



EESTI
GEOLOOGIATEENISTUS

Eesti kristalse aluskorra kivimite strateegiliste maavarade otsingute ja uuringute teekaart



RAKVERE 2023

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

KINNITATUD

Eesti Geoloogiateenistuse

Teadusnõukogu otsusega 23-6

Eesti kristalse aluskorra kivimite strateegiliste maavarade otsingute ja uuringute teekaart

Töögrupi juht: Siim Nirgi

Töögrupi liikmed: Mariliis Aren, Tarmo All, Heikki Bauert, Rutt Hints, Tiit Kaasik, Kalle Kirsimäe,
Lennart Maala, Jüri Plado, Mihkel Shtokalenko, Alvar Soesoo, Kalle Suuroja

Eesti Geoloogiateenistuse direktor: Sirli Sipp-Kulli

Sisukord

| | |
|--|----|
| Sisukord..... | 4 |
| Taust, vajadus ja seosed strateegiliste dokumentidega | 5 |
| Eesti kristalse aluskorra geoloogilise ehituse põhijooned ja rööbistatavus Skandinaavia aluskorraga . | 6 |
| Eesti kristalse aluskorra metallogenees..... | 9 |
| Maagistumispotentsiaal Eesti aluskorraga geoloogiliselt rööbistuvates Kesk-Rootsi ja Lõuna-Soome aluskorra vööndites | 10 |
| Eesti kristalse aluskorra potentsiaalsete maavarade otsingute-uuringute fookus..... | 14 |
| Eesti kristalse aluskorra maavarade potentsiaali selgitamise eesmärk ning otsingute-uuringute tegevuskava..... | 15 |
| Aluskorrakivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs..... | 17 |
| Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs..... | 18 |
| Aluskorrauuringute täitja | 19 |
| Kasutatud kirjandus..... | 20 |

Taust, vajadus ja seosed strateegiliste dokumentidega

Maavarad on jätkusuutliku majanduse ja ühiskonna sotsiaalse arengu oluliseks aluseks. Samas on kõik tehnoloogiliselt esmatähtsad maavarad piiratud ressursideks. Riigi kui kristalse aluskorra omaniku ülesandeks on teada millised maavarad maapõues esinevad ning milline on nende võimalik kasutusala ja majanduslik potentsiaal.

Globaalne liikumine uutele tehnoloogiatele, mis piiraks CO₂ heidet (sh Euroopa Liidu rohelepe), on juba praegu tekitanud metalsete maapõueressursside lisatarbimise, mis on põhjendanud maavarade otsingu- ja kaevandustegevuste hoogustumise kogu maailmas. See tähendab juba niigi piiratud maagiressursside täiendavat kasutuselevõtmist ning uute varude otsinguid ja uuringuid.

Maavarade nõudluse analüüsid (näiteks OECD, 2019) prognoosivad enamuse taastuveneergetika seisukohalt oluliste haruldaste muldmetallide nagu Pr (praseodüüm), Nd (neodüüm) ja Dy (düsproosium) ning akumetallide Li (liitium) ja Co (koobalt) nõudluse järsku kasvu. Euroopa Komisjoni 2020. aasta kriitiliste toormete hinnangu (European Commission, 2020) kohaselt kasvab vajadus ainuüksi liitiumi järele aastani 2050 kuni nelikümmend korda. Samuti on prognoositud ka teiste energia- ja elektroonikatööstusele oluliste värviliste metallide (Cu, Zn, Ni jt) vajaduse suurenemist aastaks 2050 (Gregoir *et al.*, 2022).

