomeetria line kaardistamine (ca 4000 km ²))	EGT	GTK, TÜ, SGU	2025 - 2026	4 milj	Vt. ala jooniselt 6
Geofüüsikalise väljade mustrite analoogia printsiibi järgi Kirde-Eesti võrdlemine Soome ja Rootsi kriitiliste toormete maagistumispirkondadega	EGT	TalTech, TÜ, GTK, SGU	2026-2027	0,25 milj	
Olemasoleva andmestiku põhjal kõrge potentsiaaliga kriitiliste toormete esinemisalade seismiline profileerimine	EGT	TÜ, SGU, GTK	2027	0,5 milj	Gravi ja magnetomeetria alusel avastatud anomaaliade lasumistingimuste, konfiguratsiooni ja maagistumispotentsiaali täpsustamiseks ca m 1:25000

					interpretatsiooni marsruutidena
Detailsed suuremõõtkavalised geofüüsikalised tööd (maapealne magnetomeetria, drooni-magnetomeetria, seismiline profileerimine) konkreetsetel puurimisaladel. Teostatakse väiksemal alal puurimisparameetrite täpsustamiseks.	EGT		2026-2029	0,5 milj	Huvipakkuvate struktuuride puurimiste eelsed uuringud puurimiskohtade, puurimissügavuste ja suundade valikuks. Vajadusel puurimiste järgsed uuringud maagikehade kontuurimiseks ja/või täpsustavate puuraukude rajamiseks.
Puuraukude geofüüsikaliste uuringute seadmete täiendamine kahe uue sondiga: (1) magnetiline vastuvõtlikkus, (2) gamma-spektromeetiline.			2026	0,05 milj	Magnetiline vastuvõtlikkus annab tiheda sammuga petrofüüsikalise info otse puuraugust. Loodusliku gammakiirguse mõõtmine tuvastab K, U, ja Th signaalid ning aitab tuvastada kivimipiire ning anomaalseid intervale. Jõhvi magnetiidi leiukoha uuringute puhul renditi sondid. Kulude efektiivsuse tõttu on mõistlik sondid soetada EGT varustuse hulka.

3.3 Teadmiste ja (suur)andmete analüüs ning süntees

Olemasolevad ja programmi elluviimise käigus kogutavad andmed moodustavad väga suured andmemassiivid, mille alusel on põhimõtteliselt võimalik prognoosida uusi maavarade leiukohti.

Samas eeldab nende andmehulkade töötlemine ja analüüs spetsiifilist ja ka uudset lähenemist, et leida üles õiged maagistumisele viitavad tunnused ning teha õiged järeldused. Muuhulgas on selleks otstarbekas katsetada olemasolevaid ja/või Eesti oludele kohandatud tehisintellekti lahendusi.

Tabel 4. Teadmiste ja (suur)andmete analüüsi ning sünteesi tegevused aastani 2030

Tegevus	Vastutaja(d)	Koostööpartner(id)	Tähtaeg	Maksumus (eur)	Märkused
Arvutuslike maagistumise prognooskaartide koostamine	EGT	TÜ, TalTech	2025 - 2029	0,2 milj	
Maagistumistüüpi de geneesi selgitamine geodünaamiliste/mineraloogiliste mudelitega. Tektoonilise ajaloo rekonstrueerimine	EGT	TÜ, TalTech	2025-2029	0,5 milj	

3.4 Uuringupuuraukude rajamine uute potentsiaalselt maagistunud struktuuride kirjeldamiseks

Kogutud andmete analüüsimise käigus tuvastatud potentsiaalsed struktuurid on teoreetilised, kuni ei ole tõestust, et andmete tõlgendus vastab tegelikkusele. Seetõttu on ülimalt oluline rajada uute potentsiaalsete maagistunud struktuuride tuvastamiseks ja kontrollimiseks uuringupuurauke, et analüüsida seal levivaid kivimeid. Uute puuraukude rajamine on põhjendatud vaid eelnevalt detailselt iseloomustatud struktuuride avamiseks.

Tabel 5. Uuringupuuraukude rajamine aastani 2030

Tegevus	Vastutaja(d)	Koostööpartner(id)	Tähtaeg	Maksumus (eur)	Märkused
Tegevuskava tegevuste tulemusena tuvastatud võimalike kriitiliste toormete leiukohtade kontrollimine ca 10 puuraugu puurimisega	EGT		2026 - 2029	2,5 milj	Eelduseks on 2-5 suure potentsiaaliga ala tuvastamine.

