

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

**Ultraaluseliste ja aluseliste kivimite määramine masinõppe meetodil kasutades
XRF andmeid puursüdamike F149 ja F270 näitel**

Karel Pettai

Juhendaja: Johannes Vind

Tartu 2025

Ultraaluseliste ja aluseliste kivimite määramine masinõppe meetodil kasutades XRF andmeid puursüdamike F149 ja F270 näitel

Käesoleva magistritöö eesmärk oli katsetada masinõppe meetodite sobivust ultraaluseliste ja aluseliste kivimite tuvastamiseks kasutades XRF andmeid puursüdamikest F149 ja F270. Uuringu andmed pärinevad Geotek MSCL-XYZ skaneerimisjaamast, mis töödeldi ja analüüsiti kasutades DataMosaic tarkvara. Töö tulemusel loodi mõlemast puursüdamikust pseudoloogid, mida võrreldi olemasolevate geoloogiliste kirjeldustega. Tulemused näitasid, et mitmed masinõppega tuvastatud aluselised intervallid kattusid varem kirjeldatuga. Samas jäid happelised ja moondelised kivimid raskesti eristatavaks ja sama ilmekalt ei kajastunud. Kokkuvõttes osutus meetod tõhusaks aluseliste kivimite tuvastamisel ja võib pakkuda laialdasemat kasutamist Eesti aluskorra uuringutes.

Märksõnad: masinõpe, Data Mosaic, kristalne aluskord, aluselised kivimid

CERC kood: P420 - petroloogia, mineraloogia, geokeemia

Identification of ultramafic and mafic rocks using machine learning methods based on XRF data from drill cores F149 and F270

The aim of this master's thesis was to test the suitability of machine learning methods for identifying ultrabasic and basic rocks using XRF data from drill cores F149 and F270. Data for the study was obtained using the Geotek MSCL-XYZ scanning system, which was processed and analyzed using Data Mosaic software. As a result, pseudo logs were created for both cores, which were then compared to existing geological descriptions. The results showed that using machine learning, several identified basic rock intervals corresponded with previously described units. However, felsic and metamorphosed rocks remained difficult to distinguish and were not reflected as clearly. In conclusion, the method proved effective for identifying basic rocks and may offer further applicability in studies of Estonia's crystalline basement.

Keywords: machine learning, Data Mosaic, crystalline basement, mafic rocks

CERC code: P420 - petrology, mineralogy, geochemistry

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Eesti kristalne aluskord.....	6
2. Ultraaluselised ja aluselised kivimid.....	9
2.1. Ultraaluselised ja aluselised kivimid Eestis.....	12
2.2. Maagistumise ilmingud.....	13
3. Materjal ja meetodika.....	14
3.1. Uuritavad puursüdamikud.....	14
3.2. Geotek Multi-Sensor Core Logger – XYZ.....	15
3.2.1. Skaneerimise töökäik.....	16
3.2.2. XRF andmestik.....	16
3.3. Data Mosaic.....	19
3.4. Andmetöötlus.....	21
3.4.1. Andmete korrastamine ja valideerimine.....	21
3.4.2. Nullväärtuste asendamine.....	23
3.4.3. Andmestiku normaliseerimine.....	23
3.4.4. Pseudologi loomisel kasutatavate elementide valik.....	25
3.4.5. Data Mosaic kasutatavad parameetrid.....	26
4. Tulemused ja arutelu.....	27
4.1. Pseudologide loomine kasutades Data Mosaic tarkvara.....	27
4.1.1. Kivimtüüpide klassifitseerimine.....	29
4.2. Puursüdamiku F149 pseudologi kõrvutatud olemasoleva litoloogilise tulbaga.....	38
4.3. Puursüdamiku F270 pseudologi kõrvutatud olemasoleva litoloogilise tulbaga.....	41
4.4. Pseudologide kattuvus varasema kirjeldusega.....	45
4.5. Edasised tegevused.....	46

4.6. Data Mosaic kasutamise kogemusest	48
Kokkuvõte.....	50
Summary.....	51
Tänuavaldused	52
Kasutatud kirjandus	53
Lisad	55
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	56

Sissejuhatus

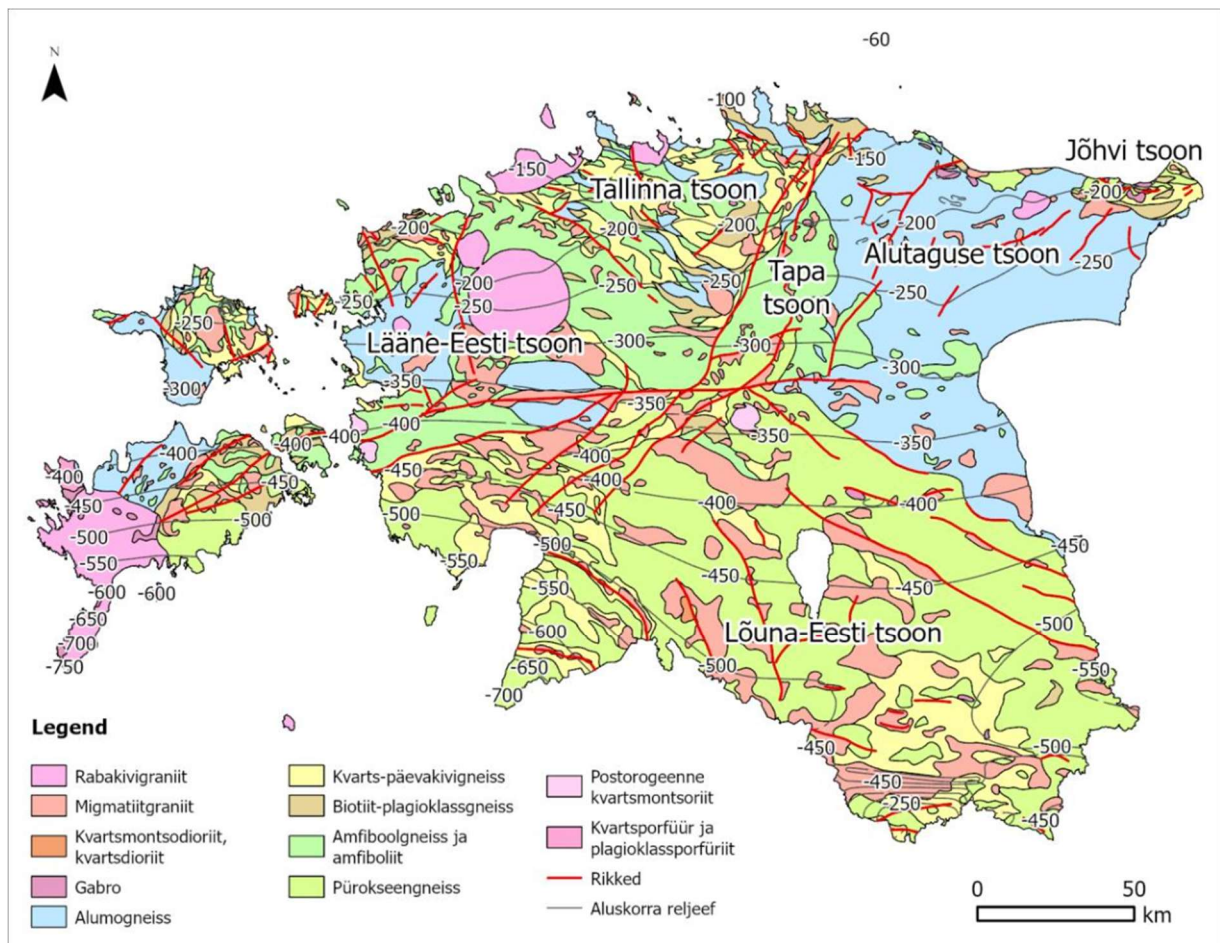
Puursüdamiku detailne geoloogiline kirjeldamine on oluline etapp maavarade uuringutes, mis annab sisendi lisauuringuteks või uuringute peatamiseks. Detailne kirjeldus määrab väljatud kivimi omadused, potentsiaalse tulevase väärtuse ja lasumuselemendid ehk paiknemise ja kuju maa sees. Üldiselt nõuab detailne südamiku kirjeldamine aega, teadmisi ja ressursse, mis tavaliselt ei ole probleemiks, sest uuritakse maagistumist juba kinnitatud asukohas. Olukorras, kus uuritava kivimi majanduslik kasu ja tulevane väärtus pole garanteeritud, puudub otsene resurss südamiku kirjeldamist teostada seni levinud meetoditel. Eestis alustati kristalse aluskorra uuringuid 1960ndatel, millest saadud andmed ei ole tänapäevastele rahvusvahelistele standarditele uuendatud. See ei tähenda, et varasemad kirjeldused oleks valed või mitte kehtivad, vastupidi; kogu meie hetkeline teadmine põhineb süstemaatilisel ja professionaalsel tasemel kirjeldustel, aga kasutades tänapäevaseid andmetötluse võimalusi ja uuemaid kvantitatiivseid meetodeid on võimalus olemasolevad puursüdamikud üle kontrollida, andmeid täiendada ning täpsustada ja omavahel ühildada, et saada terviklik pilt kivimite lasumusest ja paiknemisest meie jalge all.