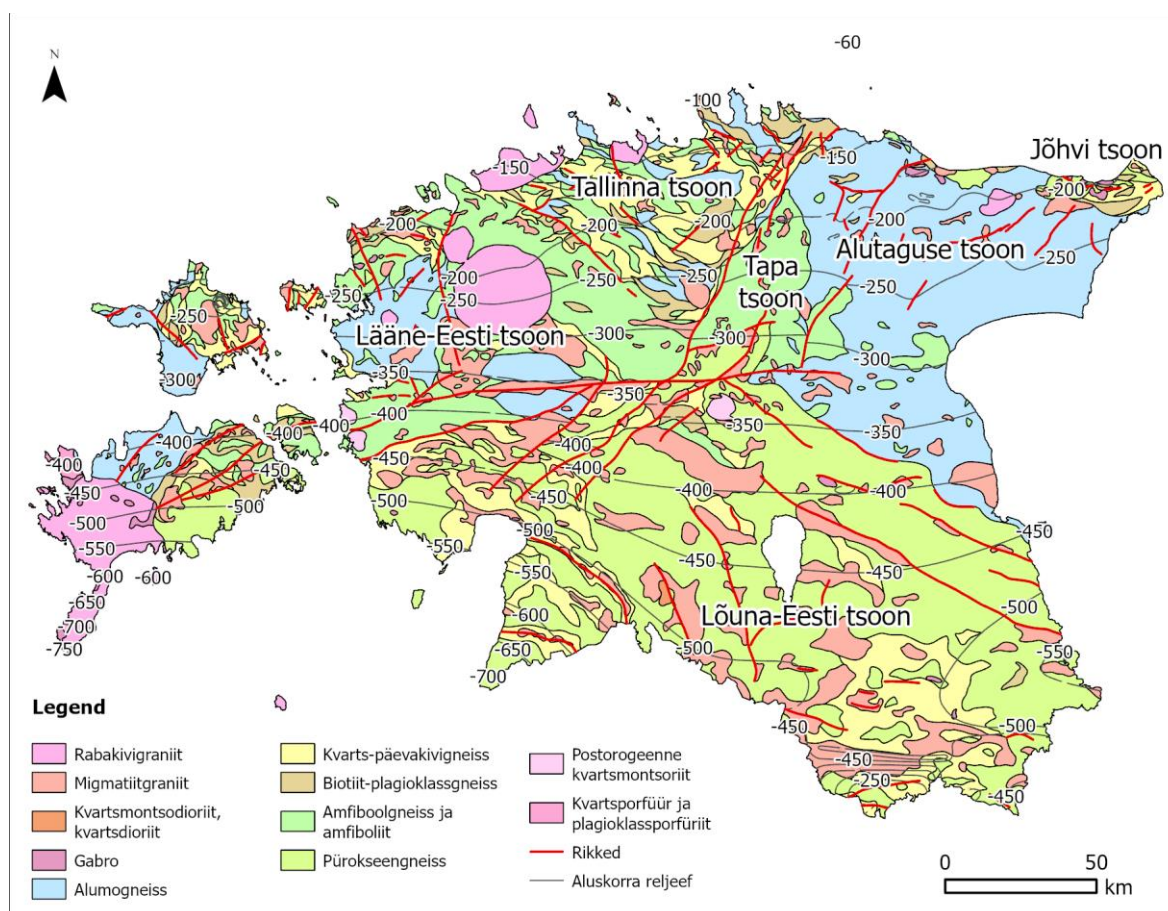
Eesti maapõueuuringute kontekstis on metalliliste toormete osas viimase kümnendi fookusesse tõusnud aluspõhjalised maavarad karbifosforiit ja graptoliitargilliit kui vastavalt haruldaste muldmetallide ja vanaadiumi võimalikud toormed. Samas on Eesti aluskorra ja aluspõhja potentsiaali uuritud ebapiisavalt 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 (Keskkonnaministerium, 2017) on sätestatud, et Eesti maapõue ja seal leiduvaid loodusvarasid uuritakse ning kasutatakse Eesti ühiskonnale võimalikult suurt väärtust looval moel, arvestades keskkonnavalaseid, sotsiaalseid, majanduslikke, geoloogilisi ja julgeoleku aspekte. Maavarad, eriti nn tehnoloogilised metallid, on tähtsad ja otseselt seotud Euroopa Liidu rohelepe, 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).

Käesoleva teekaardi eesmärgiks on formuleerida Eesti Geoloogiateenistuse uurimisülesanded ja tegevuskava selgitamaks Eesti aluskorra potentsiaali tehnoloogiliselt oluliste maavarade allikana.

Eesti kristalse aluskorra geoloogilise ehituse põhijooned ja rööbistatavus Skandinaavia aluskorraga

Paleo- ja Mesoproterosoikumi vanuseline (1,93–1,54 mld aastat; Kirs *et al.*, 2009, Rämö *et al.*, 1996) Eesti kristalne aluskord koosneb põhiosas orogeensetest Svekofenni moonde- ja tardkivimitest ning Svekofenni moondekompleksi lõikavatest anorogeensetest rabakivigraniitide plutoonidest (Puura *et al.*, 1996). Kristalse aluskorra kulutuspind lasub Põhja-Eestis umbes 150 meetri ning Lõuna- ja Edela-Eestis umbes 800 meetri sügavusel, olles lõuna suunas 2–4 m/km kaldu (Joonis 1). Aluskorral lasuvad Neoproterosoikumi ja Paleosoikumi setendid: liivakivid, savid ja karbonaatkivimid.



Joonis 1. 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 (amfiboolgneisid, biotiit-plagioklass gneisid, kvarts-päevakivigneisid, vilgugneisid ning sulfiidised grafiitgneisid ja magnetiitgneisid). Tapa tsooni iseloomustavad granaat- ja pürokseenkvartsiidid, Al-rikkad gneisid (granaat-kordierit-sillimaniit) ning pürokseen-, amfibool- ja biotiitgneisid, mis on kõrge Fe- ja S-sisaldusega. Alutaguse tsooni iseloomustavad peamiselt metasettelised Al-rikkad gneisid ja biotiit-plagioklassgneisid ning amfiboliitse faatsiese küünekivigneisid, amfiboliidid ja kvarts-päevakivigneisid. Jõhvi tsoonis levivad peamiselt migmatiseerunud pürokseen-, kvarts-päevakivi-, biotiit-plagioklass-, amfibool- ja granaat-kordieritgneisid. Jõhvi magnetanomaalia alale on omased anomaaliat põhjustavad magnetiitgneisid. 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-päevakivigneisidega.