3.5 Huvigruppide kaasamine ja avalikkuse informeerimine

Käesoleva programmi tegevuste kavandamisse ja läbiviimisse tuleb asjakohases ulatuses kaasata seotud huvigrupid ja tulemusi tuleb jagada avalikkusega. Kriitiliste toormete ja nende uuringute selgitamiseks tuleb koostada info- ja õppematerjale ning neid efektiivseid kanaleid kasutades levitada.

Kuna maavarade uurimine on väga kulukas, on maailmas levinud praktika, et pärast riigi poolt tehtud üldisi maavarade potentsiaali uuringuid kaasatakse erinevaid mudeleid kasutades maavarade uuringutesse eraettevõtteid. Eesti maapõueressursside uurimise võimalusi on seni tutvustatud tagasihoidlikult, kuid sellesse oleks mõistlik panustada oluliselt rohkem, et suurendada kõrge potentsiaaliga maavaralasundite avastamise võimalusi. Maapõuepoliitika põhialuste ning riigi ja piirkonna (maakonna/kohaliku omavalitsuse) arengustrateegia eesmärkidega kokku sobivate valdkonna investeerimisvõimaluste tutvustamine aitaks kaasa sektori arengule ja võimaldaks toetada majandust.

Tabel 6. Huvigruppide kaasamine ja avalikkuse informeerimine aastani 2030

Tegevus	Vastutaja(d)	Koostööpartner(id)	Tähtaeg	Maksumus (€)	Märkused
Ühiskonna informeerimine kriitilistest toormetest ja nendega seotud uuringutest	KLIM, EGT	TÜ, Taltech	2025-2030	0,2 milj	Teemat tutvustavate ürituste korraldamine, õppe- ja infomaterjalide koostamine ja levitamine.
Eesti kriitiliste toormete ning nendega seotud andmete ja uuringute aktiivne tutvustamine maavara uuringutega tegelevatele ettevõtetele	KLIM, EGT	TÜ, TalTech	2025 - 2030	0,4 milj	Info tutvustamine erialaüritustel. Olemasolevate materjalide tõlkimine ja kättesaadavaks tegemine inglise keelsete kokkuvõtete tegemine olemasolevatest materjalidest, nende avalikustamine ja levitamine.

4. Programmi elluviimine

Programmi elluviimist korraldab Kliimaministeerium. Peamine programmi tegevuste täitja on Eesti Geoloogiateenistus, kes kaasab töödesse vajalikke kompetentse omavaid Eesti ülikoole ja koostööpartnereid.

Programmi tegevuste elluviimine ja ajakavas püsimine sõltub rahastuse olemasolust ja ajastusest. Kui programmis kavandatud ajal tegevusel rahastust ei ole, siis lükkub tegevus ja sellest sõltuvad tegevused edasi.

Programmi elluviimise raames kogutud info ja koostatud aruanded avalikustatakse ja säilitatakse Eesti Geoloogiafondis.

5. Programmi ajakohastamine

Programm vaadatakse üle ja seda ajakohastatakse vajadusel iga viie aasta tagant.

Terminite selgitused

CIGS	Vask-indium-galliumseleniidist päikesepatarei
GTK	Soome Geoloogiateenistus
ICP-MS/OES	Induktiivsidestatud plasma massispektromeetria/optilise emissiooni spektromeetria
LIBS	Laserindutseeritud plasma spektroskoopia
PGM	Plaatina grupi metallid (Pl, Os, Ir, Ru, Rh, Pd)
SEDEX	Intensiivne ekshalatiivne ookeanipõhja hüdrotermaalne mineralisatsioon (<i>sedimentary exhalative deposits</i>)
SGU	Rootsi Geoloogiateenistus
VMS	Vulkaanilis-massiivne sulfiidne mineralisatsioon (<i>volcanic hosted massive sulphide mineralization</i>)
XRF	Röntgenfluorestsents-spektromeetria

Kasutatud kirjandus

All, T., Puura, V. and Vaher, R., 2004. Orogenic structures of the Precambrian basement of Estonia as revealed from the integrated modelling of the crust. In Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology, 53, 3, 165-189. Estonian Academy Publishers.

Allen, R.L., Lundstrom, I., Ripa, M., Christofferson H., 1996. Facies analysis of a 1.9 Ga, continental margin, back-arc, felsic caldera province with diverse Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) sulfide and Fe oxide deposits, Bergslagen region, Sweden. Economic Geology, 91, 6, 979–1008.