Esimene etapp vanade puursüdamike kontrollimisel tehti Eesti Geoloogiateenistuse poolt kasutades uudset skaneerimisjaama Geotek MSCL-XYZ ja mille uuringu tulemused avaldati eelmisel aastal (Nirgi *et al.* 2024). Eelmainitud uuring käsitles osa olemasolevast puursüdamike kogust; loodi vabalt kättesaadav andmebaas käsitletud aluskorra kivimitest ja toodi välja potentsiaalsed maagistumise ilmingud.

Käesolevas töös kasutatakse Nirgi *et al.* 2024 töö andmeid ja varasemalt aluskorda süstematiseerinud Kivisilla *et al.* 1994 ja Niin 2002 tööd, et katsetada tänapäevast masinõppe meetodit puursüdamiku kirjeldamisel kasutades skaneerimisjaama andmeid. Töös keskendutakse ultra-aluseliste ja aluseliste kivimitele, mis on meie aluskorras tihti moondeprotsesse läbinud, tehes visuaalse tuvastamise ülejäänud kivimist raskeks. Samuti on töö eesmärk käsitleda potentsiaalset uuringumeetodit, mida sobiks rakendada kogu Eesti kristalsele aluskorrale.

1. Eesti kristalne aluskord

Eestis lasub kristalne aluskord lasub ligikaudselt 100-800m sügavusel, mida katab ulatuslik Ediacra kuni Devoni ajastu settekivimite kompleks, mis tuleneb selle asetsemisest Fennoskandia kilbi lõunanõlval. Aluskord on pikajalise erodeerimise ja kulutuse tagajärjel tagajärjel 0.10°-0.20° lõuna suunas kaldu. Settekivimite all lasuv kristalne aluskord koosneb Paleo- ja Mesoproterosoikumist pärit moonde- ja tardkivimitest, dateeritud ajavahemikku ligikaudu 1,93-1,54 Ga (Kirs *et al.* 2009), mille vanim osa koosneb Svekofenni orogeneesi käigus subduktsiooniga seotud mitme saarkaarte süsteemi kokkupõrgete tulemusel moodustunud tard- ja moondekivimite kompleksist ning noorema osa moodustavad postorogeensed tardkivimid, eelkõige rabakivide pluutonid. (Koppelmaa 2002; Soesoo 2004; Soesoo *et al.* 2020).



Joonis 1. Eesti aluskorra geoloogiline kaart. (Koppelmaa 2002; EGT 2023).

Eesti kristalne aluskord on jagatud kaheks suuremaks geoloogiliseks üksuseks: Põhja-Eesti amfiboliitne faatsies ja Lõuna-Eesti granuliitne faatsies, mis on eraldatud üksteisest Paldiski-Pihkva murrangutsooni tektoonilise piiriga (Soesoo *et al.* 2004; Soesoo *et al.* 2020). Eelmainitud üksused on omakorda jagatud geofüüsikaliste, struktuursete ja petrooloogiliste omaduste alusel kuueks tsooniks: Tallinna, Alutaguse, Jõhvi, Tapa, Lääne-Eesti ja Lõuna-Eesti tsooniks (Puura *et al.* 1983 *cit.* Koppelmaa 2002; Soesoo *et al.* 2004; Soesoo *et al.* 2020). Vastavalt eelmainitud allikatele on kuute tsooni iseloomustatud järgmiselt:

Tallinna tsoon koosneb varieeruvalt aluselitest amfiboliit-faatsiese metavulkaniitidest ja metasetenditest, levinumad kivimid on amfibool-, biotiit-plagioklass, kvarts-päevakivi-, vilgu-, sulfiidid grafiit- ja magnetiit-kvartsiitgneisid, lisaks levib alal laialdane migmatiseerumine. Struktuurselt on tsoon eraldatud Lääne-Eesti tsoonist regionaalsete Proterosoiliste murrangutega (Paldiski – Pihkva rikkevöönd) ja Tapa tsoonist tektooniliste rikete vööndiga (Tapa-Pärnu rikete vöönd). Lisaks on Tallinna tsoonile iseloomulik madal gravitatsiooni- ja magnetväli. (Koppelmaa 2002; Soesoo *et al.* 2004; Soesoo *et al.* 2020).

Alutaguse tsoon koosneb peamiselt amfiboliit-faatsiese metasetenditest, mis on kohati tugevalt migmatiseerunud, esineb ka granuliidifaatsies Sonda-Uljaste ja Haljala piirkonnas. Levinumad kivimid on Al-rikkad, biotiit-plagioklass, küünekivi-, kvarts-päevakivigneisid ja amfiboliidid. Alutaguse tsoonile on iseloomulik madal ühtlane gravitatsiooni- ja magnetväli, mis eristab seda tugevast Jõhvi anomaaliast. (Koppelmaa 2002; Soesoo *et al.* 2004; Soesoo *et al.* 2020).

Jõhvi tsoon koosneb migmatiseerunud metavulkaniitidest, levinumad kivimid on migmatiseerunud pürokseen-, kvarts-päevakivi-, biotiit-plagioklass, amfibool- ja granaat-kordieriitgneisid, lisaks alale iseloomulikku magnetanomaaliat põhjustavad magnetiitgneisid. Osaliselt levib ka granuliidifaatsiese tekketingimustele vastavaid kivimeid, nagu Vaivara kompleks. Jõhvi tsooni iseloomutab tugev gravitatsiooni- ja magnetväli, teisisõnu Jõhvi magnetanomaalia. (Koppelmaa 2002; Soesoo *et al.* 2004; Soesoo *et al.* 2020).

Tapa tsoon koosneb amfiboliidi- ja granuliidifaatsises migmatiidistunud metabasiitidest, levinumad kivimid on granaat- ja pürokseenkvartsiidid, Al-rikkad pürokseen-, amfibool- ja biotiitgneisid koos kõrge Fe ja S sisaldustega. Struktuurselt on tsoon eraldatud Alutaguse ja Tallinna vööndist struktuursete riketega, mis laialdaselt levivad ka tsoonis endas. Tapa tsoonile on iseloomulik

positiivsete gravitatsiooni- ja magnetanomaaliate levik. (Koppelmaa 2002; Soesoo *et al.* 2004; Soesoo *et al.* 2020).