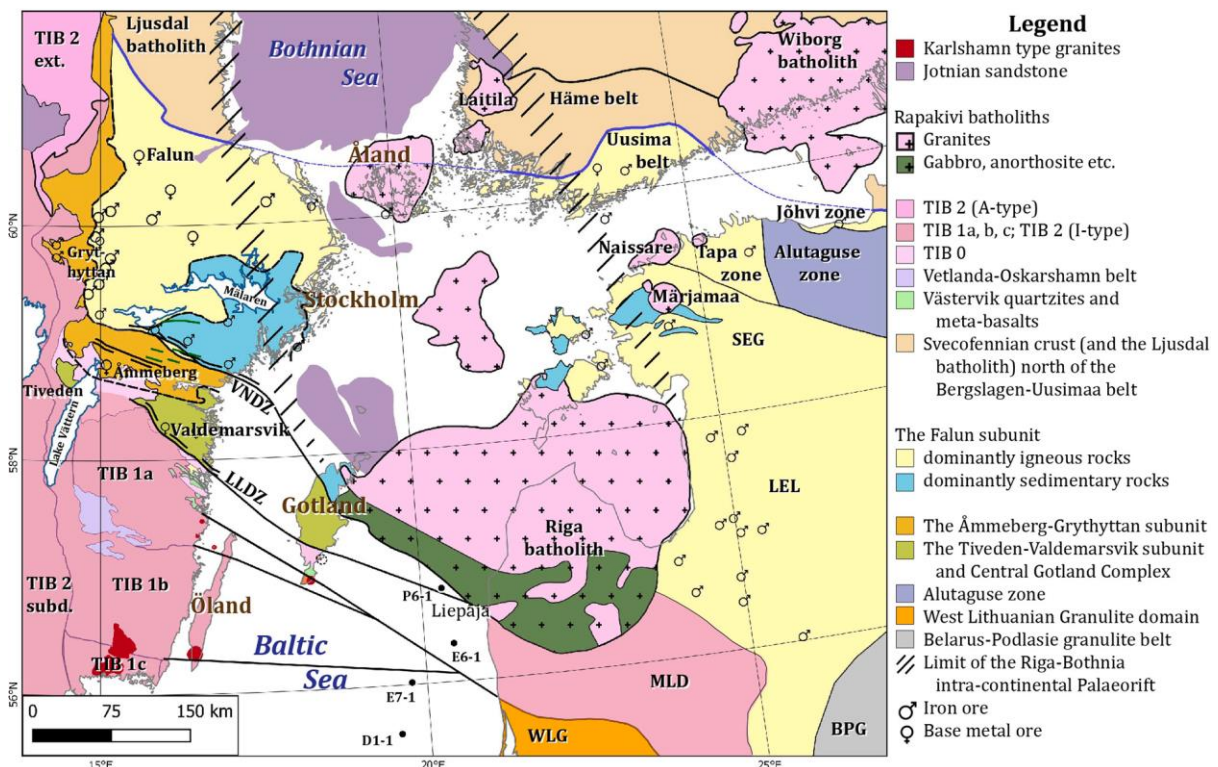
Moondekivimite komplekside vanus on 1,9–1,8 mld aastat (Kirs *et al.*, 2009; Soesoo *et al.*, 2006). Vanimad on arvatavasti Alutaguse vööndi kivimid (1,90–1,88 mld aastat). Lõuna-Eesti granuliitse faatsiese moondekivimite moonde vanused on 1,84–1,80 mld aastat. Teadaolevate šošoniitsete Muhu, Virtsu 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 (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 saarkarte 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 võõndi mõlemal pool Läänemerd (Joonis 2). Nii Tallinna kui Jõhvi tsooni magnetiitgneisside ja sulfiidide maagistumise vasted esinevad Uusimaa tsoonis Lõuna-Soomes. Sarnaselt Lõuna-Soomes levivatele moondekivimitele (Kuhila *et al.*, 2011) on ka Põhja-Eesti kivimid tugevalt migmatiseerunud. Mõlemad, Uusimaa ja Põhja-Eesti struktuursed tsoonid sarnanevad Bergslageni piirkonnale Lõuna-Kesk-Rootsis, mida iseloomustavad 1,91–1,89 mld aasta vanused vulkaaniliste ja subvulkaniliste kivimitega seotud Fe-kvartsiidid ja sulfiidne maagistumine koos hajutatud metakarbonaatide ja skarnistumisega. Alutaguse metaturbidiitide tsoon on seevastu rööbistatav samalaadsete setenditega Novgorodi domeenil, mis on struktuurselt omakorda rööbistatavad Fennoskandias Botnia domeeni ja Lõuna-Kesk Soomega.



Joonis 2. Eelkambriumi geoloogiline kaart Läänemere põhjaosast (Sundblad *et al.*, 2021) BPG – Belarus-Podlasie granulite belt (Valgevene-Podlaasia granulitiine võõnd), 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 (Transskandinaavia magmakivimite võõnd) (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 võõndis ning Jõhvi tsoonis. LLDZ – Linköping-Lofthammari deformatsiooni tsoon, VNDZ – Vingåker-Nyköpingi deformatsiooni tsoon (Stephens ja Wahlgren, 1993)

Eesti kristalse aluskorra metallogenees

Eesti kristalse aluskorra geoloogia ning selle maavarade potentsiaali uurimise ajalugu ulatub eelmise sajandi esimesse poolde kui puuriti esimesedsügavad otsingupuuraugud Jõhvi Magnetilise Anomaalia (JMA) piirkonna magnetiitgneissidesse. Süstemaatilised geoloogilised otsingud kristalsetes kivimites käivitused 1960ndatel aastatel Põhja-Eestis, millega kaasnes gravimeetiline ja magnetomeetiline kaardistamine mõõtkavas 1 : 50 000 kuni 1 : 200 000. 1991. aastal kristalse aluskorra maavarade otsingutööd katkesid ning taastusid alles 2018. aastal seondult 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 magnetiitgneissid, magnetiit-püriit-pürroitiini mineralisatsioon Al-gneissides koos sulfiidse mineralisatsiooniga grafiitgneissides, samuti haruldaste muldmetallide mineraliseerumine anortosiit-rabakivides.