Bergman, S., Stephens, M.B., Andersson, J., Kathol, B., Bergman, T., 2012. Bedrock map of Sweden, scale 1:1 000 000, Geological Survey of Sweden, K 423.

Bogdanova, S., Gorbatshev, R., Skridlaite, G., Soesoo, A., Taran, L., Kurlovich, D., 2015. Trans-Baltic Palaeoproterozoic correlations towards the reconstruction of supercontinent Columbia/Nuna. Precambrian Research, 259, 5-33.

Bogdanova, S., 2008. The East European Craton (Baltica) at 1.6-1.4 Ga: Continuing supercontinent agglomeration or break-up? Conference paper, The 33rd International Geological Congress, Oslo 2008.

Bogdanova, S., 2006. Tectonic zoning of the crystalline crust in the west of the East European Craton: Characterization of the belts and lithotectonic (structural material) complexes. Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe [in Russian]. 226-232.

Eesti Geoloogiateenistus. 2023. Eesti kristalse aluskorra kivimite strateegiliste maavarade otsingute ja uuringute teekaart.

<https://www.egt.ee/sites/default/files/documents/2023-06/Aluskorrauuringute%20teekaart.pdf>

Eilu, P., Bjerkgård, T., Franzson, H., Gautneb, H., Häkkinen, T., Jonsson, E., Keiding, J.K., Pokki, J., Raaness, A., Reginiussen, H., Róbertsdóttir, B.G., Rosa, D., Sadeghi, M., Sandstad, J.S., Stendal, H., Þórhallsson, E.R. & Törmänen T., 2021. The Nordic supply potential of critical metals and minerals for a Green Energy Transition. Nordic Innovation Report. <https://www.nordicinnovation.org/critical-metals-and-minerals> [Viimati vaadatud 28.02.23]

Eilu, P., Tontti, M., 2012. Orijärvi Zn-Cu. In: Eilu, P. (Ed.), Mineral Deposits and Metallogeny of Fennoscandia. Geological Survey of Finland. Special Paper, 53, 209-212.

Eilu, P., Sorjonen-Ward, P., Nurmi, P., Niiranen T., 2003. A review of gold mineralization styles in Finland. *Economical Geology*, 98, 1329-1353.

European Commission, 2020. Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study.

Geological Survey of Finland, 2020. <https://minsysfin.gtk.fi/> [Viimati vaadatud 28.02.23].

Geological Survey of Sweden, <https://www.sgu.se/en/mineral-resources/geological-information-for-mineral-exploration/mapping-in-bergslagen/> [Viimati vaadatud 28.02.23].

Gregoir, L., 2022. Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. KU Leuven. <https://eurometaux.eu/metalscleanenergy> [Viimati vaadatud 28.02.23].

Grigelis, A., Puura, V., 1978. Geological map of the crystalline basement of the Soviet Baltic republics in scale 1:500 000. Ministry of Geology of the USSR [in Russian].

Holtstam, D., Mansfeld, J., 2001. Origin of a carbonate-hosted Fe-Mn-(Ba-As-Pb-Sb-W) deposit of Långban-type in central Sweden. *Mineralium Deposita*, 36, 641-657.

Huhma, H., Puura, V., Klein, V., Mänttari, I., 1991. Nd-isotopic evidence for Paleoproterozoic crust in Estonia. Geological Survey of Finland. Special Paper, 12, 67–68.

Joosu, L, Vind, J., Lumiste, K. Polikarpus, M., Tarros, S., Pärn, J., Kansi, K., Tamm, K., Bauert, H., Kaasik, T., Kurvits, K., Nemliher, J.†, Kuldkepp R. 2023. Exploration of phosphorite and black shale in North-Eastern Estonia. (EGF:9594). Geoloogiafond.

Keskkonnaministeerium, 2017. Maapõuepoliitika Põhialused aastani 2050. <https://envir.ee/media/907/download> [Viimati vaadatud 28.02.23].

Kirs, J., Puura, V., Soesoo, A., Klein, V., Konsa, M., Koppelmaa, H., Niin, M., Urtson, K., 2009. The crystalline basement of Estonia: rock complexes of the Palaeoproterozoic Orosirian and Statherian and Mesoproterozoic Calymmian periods, and regional correlations. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 58, 219–228.

Koistinen, T., 1994. Precambrian basement of the Gulf of Finland and surrounding area. Map 1:1000000. Geological Survey of Finland.