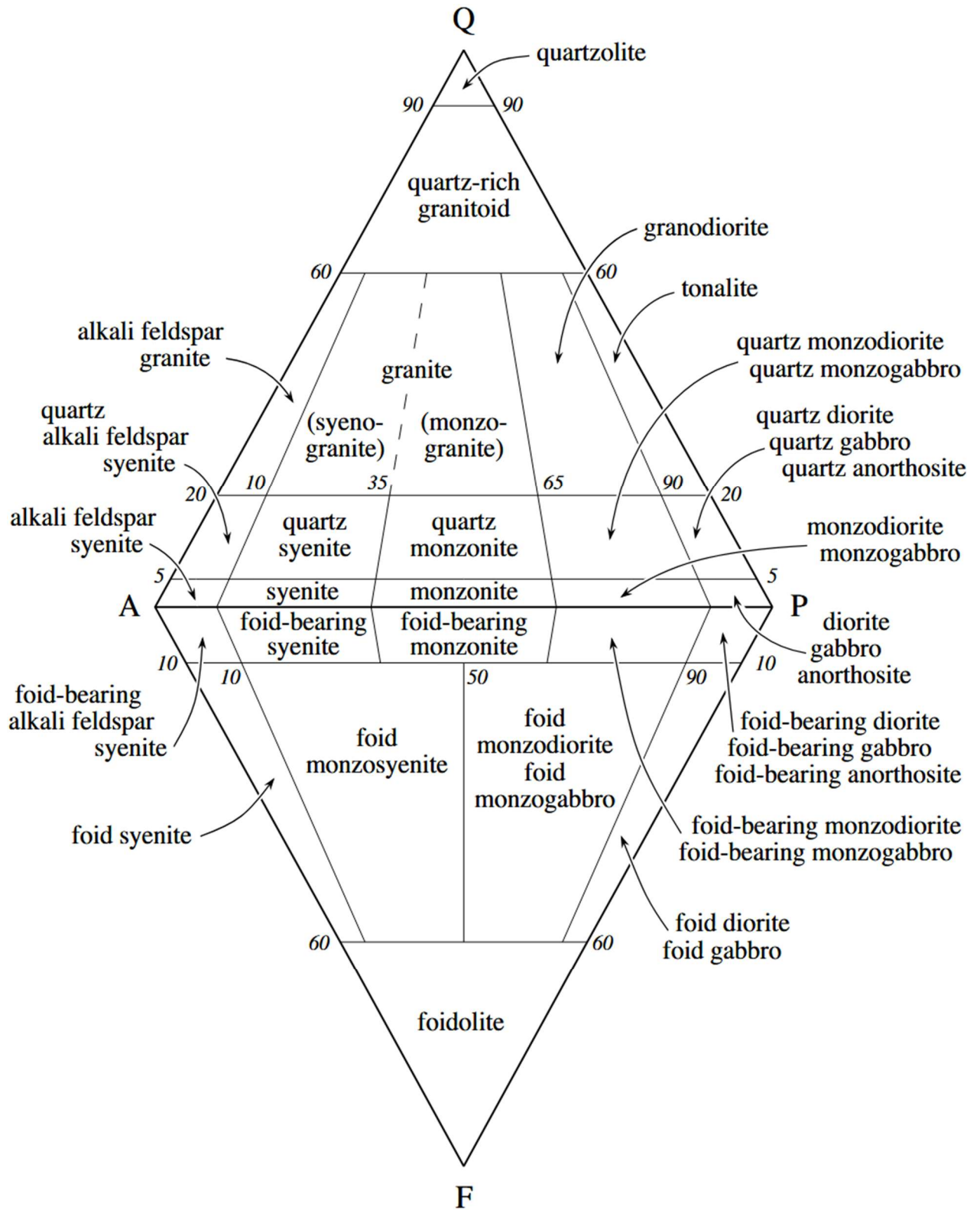
Lääne-Eesti tsoon koosneb amfiboliit-faatsiese metasedimentidest ja kohati granuliidifaatsiese kivimitest, milles esineb migmatiseerumist ja tšarnokiitseid sooni. Levinumad kivimid on amfiboliidid, biotiit-plagioklass ja amfiboliitse kuni granuliitse faatsiese kvarts-päevakivigneisid. Tsooni läbivad mitmed Proterosoilised rikkevööndid. Lääne-Eesti tsoonile on iseloomulik jooneliste magnetiliste anomaaliate levik. (Koppelmaa 2002; Soesoo *et al.* 2004; Soesoo *et al.* 2020).

Lõuna-Eesti tsoon koosneb granuliidifaatsiese metavulkaniitidest, mille levinumad kivimid on amfiboolpürokseeniit, biotiit-pürokseen- ja kvarts-päevakivigneisid. Struktuurselt eraldab tsooni Põhja-Eestis levivatest tsoonidest ulatuslik rikete vöönd. Ala iseloomustavad mitmete positiivsete gravitatsiooni- ja magnetanomaaliate levik. (Koppelmaa 2002; Soesoo *et al.* 2004; Soesoo *et al.* 2020).

2. Ultraaluselised ja aluselised kivimid

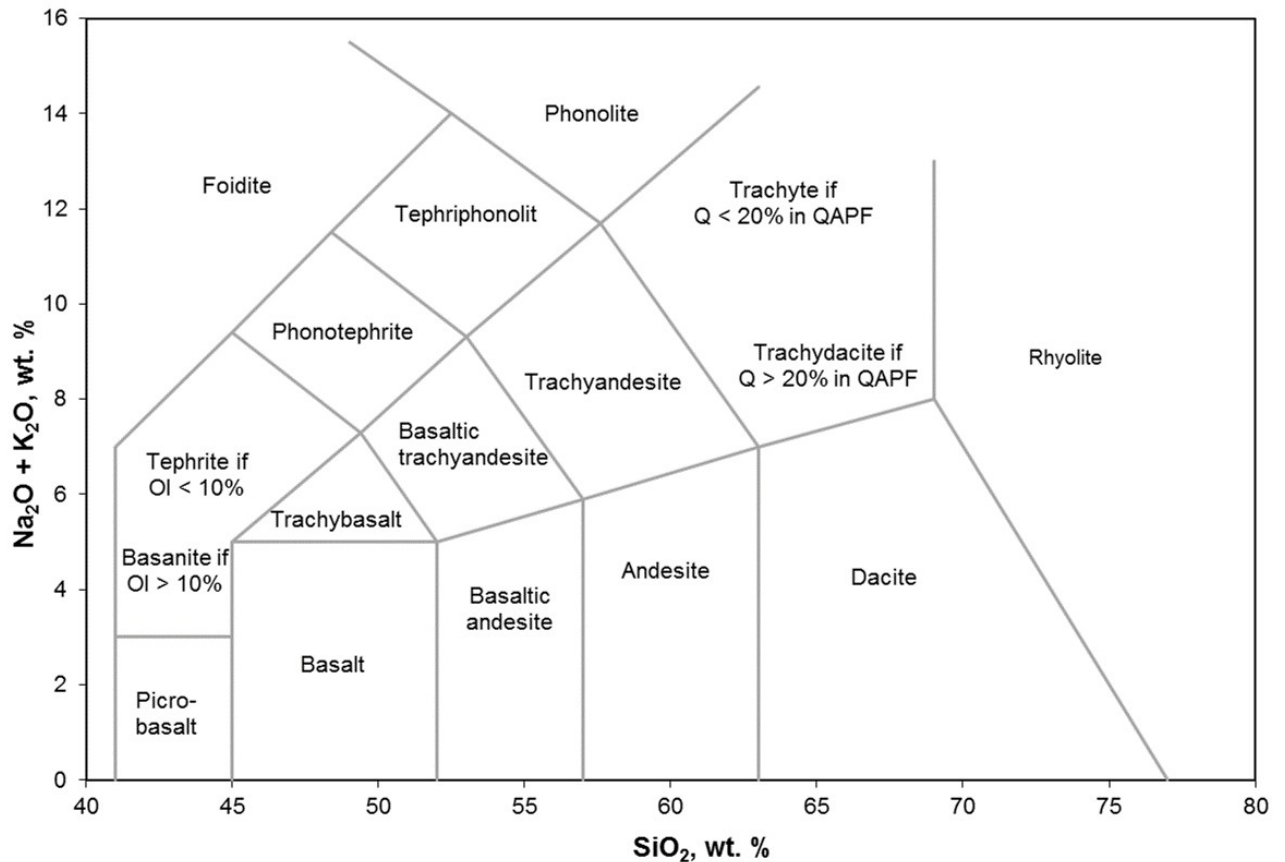
Ultraaluselised ja aluselised kivimid on pärit maa vahevöö osalisest sulamisest ja esinevad orogeenses vööndis läätsede või massiividenä. Eelmainitud kivimid on peamiselt seotud järgmiste geoloogiliste protsessidega: ofioliitsete komplekside sattumine kontinendile subduktsiooni käigus, jäänukid vanade kontinentaalsete laamade kokkupõrke piiridel ehk õmbluskohtades, riftistumise ja vulkanismiga. (Winter, 2010).

Üldiselt saab magmalise päritoluga tardkivimeid klassifitseerida vastavalt nende ränidioksiidi sisaldusele. Selline lähenemine sai alguse 18 sajandi lõpul H. Abichi tööst (Niin 2002), kasutades ränidioksiidi sisaldust kivimites, jagunevad need: <45% ultraaluseline, 45-52% aluseline, 52-66% keskmine, >66% happeline. Niin (2002) toob välja, et eelnev klassifitseerimine ei ole täiuslik, mõnikord on kivim klassifitseeritud keemilise koostist arvestades ultraaluseliseks, aga mineraalne koostis indikeerib pigem aluselisele kivimile (näiteks gabrod ja diabaasid). Seetõttu on usaldusväärsem rohkem levinud IUGS süsteem, mis loodi 90ndate alguses M. J. Le Bas ja A. L. Streckeiseni poolt ning täiendatud Le Maitre *et al.* (2002) poolt. Klassifitseerimiseks kasutatakse QAPF diagrammi (joonis 2), millel on mitmeid erimeid ja eelnimetatud diagrammi puhul tuleks kivimeid, mille aluseliste mineraalide kogus ületab 90%, klassifitseerida juba eraldiseisvate aluseliste kivimite diagrammiga. (Le Bas ja Streckeisen 1991 *cit.* Niin 2002; Le Maitre *et al.* 2002; Winter 2010).