Neist ulatuslikum ja kõige enam uuritud on JMA põhjustav raua mineralisatsioon (Mn-rikkad magnetiitgneissid) 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 viimane uuring kaldpuuraukudega viidi läbi aastatel 2018-2022 (Nirgi *et al.*, 2022).

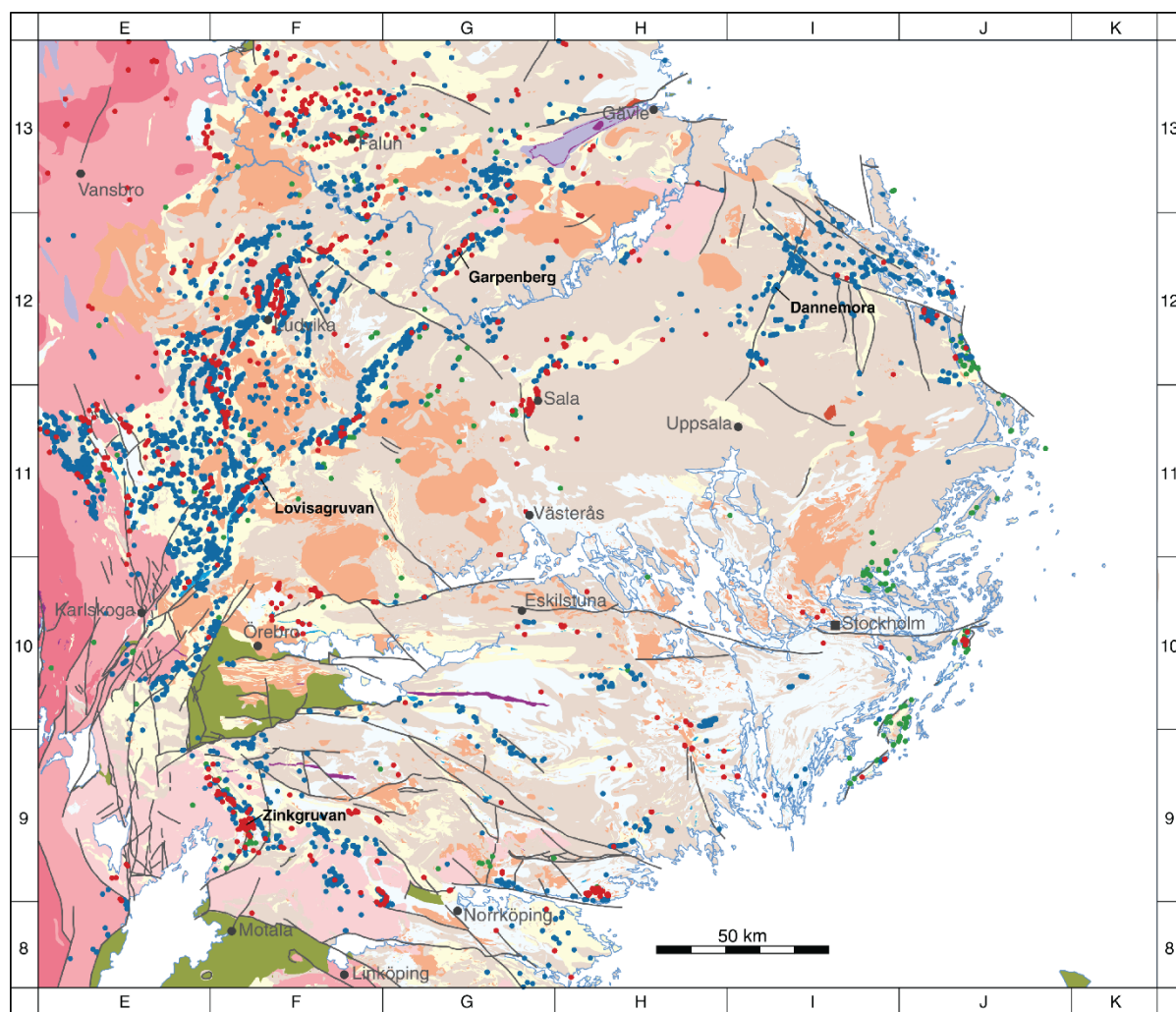
Sulfiidse mineralisatsiooni suurim potentsiaal on senistel hinnangutel Tallinna ja Alutaguse tsoonides, kus levivad grafiiti sisaldavad gneissid, grafiitkildad ja kvartsiidid. Nendes kivimites esinevate sulfiidsete faaside (pürroitiin, püriit, kalkopüriit, sfaleriit ja galeniit) Cu sisaldused ulatuvad 3000 ppm ja Zn sisaldused üle 10000 ppm. Nende kivimite grafiidisaldus ulatub 10-15%-ni. Sulfiidsetes grafiitkiltades ulatuvad Au sisaldused ppm-i tasemele, kuid enamasti on sisaldused foonilised. Haruldaste muldmetallide kõrge 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 üldgeoloogilised ja petrograafilised kirjeldused heal tasemel, kuid elementide sisaldused (ennekõike jälgelemendid) määrati peamiselt väheusaldusväärse poolkvantitatiivse spektraalanalüüsiga ning enamasti ei pööratud tähelepanu täna toimuvaks rohepöördeks oluliste tehnoloogiliste metallide esinemisele.