Koppelmaa, H., 2002. Eesti kristalse aluskorra geoloogiline kaart. Mõõtkava 1:400 000. Eesti Geoloogiakeskus.

Korja, A., Lahtinen, R., Nironen, M., 2006. The Svecofennian orogen: A collage of microcontinents and island arcs. *Geological Society, London, Memoirs*, 32, 561-578.

Kurhila, M., Mänttari, I., Vaasjoki, M., Rämö, O.T., Nironen, M., 2011. U–Pb geochronological constraints of the late Svecofennian leucogranites of southern Finland. *Precambrian Research*, 190, 1–24.

Kähkönen, Y., 2005. Svecofennian supracrustal rocks. In: Lehtinen, M., Nurmi, P. A., Rämö, O. T. (eds) Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. Developments in Precambrian Geology 14. Amsterdam: Elsevier, 343–406.

Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M.A. and Gutzmer, J., 2017. Raw material ‘criticality’—sense or nonsense?. Journal of Physics D: Applied Physics, 50, 12, 123002.

Lahtinen, R., Korja, A., Nironen, M., 2005. Palaeoproterozoic tectonic evolution of the Fennoscandian Shield. Precambrian Geology of Finland -Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. Developments in Precambrian Geology, 14, 418-532.

Leach, D.L. et al., 2010. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History. Economic Geology, 105(3): 593–625.

Lumiste, K., Vind, J., Põldsaar, K., Joosu, L., Kuusma E., Paiste, P., Kirsimäe, K., 2025. Sedimentation rates control trace element composition of sedimentary phosphorites: Anomalously low uranium and cadmium levels in Paleozoic shelly phosphorites from the Baltica Paleobasin. Chemical Geology, 684, 122776.

Lundström, H., 1998. Metasedimentary rocks in the district of Storuman, Västerbotten. Göteborg University, Department of Earth Sciences, MSc thesis, B163, 44 pp.

Maavarade register, Eesti geoloogiateenistus, 2025.

Mäkinen, J., Makkonen, H. V., 2004. Petrology and structure of the Palaeoproterozoic (1.9 Ga) Rytky nickel sulphide deposit Central Finland: a comparison with the Kotalahti nickel deposit. Mineralium Deposita, 39, 405–421.

Nirgi, S., Maala, L., Kaasik, T., Smyth, D., Wrobel, F., 2022. Jõhvi magnetanomaalia uuringupotentsiaali hindamine (EGF:9552). Geoloogiafond.

Nirgi, s., Maala, L., Kont, R., 2024. Kriitiliste toormete ja nendega assotsieeruvate elementide tuvastamine ning uuringupotentsiaali hindamine Eesti aluskorras (EGF:9895). Geoloogiafond.

Nyström, J.-O., 2004. Dala volcanism, sedimentation and structural setting. In: K. Högdahl, U.B. Andersson and O. Eklund (eds.): The Transscandinavian Igneous Belt (TIB) in Sweden: a review of its character and evolution, 58-70. Geological Survey of Finland Special Paper 37.

OECD, 2019. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris.

Petersell, V., Kivisilla, J., Pukkonen, E., Põldvere, A., Täht, K., 1991. Maagiilmingute ja mineralisatsioonipunktide hindamine Eesti aluspõhjas ja aluskorras (EGF:4523). Geoloogiafond.

Puura, V., Kirsimäe, K., Kivisilla, J., Plado, J., Puura, I., Suuroja, K., 1996. Geochemical anomalies of terrestrial compounds in nonmelted impactites at Kärkla, Estonia. Meteoritics & Planetary Science, 31, A112–A113.

Rämö, O.T., Huhma, H., Kirs, J., 1996. Radiogenic isotopes of the Estonian and Latvian rapakivi suites: new data from the concealed Precambrian of the East European Craton. Precambrian Research, 79, 209–226.

Salin, E., Sundblad, K., Woodard, J., O'Brien, H., 2019. The extension of the Transscandinavian Igneous Belt into the Baltic Sea region. Precambrian Research, 328, 287–308.

Soesoo, A.; Puura, V.; Kirs, J.; Petersell, V.; Niin, M.; All, T., 2004. Outlines of the Precambrian basement of Estonia. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology, 53, 149–164.

Soesoo, A., Košler, J. & Kuldkepp, R., 2006. Age and geochemical constraints for partial melting of granulites in Estonia. Mineralogy and Petrology, 86, 277–300.