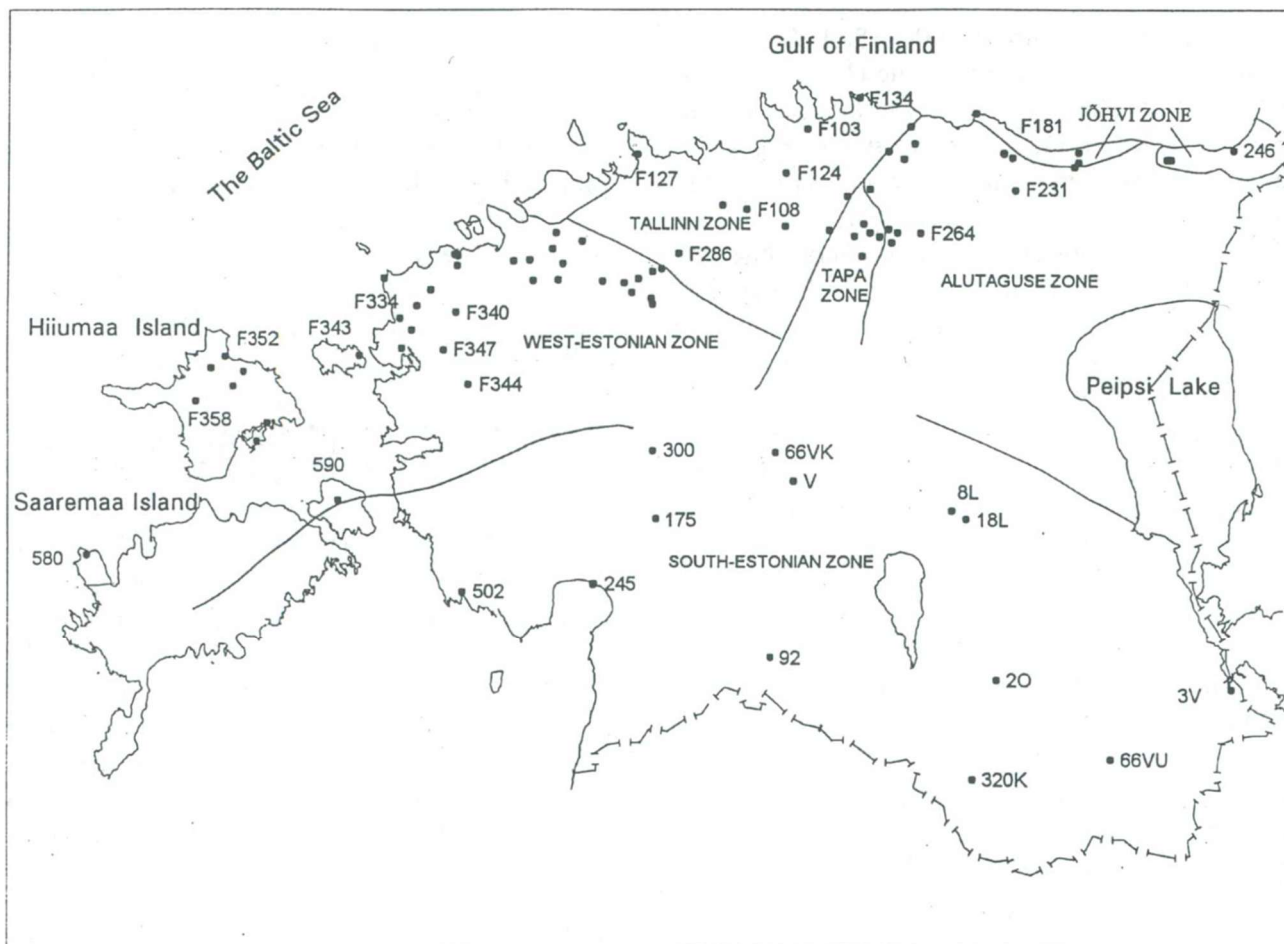
Joonis 2. QAPF diagramm, originaalselt Streickeisen (1976) poolt loodud. (Streickeisen 1976 *cit.* Le Maitre *et al.* 2002).

Olukorras, kus QAPF diagrammi kasutamine on raskendatud kivimi tekstuuri tõttu või on olemas keemiline koostis, võib tardkivimite klassifitseerimisel kasutada TAS diagrammi, originaalselt loodud Le Bas ja Streckeiseni poolt. TAS (*Total alkaline - Silicate*) diagramm põhineb $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ja SiO_2 suhtel. Le Maitre *et al.* (2002) toob esile ka olemasoleva diagrammi puuduse MgO ja TiO_2 rikaste tardkivimite klassifitseerimise puhul, mistõttu esineb ka antud diagrammile mitmeid erimeid vastavalt olukorrale. (Le Maitre *et al.* 2002; Winter 2010).



Joonis 3. TAS diagramm. (Le bas *et al.* 1986 cit. Le Maitre *et al.* 2002).

2.1. Ultraaluselised ja aluselised kivimid Eestis



Joonis 4. Ultraaluseliste, aluseliste või keskmiste kivimite esinemine puuraukudes. (Niin 2002).

Eestis esineb ultraaluseliseid kivimeid 4-s puursüdamikus, olles tihedalt seotud aluseliste kivimitega ja esinedes kitsaste sooneliste struktuuridena. Ultraaluseliseid kivimeid esindavad peridotiidid, serpentiniidid ja amfiboliidid. Aluseliseid kivimeid esineb 73-s puursüdamikus, millest omakorda pooled esinevad puhtalt Lääne-Eesti struktuurses võõndis. Aluseliseid kivimeid esindavad gabronoriidid koos metagabronoriitidega, gabrod koos metagabrodega, amfiboliidid ja osaliselt ka aluselised gneisid. (Kivisilla *et al.* 1994; Niin 2002).

Suurem osa eelmainitud kivimitest on geneesi poolest seostatud Svekofenni orogeneesiga. Ainult üksikuis puursüdamikes on aluseliste ja ultraaluseliste kivimite teke arvatud olevat seotud anorogeense geneesiga ehk hilisema tekkega. Struktuurselt on eristatavad suuremad massiivid ning väiksemad põhikivimit lõikavad sooned. Mõningaid ultraaluselilisi ilmingud, näiteks peridotiidi sooni puursüdamikus F149, on seostatud ka magma differentseerumisega suuremate magmakehade sees.

Niin (2002) toob välja, et Eestis esinevate ultraaluseliste ja aluseliste kivimite määramine on sageli keeruline, sest tardkivimite algne iseloomulik struktuur ja tekstuur on ulatuslike moonutusprotsesside, amfiboliseerumise, gneisistumise ja granitiseerumise tagajärjel hägustunud ja muutunud. Lisaks on kivimite piirid sageli järkjärgulised, moodustades moondesarja, mis-tõttu ilma väliselt selgelt nähtavate kivimpiiride kontaktideta muutub petrograafiline klassifikatsioon osaliselt subjektiivseks. (Niin 2002).