Praeguse seisuga ei ole Eesti aluskorra kristalsetes kivimites teada maagistumisi, millel oleks kohene arvestatav majanduslik potentsiaal. Siiski, 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 põhjust oletada sellist tüüpi mineralisatsiooni esinemist ka Eesti kristalises aluskorras.

Maagistumispotentsiaal 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 NW–SE suunalise orientatsiooniga petrooloogiliselt ja geokronoloogiliselt seotud tektooniliste domeenide vööndi (Joonis 2). Bergslagen on ajalooliselt tuntud maagistumise provints, kus erinevate metalliliste maavarade kaevandamine on olnud pidev 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 mlj 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 maagiproovintsis 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 maagiproovintsi on enam kui 1000-aastase kaevandamise ajaloo jooksul loodud tuhandeid kaevandusi, peamiselt Fe ja värviliste metallide sulfiidide kaevandamiseks (Joonis 3).



- Raua-, mangaani- ja volframimaardlad
 - Värviliste metallide ja rauamaardlad ning sulfiidsed maardlad
 - Mittemetallide maardlad
 - Rikked
 - Neoproterosoikumi ja alampaleosoikumi settekiivimid
 - Graniidid ja kvarts-süeniidid (Mesoproterosoikum), Teadmata vanusega leeliselised intrusiivsed kivimid
 - Doleriit (Mesoproterosoikum)
 - Purdkivimid (Mesoproterosoikum)
 - Intrusiivsed või metaintrusiivsed kivimid (GSDG; 1,70–1,67 mld a)
 - Intrusiivsed kivimid (GP; 1,85–1,75 mld a)
 - Intrusiivsed või metaintrusiivsed kivimid (GSDG; 1,81–1,78 mld a)
 - Intrusiivsed või metaintrusiivsed kivimid (GSDG, GDG; 1,87–1,84 mld a)
 - Intrusiivsed või metaintrusiivsed kivimid ning gneisid (GSDG, GDG; 1,90–1,87 mld a)
 - Svekofenni metavulkaniidid ja soonkivimid (1,91–1,89 mld a)
 - Kristalsed karbonaatsed kivimid
 - Svekofenni metasetted
- GDG - Graniit-dioriit-gabbro
 GSDG - Graniit-süeniit-dioriit-gabbro
 GP - Graniitpegmatiit

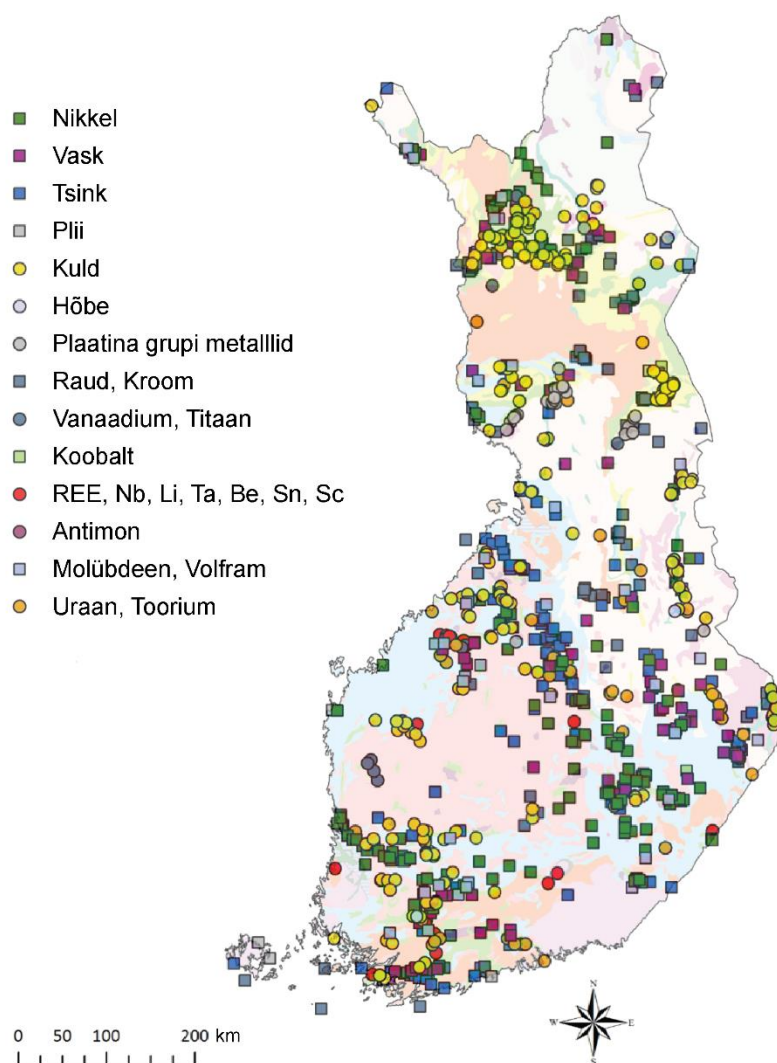
Joonis 3. Maagistumise levik Bergslageni maagistumisprovintsis Kesk-Rootsis. Kaardil näidatud geoloogilisel kaardil erinevat tüüpi leiukohad ja aktiivsed kaevandused. (Stephens *et al.*, 2009)