Stephens, M.B., Jansson, N.F., 2020. Paleoproterozoic (1.9–1.8 Ga) syn-orogenic magmatism, sedimentation and mineralization in the Bergslagen lithotectonic unit, Svecokarelian orogen. Geological Society of London, Memoirs, Chapter 6. 155-206.

Stephens, M.B., Ripa, M., Lundström, I., Persson, L., Bergman, T., Ahl, M., Wahlgren, C.-H., Persson, P.-O., Wickström, L., 2009. Synthesis of bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden. Geological Survey of Sweden, 58.

Stephens, M.B., Wahlgren, C.H., 1993. Oblique-slip, right lateral ductile deformation zones in the Svecokarelian orogen, south-eastern Sweden. In: Ductile shear zones in the Swedish segment of the Baltic Shield. Sveriges geologiska undersökning. Rapporter och meddelanden, 76, 18–19.

Sundblad, K., Salin, E., Claesson, S., Gyllencreutz, R., Billström, K., 2021. The Precambrian of Gotland, a key for understanding the Proterozoic evolution in southern Fennoscandia. Precambrian Research, 363, 106321.

Sundblad, K., 2003. Metallogeny of Gold in the Precambrian of Northern Europe. Economic Geology, 98, 1271-1290.

Sundblad, K., 1991. Lead isotopic evidence for the origin of 1.8-1.4 Ga ores and granitoids in the southeastern part of the Fennoscandian Shield. Precambrian Research, 51, 265-281.

Vind, J., Tamm, K., 2021. Review of the extraction of key metallic values from black shales in relation to their geological and mineralogical properties. Minerals Engineering, 174, #107271.

Lisad

Lisa 1. Programmi esimese viie aasta tegevuste koond

Teema	Tegevus	Maksumus (milj. eur)	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Aluskorra kivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs	Olemasolevate andmete digitaliseerimine ja süstematiseerimine	0.05						
Aluskorra kivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs	(XRF) meetodil, mida täiendatakse kergemate elementide tuvastamiseks LIBS seadmega	0.25						
Aluskorra kivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs	Kogutud andmete analüüs ja täpsemat uurimist eeldavate südameke ja intervallide määramine	0.1						
Aluskorra kivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs	Tuvastatud potentsiaalselt mineraliseerunud kivimite täpsemad laboratoorsed uuringud.	0.2						
Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs	Olemasoleva magnetvälja ja raskuskiirenduse andmestiku piisavuse hindamine	0.1						
Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs	Kirde-Eesti piirkonna detailsem (möötkavas 1:25000 aeromagnetomeetriline kaardistamine (ca 4000 km ²))	4						
Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs	Geofüüsikaliste väljade mustrite analoogia printsiibi järgi Kirde-Eesti võrdlemine Soome ja Rootsi kriitiliste toormete maagistumispriirkondadega	0.25						
Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs	Olemasoleva andmestiku põhjal kõrge potentsiaaliga kriitiliste toormete esinemisalade seismiline profileerimine	0.5						
Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs	Detailsed suuremõõtkavalised geofüüsikalised tööd (maapealne magnetomeetria, drooni-magnetomeetria, seismiline profileerimine) konkreetsetel uurimisaladel. Teostatakse väiksemal alal uurimisparameetrite täpsustamiseks.	0.1						
Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs	Puuraukude geofüüsikaliste uuringute seadmete täiendamine kahe uue sondiga: (1) magnetiline vastuvõtlikkus, (2) gamma-spektromeetria.	0.05						
Teadmiste ja (suur)andmete analüüsi ning sünteesi tegevused	Arvutuslike maagistumise prognooskaartide koostamine	0.2						
Teadmiste ja (suur)andmete analüüsi ning sünteesi tegevused	Maagistumistüüpide geneesi selgitamine geodünaamiliste/mineraloogiliste mudelitega. Tektoonilise ajaloo rekonstrueerimine	0.5						
Uuringupuuraukude rajamine	Tegevuskava tegevuste tulemusena tuvastatud võimalike kriitiliste toormete leiukohtade kontrollimine ca 10 puurauku uurimisega	2.5						
Huvigruppide kaasamine ja avalikkuse informeerimine	Ühiskonna informeerimine kriitilistest toormetest ja nendega seotud uuringutest	0.2						
Huvigruppide kaasamine ja avalikkuse informeerimine	Eesti kriitiliste toormete ning nendega seotud andmete ja uuringute aktiivne tutvustamine maavara uuringutega tegelevatele ettevõtetele	0.1						