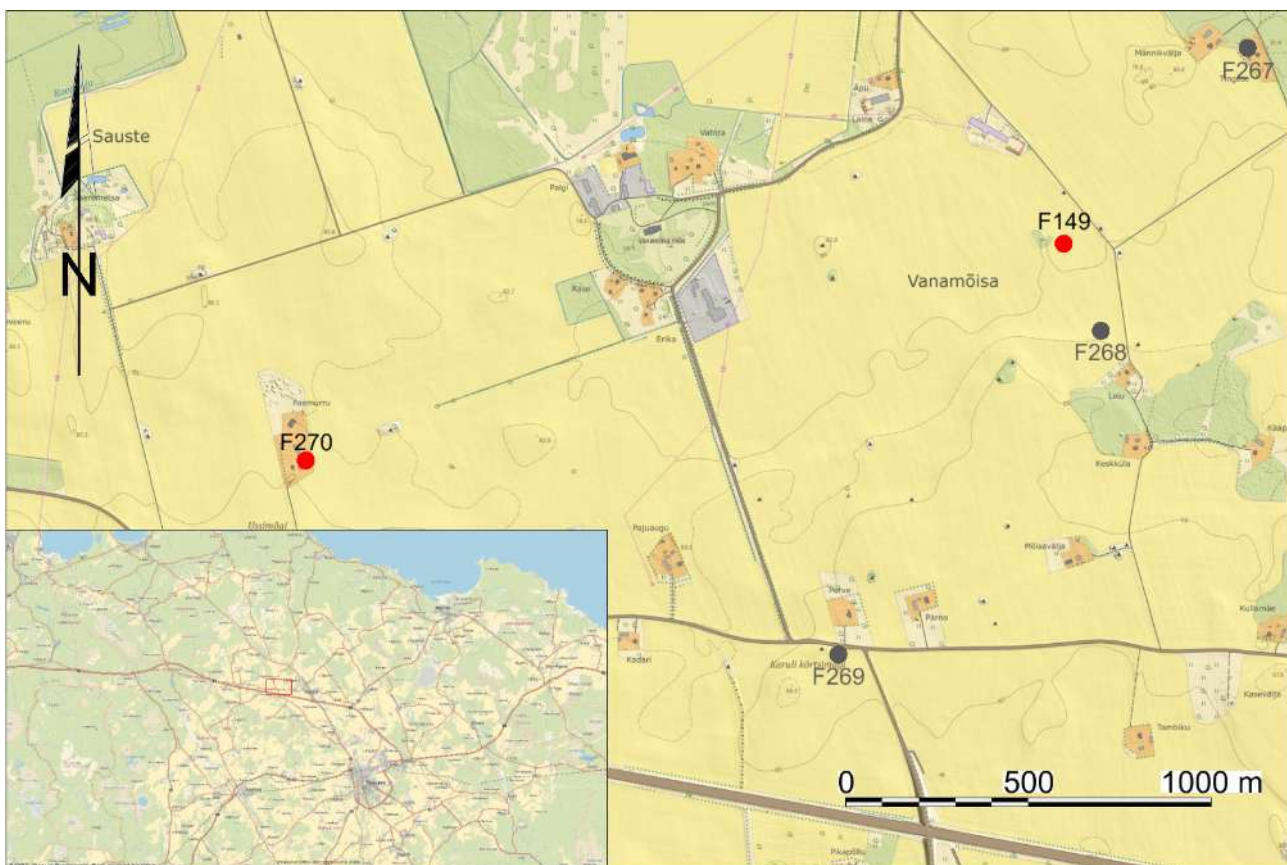
2.2. Maagistumise ilmingud

Ultraaluseliseid ja aluselisi kivimeid seostatakse mitme erineva maagistumise ilminguga, kõige levinumad on Ni-Cu-PGE, Cr (kromiit), Fe-Ti-V ja Fe-Ti-P maardlad (Ripley ja Li 2018). Eestis esinevate ultraaluseliste ja aluseliste tardkivimite maagistumise ilminguid esineb Mg rikaste amfiboliitide esinemisega, mis moodustunud komatiitsest ehk Mg-rikkast ultraluselisest tardkivimist (Niin 2002), lisaks on seostatud kõrgeid Ni ja Cr sisaldusi antud geneesiga kivimites (Soesoo *et al.* 2004; Koppelmaa 2002). Niin (2002) toob esile maagistumise poolelt ka Ti- ja P-rikka plutoonse Sigula diabaasi, millele viitab ka Soesoo *et al.* 2020, mainides sealsete gabrolistes kivimites esinevat ilmeniit-magnetiit ja magnetiit-apatiiitset mineralisatsiooni. Üldiselt ei sisalda Eestis avastatud ja uuritud aluselised kivimid üle 10% maakmineraale (Niin 2002). Koppelmaa (2002) märgib, et Eestis levivad ultraaluselid kivimid on üldiselt Mg, Ni ja Co vaesed, aga rikkamad litofiilsete elementide poolest (Ca, Pb, Sn, Ba, jt.).

3. Materjal ja meetodika

Töö käigus analüüsiti kahe kristalse aluskorra puursüdamikute, F149 ja F270, Röntgenfluorestsentspektromeetria (XRF) andmeid kasutades Data Mosaic tarkvara, et tuvastada ultraluselised ja aluselised vahemikud ning katsetada masinõppe meetodit Eesti aluskorra kivimitel. Töös kasutatud andmed on saadud kasutades skaneerimisjaama Geotek MSCL-XYZ Geotek XRF mõõteseadet ja andmed on avaandmetena saadaval Eesti Geoloogiafondis Nirgi *et al.* (2024) töös „Kriitiliste toormete ja nendega assotsieeruvate elementide tuvastamine ning uuringupotentsiaali hindamine Eesti aluskorras“ (EGF 9895). Enne käesoleva töö alustamist digitaliseeriti 2022. aastal Nõukogude Liidu aegseid spektraalanalüüsi ja vene keelseid õhikukirjeldusi, mille alusel skaneeriti 2023. aastal Eesti Geoloogiateenistuse suvepraktika raames osa kristalse aluskorra südamiketest, millest valmis Nirgi *et al.* (2024) töös kasutatud ja avaldatud andmestik.

3.1. Uuritavad puursüdamikud

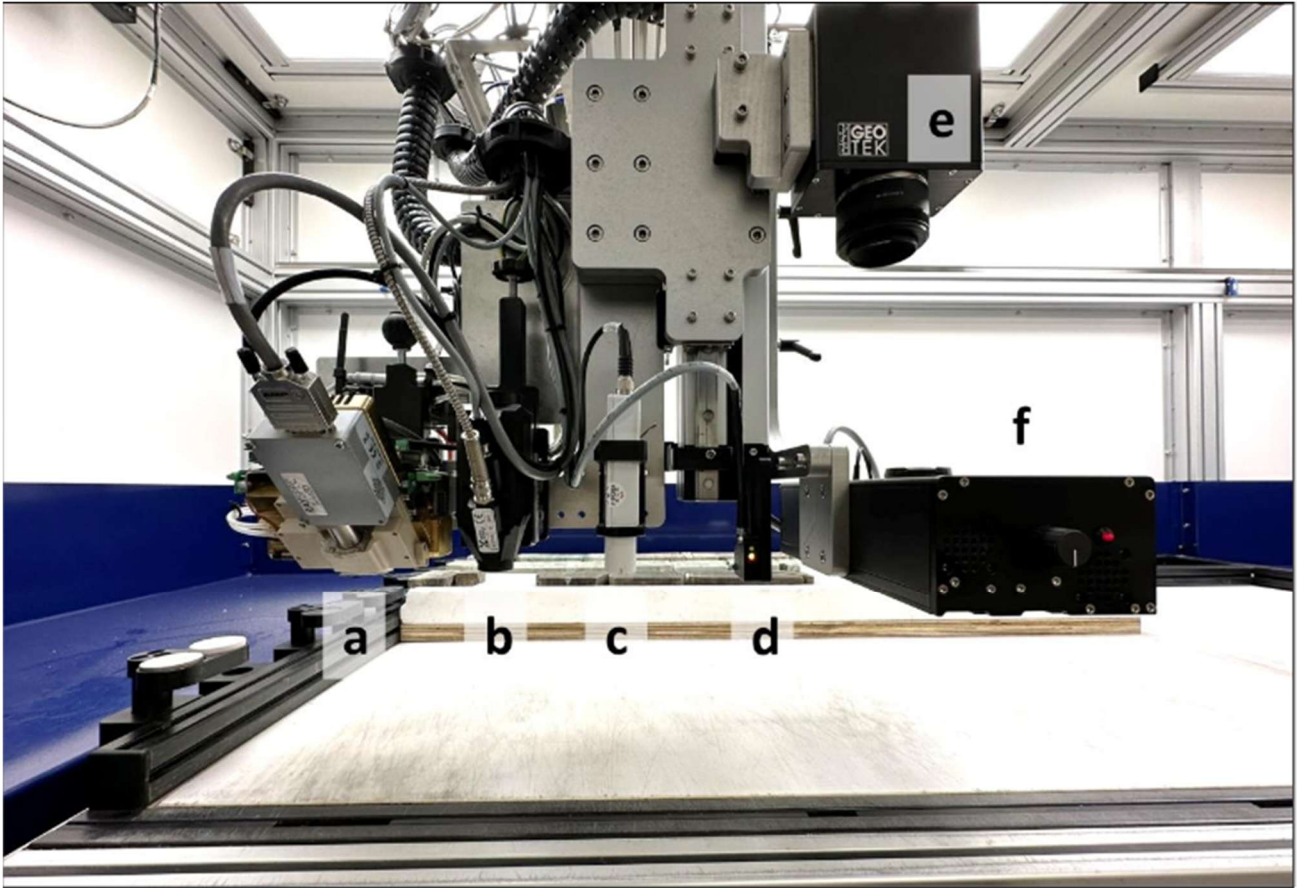


Joonis 5. Puuraugud F149 ja F270. Aluskaart ja andmed: Maa- ja Ruumiamet.

Töö keskendub kahele puursüdamikule, F149 ja F270, mis algselt pärit puuraukudest Ida-Virumaalt Vanamõisa külast. Puursüdamikus F149 on tuvastatud metaperidotiidi, gabronoriidi ja metagabronoriidi intervallid ehk ultraaluselised ja aluselised kivimid, mida mainitakse Kivisilla *et al.* (1994) ja Niin (2002) töödes, ehkki lähedal asuvat F270 puursüdamikku eelnimetatud töödes ei mainita. Puursüdamikus F270 on kirjeldatud pürokseenkivimit, pürokseeni amfibooliga, pürokseengneisse ja amfibool-pürokseengneisse, mis samuti viitavad ultraaluseliste ja aluseliste kivimite olemasolule. Puursüdamike sarnane aluseline koostis sobib nende uurimiseks, kihtide korreleerimiseks ja Data Mosaic masinõppe tarkvara katsetamiseks.