Valdav enamus Bergslageni provintsi maagistumisnähtustest esineb graniitsetes metavulkaniitides ja nendega seonduvates/vahelduvates (tihti skarnistunud) karbonaatses metasetendites. Olulisim maagistumisperiod Bergslagenis seonduv otseselt Svekofenni orogeneesi migmatiseerumise ja granitiseerumise faasiga, mille maksimumi dateeritakse Bergslagenis 1,89–1,88 mld aastaga

(Lundström, 1998) ning mis struktuurselt seostub aktiivse kontinentaalse ääre saarkaarte süsteemi magmatismiga (Allen *et al.*, 1996) ja sellest tuleneva sünvulkaanilise hüdrotermaalse mineralisatsiooniga (sh intensiivne eksalatiivne ookeanipõhja hüdrotermaalne mineralisatsioon – *sedimentary exhalative deposits - SEDEX*). Järgnenud regionaalmoondega 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-galeniiidi 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 geoloogilise ehituse, maagistumise leviku ja seda kontrollivate struktuuride osas on kõrge detailsusega Fe, värviliste ja väärismetallide ressursside osas. Siiski käivitas Rootsi Geoloogiateenistus juba 2017. aastal uue multidistsiplinaarse geofüüsikalise-geokeemilise kaardistamise programmi Bergslageni piirkonna taastuveneergetika lahenduste ülesehitamiseks 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 SE-suunalise vööndina sarnaste mineraloogiliste-geokeemiliste omadustega Jõhvi magnetilise anomaalia suunas.



Joonis 4. Metallide maagistumise levik Soome kristalsetes kivimites (GTK, 2020)

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

Lõuna-Soomes on tuntud Au-mineralisatsioon, mis levib peamiselt Edela-Soome Bergslageni struktuurse analoogi piirkonnas Orijärvis. Samuti ka Ag-Au-Cu-Pb-Zn epigeneetilised ning Bi-Te assotsiatsiooniga seotud orogeense tekkemehhanismiga Au-mineralisatsioonid, mis on sarnase

mineraloogilise assotsiatsiooni ja geokeemilise iseloomuga Jõhvi magnetiitgneisside Au-Ag ilmingutega ja levivad Edela-Soome Isovesi ja Jokisivu piirkonnas (Eilu *et al.*, 2003).

Eesti kristalse aluskorra potentsiaalsete maavarade otsingute- uuringute fookus

Eesti kristalse aluskorra potentsiaalsete maavarade otsingud ja uuringud peavad keskenduma maavaradele, mis on potentsiaalsed Eesti aluskorraga rööbistuvates Fennoskandia maagistumisproviintides.

2021. aastal ilmus Põhjamaade (Soome, Taani-Gröönimaa, Rootsi, Norra ja Island) geoloogiateenistuste koostöös aruanne (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. Lähtudes sellest aruandest on Eesti kristalse aluskorra geoloogilise ehituse kontekstis põhjendatud eelkõige järgmiste metallide otsingud-uuringud (Tabel 1).

Tabel 1. Metallide loend, mille otsingud on praeguste teadmiste kohaselt põhjendatud

| Metall | Kasutusvaldkond | Esinemismvorm | Fennoskandia rööbistuvad struktuurid | Potentsiaalne leviala |
|--------------------------------|---|--|--|---|
| Bi – Vismut | Elektroonika ja keemiatööstus | Au-Co maagistumise kaasprodukt | Bergslagen | Tallinna, Tapa ja Jõhvi tsoonid |
| Co – Koobalt | Akumetall, terasetööstus | Kaasneb Ni-maagistumisega | Bergslagen, Kesk-Soome saarkaarte kompleks | Põhja-Eesti, Lääne-Eesti ja Alutaguse tsoon |
| In – Indium | Elektroonikatööstus, CIGS päikesepaneelid | Kaasneb Zn-maagistumisega | Bergslagen | Põhja-Eesti, Lääne-Eesti tsoon |
| Li – Liitium | Akumetall | Li-pegmatoidid (spodumeen) | Pegmatoidsed intrusioonid | Põhja- ja Lääne-Eesti |
| REE – Haruldased muldmetallid | Kütuseelemendid ja supermagnetid | Pegmatoidid, intrusiivid | Pegmatoidsed intrusioonid | Põhja-Eesti (Tallinna ja Jõhvi tsoonid), Lääne-Eesti pegmatoidsed graniidid ja anortosiit-rabakivide intrusioonid |
| Ta ja Nb – Tantaal ja Nioobium | Terasetööstus (erisulamid) | Pegmatoidid | Pegmatoidsed intrusioonid | Põhja-Eesti (Tallinna ja Jõhvi tsoonid) pegmatoidsed graniidid |
| W – Volfram | Terasetööstus (kövasulamid) | Skarnistumine | Bergslagen | Põhja-Eesti |
| Cu ja Ni – Vask ja Nikkel | Elektroonika ja energeetika | Sulfiidne maagistumine | Bergslagen, Kesk-Soome saarkaarte kompleks | Põhja-Eesti, Lääne-Eesti ja Alutaguse tsoonid |
| Ag ja Au – Hõbe ja Kuld | Elektroonikatööstus | Cu-Ni ja Zn-Pb maagistumisega kaasnev | Bergslagen | Tallinna, Tapa ja Jõhvi tsoonid |
| PGM - Plaatina grupi metallid | Elektroonika-, auto- ja meditsiinitööstus | Aluselises ja ultraaluselises intrusioonides | Kesk- ja Põhja-Soome | Postorogeensed aluselised ja ultraaluselised intrusioonid üle Eesti |