3.2. Geotek Multi-Sensor Core Logger – XYZ

Arbavere uurimiskeskuses asuv skanneerimisjaam Geotek MSCL-XYZ mõõdab puursüdamike pealispinda kasutades viite sensorit: XRF analüsaator (*Geotek XRF - He atmosfääris mõõtekamber*), magnetilise vastuvõtlikkuse mõõtja (*Bartington MS2E*), ASD fotospektromeeter (*ASD Fieldspec 4*), laserkaugusmõõdik ja fotokaamera (*Geoscan V*). Skanneerimisjaama tööjuhend eeldab, et sensorid mõõdavad tasapinnalist kivimpinda. Antud töös kasutatud andmestik on mõõdetud otse puursüdamikult, mis on kohati ebatasane ja alatihti lõhenenud või purunenud, mistõttu mõõtetulemused ei pruugi olla kõige usaldusväärsemad. Töö autor osales 2023. aasta Eesti Geoloogiateenistuse suvepraktika raames skanneerimisprojekti.



Joonis 6. Geotek MSCL-XYZ ja sensorid: a - XRF analüsaator, b - ASD LabSpec VIS/VNIR/SWIR fotospektromeeter, c - magnetilise vastuvõtlikkuse mõõtja, d - laserkaugusmõõdik, e - Kõrgresolutsiooniline kaamera koos valgusallikaga (f). (Nirgi *et al.* 2024).

3.2.1. Skaneerimise töökäik

Skaneerimisjaama kasutamine koosneb neljast ettevalmistamise etapist enne kui on võimalik puursüdamiku skaneerimist alustada. Esimese etapina paigutakse mõõdetav puursüdamik spetsiaalsele alusele ning tehakse tasapinnaliseks. Teise etapina puhastatakse mõõtealusel olev puursüdamik destilleeritud veega. Kolmanda etapina markeeritakse mõõtealusel oleva puursüdamiku algus ja lõppsügavus. Neljanda etapina märgitakse mõõtepunktide asukohad ja seejärel tõstetakse mõõtmisele kuuluv puursüdamik skaneerimisjaama.

3.2.2. XRF andmestik

Kuigi antud töös kasutatud Geotek MSCL-XYZ skaneerimisjaam sisaldab mitmeid erinevaid sensoreid, keskendutakse ainult XRF andmestikule. XRF meetodi tööpõhimõte seisneb proovi

ergastamisel röntgenkiirgusega, mille tulemusel tõrjutakse ergastatud elemendi aatomilt elektrone selle sisemisest elektronkihtidest ja luues hetkelise ebastabiilse seisundi. Elemendi stabiilsuse säilimiseks täidavad tühja koha välimistel elektronkihtidel olevad elektronid, mis ümberpaigutamise ja orbitaalide energia erinevuste tulemusel tekitab sekundaarse röntgenkiire. See eraldatud sekundaarne kiirgus on igal elemendil erinev ja selle intensiivsuse mõõtmisel on võimalik määrata elementide kvantitatiivseid sisaldusi. Skaneerimisjaama XRF sensor asub heeliumkeskkonas, ehk mõõtmine ja tulemused pole mõjutatud ruumiõhust. (Geotek XYZ tööjuhend).

XRF sensori korrasolekut kontrolliti enne iga mõõtereala algust kasutades sisestandardit ja jälgiti detektori lugemite arvu. Selle olulisel muutumisel võib kahtlustada mõõteakna kaitsekile purunemist, mistõttu heeliumi läbivool sensorist on ruumiõhuga saastunud.

Tabel 1. Geotek MSCL-XYZ XRF sensori tehniline kirjeldus.(Nirgi *et al.* 2024).

Geotek XRF		Kasutatud seaded
Röntgenlainete allikas	15W/50kV, Rh anood	15W, 10 ja 40 kV, Rh anood
Detektor	Rayspec energia-dispersiivne (EDS) SiriusSD Silicon Drift Detector, 30 mm x 0,45 µm, Be-aken, He-atmosfääriga mõõtekamber	
Mõõteakna suurus (puursüdamiku pikiteljel X puursüdamiku ristteljel)	0,1–10 X 5–15 mm	10 x 5 mm
Filtrisüsteem ja analüüsitavad elemendid	Filtrita – (Mg-Fe)	Filtrita (Mg-Fe)
	Alumiinium 10 µm (Mg-Fe, P+S)	-
	Hõbe 25 µm (Mn-Br)	-
	Hõbe 125 µm (Zn-Mo)	Hõbe 125 µm (Zn-Mo)
	Vask 650 µm (Sn-Te, Ba)	-
Mõõteae	Efektiivne aeg (<i>Live time</i>) 2-30 s	-
	Tegelik aeg (<i>Real time</i>) 2–30 s	Tegelik aeg (Real time) 10 s (mõlema filtriga)

Olemasolevale XRF andmestikule on määratud standardproovide alusel avastamiskiir (LOD) ja määramiskiir (LOQ), mis iseloomustab analüütilise meetodi tundlikkust ja kvantitatiivse määramise usaldusväärsust. Standardproovideks olid Oreas 30a (basalt) ja Oreas 20a (granodiorit), nende kahe proovi tulemuste väikseim valiti avastamis- ja määramiskiiriks ja on esindatud tabelis 2. (Nirgi *et al.* 2024).

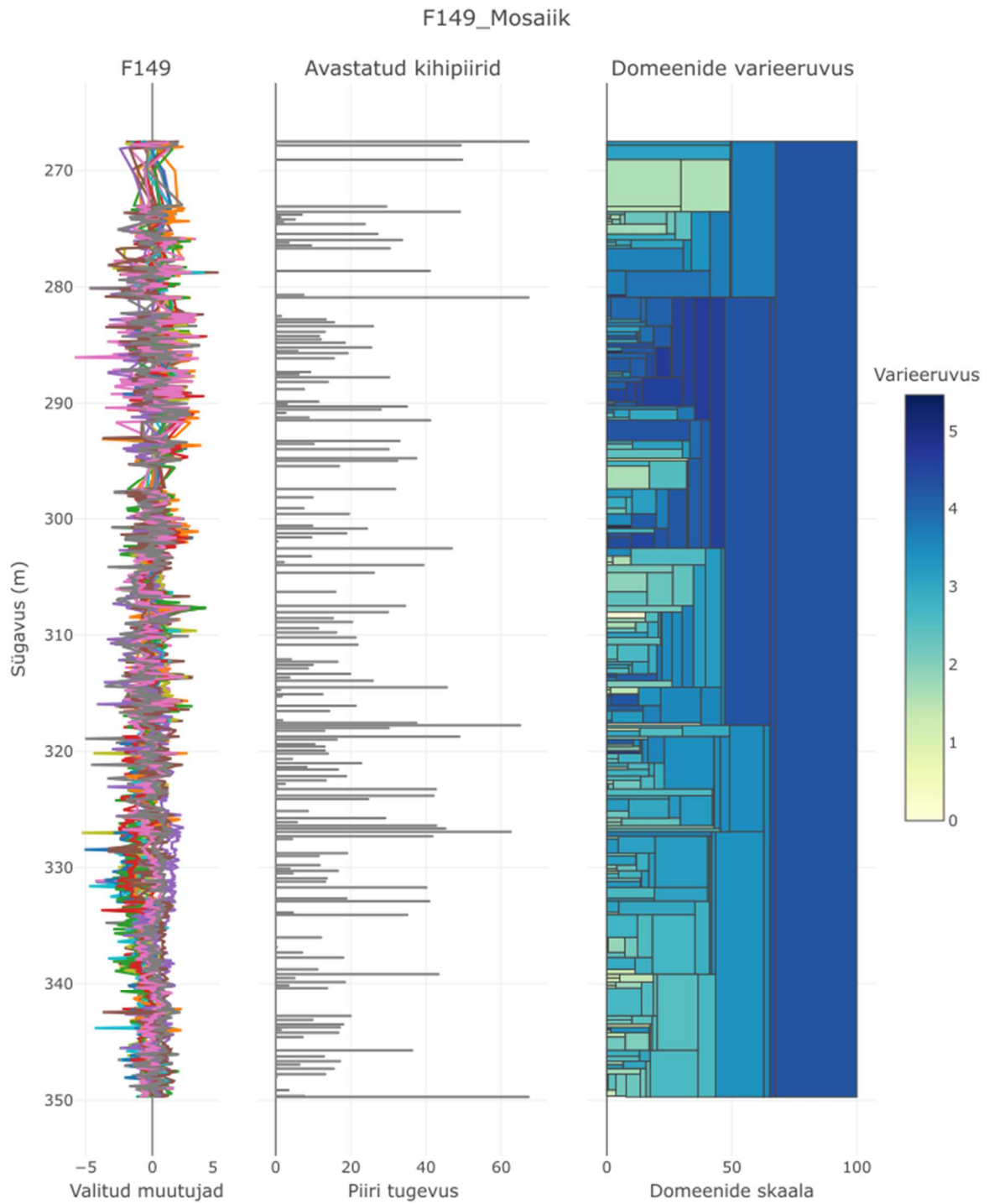
Tabel 2. standardproovide avastamis- ja määramispiirid. (Nirgi *et al.* 2024).

Keemiline element	Standard-proov	LOD	LOQ
Mg	Oreas 20a	2870	9570
Al	Oreas 30a	4210	14020
Si	Oreas 30a	7690	25630
P	Oreas 20a	450	1500
S	Oreas 20a	250	810
K	Oreas 30a	860	2840
Ca	Oreas 20a	4540	15120
Ti	Oreas 20a	1230	4080
V	Oreas 20a	90	290
Cr	Oreas 20a	120	400
Mn	Oreas 20a	230	740
Fe	Oreas 20a	10960	36530
Ni	Oreas 20a	10	40
Cu	Oreas 30a	150	490
Zn	Oreas 20a	50	170
As	Oreas 30a	3	11
Sr	Oreas 20a	200	660
Zr	Oreas 30a	90	300
Mo	Oreas 20a	1	3
Ba	Oreas 30a	1210	4020
Pb	Oreas 30a	24	81
U	Oreas 30a	11	38

3.3. Data Mosaic

Data Mosaic on CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) poolt loodud tarkvara, mis võimaldab puursüdamikult kogutud analüütilisi tulemusi tõlgendada selliselt, et andmestikul oleks koheselt nähtav geoloogiline tähendus. Data Mosaici kasutamise eeliseks on automatiseeritud töövoog, kiirus ja täpsus. Samuti aitab tarkvara lahendada puursüdamike kirjeldamisel esinevat subjektiivsust ehk mitu erinevat geoloogi võib kirjeldada sama puursüdamikku erinevalt. (CSIRO 2021).

Sisendiks antavate geokeemiliste, spektraalsete või petrograafiliste andmete töötlemiseks kasutab Data Mosaic pideva lainekehandi teisendust (CWT - *continuous wavelet transform*). Sellise meetodi kasutamine võimaldab andmeid mitmeskaalaliselt analüüsida ja vastavalt andmetes esinevatele amplituudi muutustele, nende esinemisemustritele ja variatsioonidele, struktrueerida võimalikke litoloogilisi piire. Vastavalt piiride sarnasusele luuakse hierarhiale põhinev süsteem, n.ö mosaiik, mis koosneb domeenidest. Kuna moodustunud mosaiik lähtub ainult andmestiku erinevustest, tuleb lõpptulemuse saamiseks domeenid koondada klassidesse, kasutades erinevaid olemasolevaid klassifitseerimise algoritme (*k-means, agglomerative, gaussian mix, spectral, hdbscan*) ja valides loodavate klasside arvu. Pärast domeenide koondamist tekib hierarhiale põhinev pseudologi, mida saab vastavalt täpsuse vajadusele kasutada. (Hill *et al.* 2021^b).



Joonis 7. Data Mosaic mitmikskaala analüüsi kasutamine puursüdamikul F149. Pilt on illustratiivne, kasutatud on kõiki XRF andmestikus esindatud elemente.

3.4. Andmetöötlus

Käesolevas töös on andmetöötluse puhul lähtunud Data Mosaici tööjuhendist ja Hill *et al.* (2021^{a,b}) töös kasutatud andmetöötluse põhimõtteid.

3.4.1. Andmete korrastamine ja valideerimine

Vastavalt Data Mosaic tööjuhendile tuleb eemaldada või asendada mõõtmised, milles kujutatud väärtus ei oma tähendust, näiteks 0 väärtused, samuti ei tohi olla andmestikus korduvaid sügavusintervalle. Esialgu eemaldatai kõik korduvad sügavused ja tühjas mõõtmiste read. Juhul kui tulemused on korduval mõõtmisel erinevad, eemaldan rea mille tulemused on väiksemad. Kontrolliti andmestiku, mitu 0 mõõtmist esineb ja kui usaldusväärsed on XRF andmed vastavalt standardproovidele määratud avastamispääri suhtes. Tulemused on esitatud tabelis 3.

Hill *et al.* (2021^b) töös eemaldatakse elemendid, mille andmestik on üle 20% puudulik. Seda põhimõtet rakendades puursüdamikel F149 ja F270 tuleb eemaldada andmestikust järgmised elemendid: As, Mo, Ba ja V. Kuna V esineb üldiselt ultraluselistes ja aluselistes intrusioonides (Cawthorn *et al.* 2005) ja jälgelemendina oliviinis (Wang *et al.* 2021) tehakse andmetöötles esialgu erand ja jäetakse V alles. Alla avastamispääri olevaid andmeid eraldi ei käsitleta, sest nende eemaldamisel oleks puuduvate andmete osakaal märgatav ning tuleb ka arvestada, et mõõtmiste ajal kontakt südamikuga võis varieeruda, mis ei tähenda alla avastamispääri oleva elemendi täielikku puudumist. Vastavalt Data Mosaici tööjuhendile ei tohi andmestikus esineda 0 väärtusi mistõttu read, millel need esinevad tuleks eemaldada või asendada. Ridu me esialgu ei eemalda andmestiku täielikkuse hoidmise eesmärgil, sest samal real olevad teised mõõtmised võivad olla korrektsed ja proovime 0 väärtusi asendada. Lisaks esineb puursüdamikus F270 ülemises otsas väga suurte sügavusvahemikega mõõtmiste lõik; sügavustel 237,93 kuni 256,93 esineb 4 mõõtepunkti, mis eemaldatakse andmestikust eesmärgil ühtlustada üldist mõõtmisagedust.

Tabel 3. XRF kvantifitseeritud tulemustes esinevad andmelüngad või alla avastamispiiri (<LOD) väärtused ning mitu meetrit puursüdamikku tulemused mõjutavad, mis saadud ebasobiva andmepunkti eemaldamisel ja tekkinud andmelünga vahekauguse kokku liitmisel.

K. element	Andmepunktide arv				Uuritava südamiku pikkus (m)			
	F149		F270		F149		F270	
	776		946		82.19m		138.1m	
	0 lugemite arv		<LOD arv		0 lugemid (m)		<LOD (m)	
	F149	F270	F149	F270	F149	F270	F149	F270
Mg	8(1.03%)	26(2.75%)	23(2.96%)	95(10.04%)	3.31m(4.03%)	4.22m(3.06%)	4.06m(4.94%)	29.37m(21.28%)
Al	0(0.0%)	0(0.0%)	0(0.0%)	12(1.27%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	2.8m(2.03%)
Si	0(0.0%)	0(0.0%)	0(0.0%)	0(0.0%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)
P	16(2.06%)	85(8.99%)	182(23.45%)	333(35.2%)	5.03m(6.12%)	16.63m(12.05%)	29.56m(35.97%)	65.22m(47.26%)
S	117(15.08%)	148(15.64%)	7(0.9%)	2(0.21%)	20.09m(24.44%)	28.8m(20.87%)	1.95m(2.37%)	0.4m(0.29%)
K	0(0.0%)	12(1.27%)	40(5.15%)	278(29.39%)	0.0m(0.0%)	2.39m(1.73%)	4.99m(6.07%)	58.77m(42.58%)
Ca	0(0.0%)	0(0.0%)	9(1.16%)	76(8.03%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	1.26m(1.53%)	17.01m(12.33%)
Ti	14(1.8%)	38(4.02%)	198(25.52%)	589(62.26%)	1.54m(1.87%)	9.38m(6.8%)	29.45m(35.83%)	98.93m(71.68%)
V	118(15.21%)	258(27.27%)	178(22.94%)	289(30.55%)	20.57m(25.03%)	60.93m(44.15%)	32.89m(40.02%)	60.52m(43.85%)
Cr	11(1.42%)	37(3.91%)	79(10.18%)	182(19.24%)	1.89m(2.3%)	8.85m(6.41%)	16.5m(20.08%)	50.7m(36.74%)
Mn	7(0.9%)	1(0.11%)	153(19.72%)	168(17.76%)	0.99m(1.2%)	0.2m(0.14%)	28.95m(35.22%)	50.54m(36.62%)
Fe	0(0.0%)	0(0.0%)	126(16.24%)	310(32.77%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	20.79m(25.3%)	68.11m(49.35%)
Ni	0(0.0%)	0(0.0%)	28(3.61%)	14(1.48%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	7.19m(8.75%)	2.63m(1.91%)
Cu	0(0.0%)	0(0.0%)	616(79.38%)	757(80.02%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	65.63m(79.85%)	110.37m(79.97%)
Zn	0(0.0%)	0(0.0%)	55(7.09%)	165(17.44%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	10.58m(12.87%)	47.54m(34.45%)
As	474(61.08%)	533(56.34%)	290(37.37%)	407(43.02%)	60.94m(74.15%)	115.54m(83.72%)	45.6m(55.48%)	84.25m(61.05%)
Sr	0(0.0%)	0(0.0%)	523(67.4%)	792(83.72%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	66.7m(81.15%)	108.83m(78.86%)
Zr	62(7.99%)	104(10.99%)	316(40.72%)	622(65.75%)	9.53m(11.6%)	21.69m(15.72%)	45.59m(55.47%)	109.72m(79.5%)
Mo	508(65.46%)	293(30.97%)	48(6.19%)	75(7.93%)	65.33m(79.49%)	75.67m(54.83%)	8.31m(10.11%)	18.21m(13.19%)
Ba	272(35.05%)	194(20.51%)	336(43.3%)	667(70.51%)	40.94m(49.81%)	36.45m(26.41%)	49.69m(60.46%)	103.48m(74.98%)
Pb	0(0.0%)	0(0.0%)	223(28.74%)	466(49.26%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	32.1m(39.06%)	91.55m(66.34%)
U	0(0.0%)	0(0.0%)	146(18.81%)	472(49.89%)	0.0m(0.0%)	0.0m(0.0%)	22.59m(27.49%)	83.0m(60.14%)