Eesti kristalse aluskorra maavarade potentsiaali selgitamise eesmärk ning otsingute-uuringute tegevuskava

Kristalse aluskorra uuringute eesmärk on selgitada võimaliku majandusliku potentsiaaliga maavarade maagistumisvööndite ja struktuuride esinemine Eesti kristalses aluskorras. Lähtudes Eesti kristalse aluskorra geoloogilise ehituse seaduspärasustest ning aluskorra lasumissügavusest, saavad olla põhjendatud vaid strateegilise tähtsusega haruldaste ja/või hajutatud kõrgtehnoloogiliste ning väärismetallide otsingud ja uuringud.

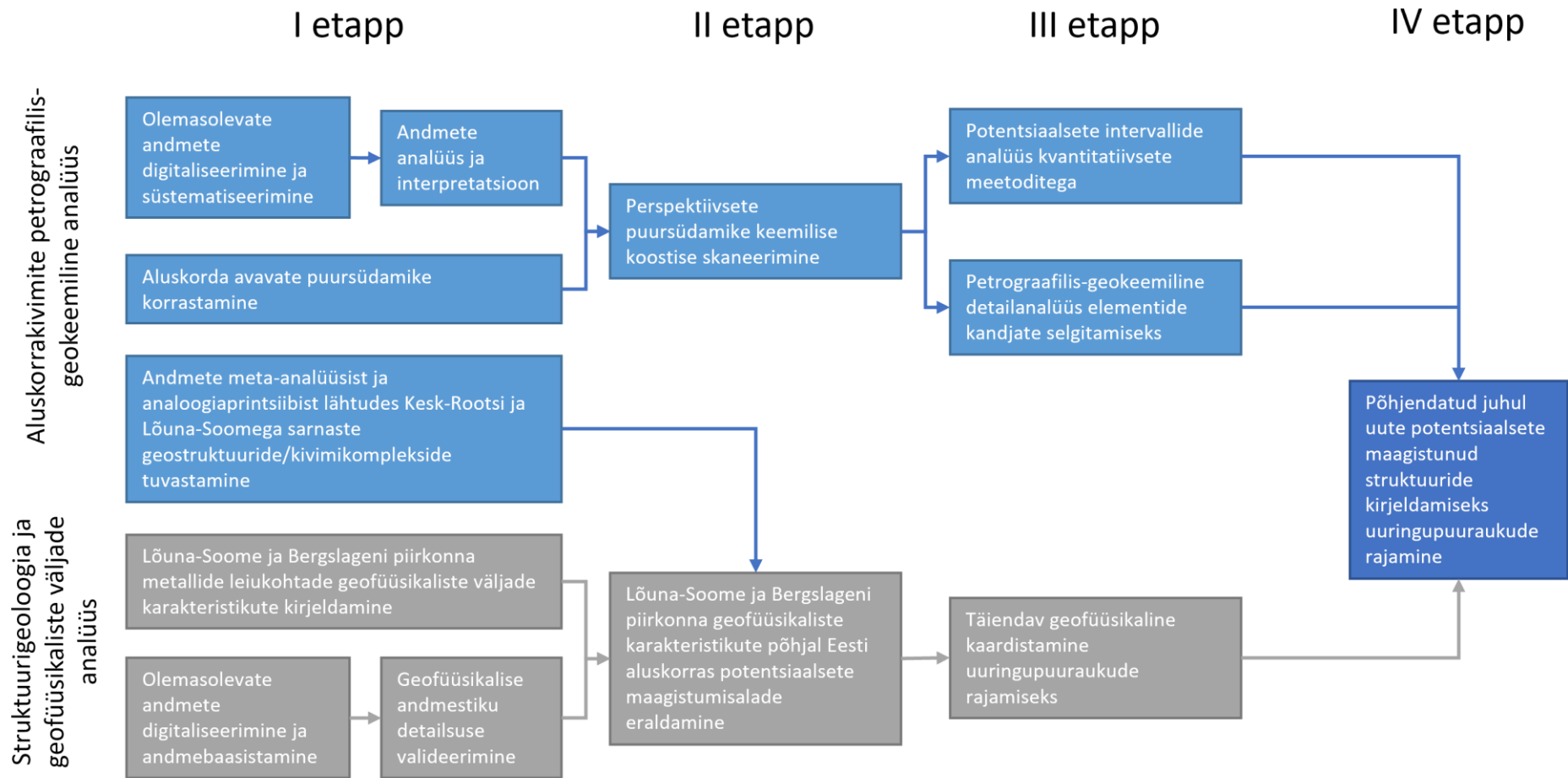
Metalliliste toormete otsingute ja uuringute fookuse dikteerib Eesti kristallilise aluskorra geoloogilise ehituse sarnasus Kesk-Rootsi ja Lõuna-Soome geoloogiliste struktuuridega ning põhitähelepanu peab olema nendes teada olevate ja/või perspektiivsete maagiprovincside ja -ilmingute analoogide otsingutel.

Kavandatavad tegevused jagunevad üksteisele järgnevateks etappideks, kus iga eelneva etapi tulemused on aluseks järgneva etapi kavandamisel ja täitmisel (Joonis 5).

Aluskorrauuringute etapiviisilised tegevused jagunevad kahte alamteemasse:

- aluskorrakivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs;
- struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs.

Mõlema alateema esimese etapi ülesandeks on olemasoleva geoloogilise info korrastamine, analüüs ja interpretatsioon.



Joonis 5. Kavandatud tegevused Eesti kristalse aluskorra strateegiliste maavarade potentsiaali selgitamiseks

Aluskorrakivimite petrograafilis-geokeemiline analüüs

Esimese alateema raames viiakse läbi järgmised tegevused:

- aluskorda avavate puursüdamike korrastamine ja andmebaasistamine;
- olemasolevate petrofüüsikaliste, keemiliste ja mineraloogiliste/petrograafiliste andmete digitaliseerimine, analüüs ja geoloogiline interpretatsioon;
- aluskorra kivimite olemasolevate petrograafiliste ja struktuursete kirjelduste analüüs ning analoogiaprintsiibist lähtudes (Kesk-Rootsi ja Lõuna-Soomega) sarnaste geostruktuuride/kivimikomplekside tuvastamine.

Eesti aluskorda on rajatud enam kui 500 puurauku. Nõukogude perioodil läbi viidud süvakaardistamise peamiseks eesmärgiks oli maavarade otsing, tänu millele uuriti puuritud 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 polarisatsiooni mikroskoopia meetodil.

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

Kuna vastavalt nende puursüdamike puurimise ajal kehtinud geoloogilise otsingu meetodikale 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 digitaliseerimine ja analüüs vajalik järgnevate etappide teostamiseks.

Esimese alateema teise etapi ülesandeks on esimeses etapis koondatud info analüüsile tuginedes välja valitud perspektiivseimate ja huvipakkuvamate kristalse aluskorra puursüdamike ja/või nende valitud lõikude keemilise koostise (põhi ja jälgelementid va kerged elementid - Be, Li) skaneerimine röntgenfluoresents spektromeetria (XRF) meetodil potentsiaalsete eelpool loetletud elementide maagistumisilmingute tuvastamiseks ja/või kontrollimiseks. Kuna XRF meetodil ei ole võimalik määrata kerge elementide levikuga seonduvaid mineraalseid muutusi, siis on vajalik ka teiste geokeemilis-mineraloogiliste ekspressmeetodite (portatiivne Raman spektroskoopia, LIBS) kasutusele võtmine.

Paralleelselt aluskorra kivimite keemilise koostise kaardistamisega tuleb kaaluda aluskorra geokeemiliste anomaaliate tuvastamist vahetult aluskorral lasuvates ümbersetatud

murenemiskoorikutes, Ediacara settekompleksi alumistes kihtides ja Lääne-Eestis aluskorral lasuvates Kambriumi setendites. Analüüsida tuleb ka teiste kaudsete geokeemiliste meetodite, nagu maavaraotsingu eesmärgil läbiviidav pinnakatte süstemaatiline geokeemiline kaardistamine, rakendamise võimalusi Eestis.

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

Neljanda etapi eesmärk on uute potentsiaalsete maagistunud struktuuride tuvastamiseks uuringupuuraukude rajamine, et analüüsida seal levivaid kivimeid. Uute puuraukude rajamine on põhjendatud vaid eelnevalt detailselt iseloomustatud ja põhjendatud struktuuride avamiseks.

Struktuurigeoloogia ja geofüüsikaliste väljade analüüs

Teise alateema esimese etapi eesmärgiks on analüüsida geostruktuurselt Kesk-Rootsis ja Lõuna-Soomes levivaid aluskorrakivimeid, mis on rööbistatavad Eesti aluskorra struktuursete plokkidega. Bergslageni maagiprovinci (laiemas mõttes) ja Lõuna-Soome struktuurigeoloogiline, geofüüsikaline ja metallogeneetiline analüüs keskendub eestkätt Eestis potentsiaalselt leviva maagistumise geneetilistele tüüpidele. Arvestades esimese alateema käigus kirjeldatud maagistumisilminguid, 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 puurimistöde ettevalmistamiseks järgnevates etappides. Sealhulgas peab esimese etapi analüüsist selguma, kas täiendav geofüüsikaline kaardistamine seni madala detailsusega aeromagnetomeetriliselt kaardistatud Kirde-Eesti aladel on, lähtudes maavarade perspektiivist, 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 (magnetomeetria, gravimeetria, põhjendatud juhtudel teised meetodid) geofüüsikalisi uuringuid.

Teekaardi elluviimine ja ajakohastamine

Käesolevas dokumendis määratletud tegevuste põhitäitja ja koordineerija on Eesti Geoloogiateenistus, kes teeb selle raames tihedat koostööd Eesti ülikoolidega.

Teekaarti vaadatakse üle ja uuendatakse vastavalt vajadusele, kuid mitte harvem kui iga nelja aasta tagant.

Kasutatud kirjandus

- 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.
- 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.
- Keskkonnaministerium, 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.

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.

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

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.

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., Pöldvere, 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 Kärdla, 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.