3.4.2. Nullväärtuste asendamine

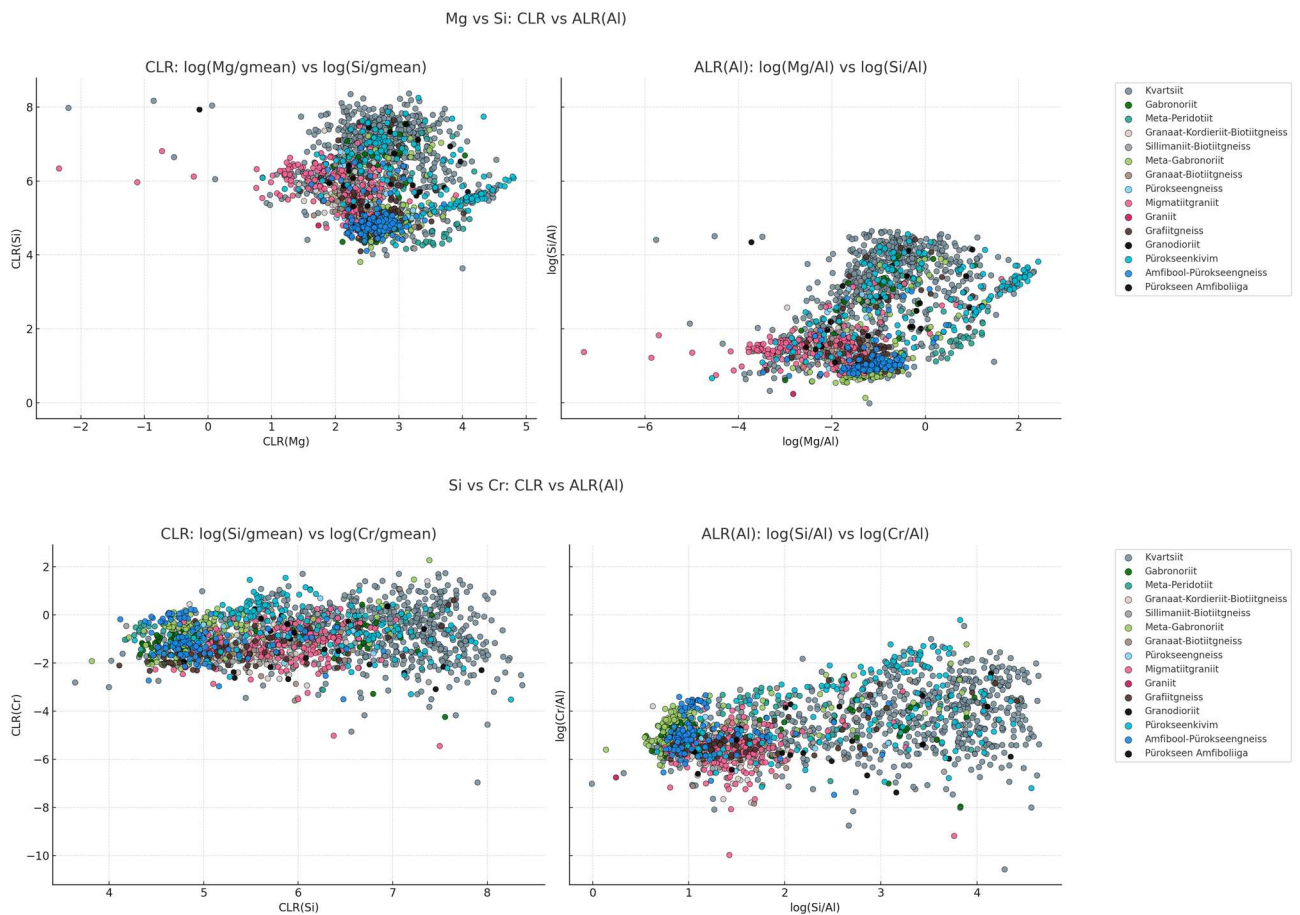
Pärast esialgset andmestiku puhastamist on siiski andmelünkade osakaal märgatav ja olemasolevate 0 väärtustega ridade eemaldamise asemel proovitakse olemasolevad andmelüngad asendada. Robustne ja levinud viis antud probleemi lahenduseks oleks igale puuduvale andmepunktile anda tabelis 2 toodud avastamiskiir ($<LOD$) väärtus, näiteks üks ühele olemasoleva $<LOD$ väärtusega, väiksema $<LOD$ väärtusega saadud jagatise või logariti tulemusel või viimasel juhul jätta 0 väärtused andmestikku aga antud juhul soovime puuduvaid andmeid ja lihtsa asenduse juures oleks statistiline ebamäärasus liiga suur (Palarea-Albaladejo ja Martín-Fernández 2015). Hill *et al.* (2021^b) kasutab sarnase olukorra puhul R *zCompositions* paketti, viidates Palarea-Albaladejo ja Martín-Fernández (2015) tööle, mis täidab andmelüngad vastavalt olemasolevatele väärtustele tuginedes. Kahjuks ei ole Hill *et al.* (2021^b) töös mainitud millist konkreetset R *zComposition* meetodit kasutati, mis-tõttu käesolevas töös kasutatan *lrEM* meetodit (*Log-ratio EM*) (Palarea-Albaladejo ja Martín-Fernández 2024). Nimetatud *lrEM* meetod kasutab puuduva andmestiku asendamiseks *EM* (*expectation-maximisation*) algoritme, luues puuduva väärtused vastavalt olemasoleva andmestiku elementsuhetele ja nende struktuurile (Palarea-Albaladejo ja Martín-Fernández 2024). R *zComposition lrEM* kasutamisel puudevate andmete loomiseks arvestatakse käesolevas töös avastamiskiiri väärtustega, et puuduolevaid tulemusi asendavaid väärtused ei ületaks neid avastamiskiiri väärtusi. Kuigi *lrEM* kasutamisel ja ka kasutusjuhendist tulenevalt ei tohiks algandmed muutuda siis need siiski osaliselt muutusid. Selle lahendamiseks asendati pärast 0 väärtuse parandamist kõik ülejäänud olemasolevad andmed algsetega, mille tulemusel jäid muudetuks ainult tahetud 0 väärtused.

3.4.3. Andmestiku normaliseerimine

Hill *et al.* (2021^b) töös on andmetele rakendatud logaritmiline teisendus, antud teisendust eeldavad enamik matemaatilisi ja masinõppe meetodeid. Eelmainitud autori töös normaliseeritakse andmed kasutades aditiivse logaritmilise suhet ehk *ALR* (*additive log-ratio*) meetodit, viidates Aitchison (1986) tööle; *ALR* meetodi puhul normaliseeritakse andmeid jagades kõik elemendid mõne kindla elemendiga ja tekkinud elementsuhtest võetakse logaritm. Hill *et al.* (2021^b) töös kasutati elementsuhte loomiseks nimetajana T_i , mis on üldlevinud meetod geokeemias. Käesolevas töös ei ole võimalik T_i kasutada, sest XRF andmestikus esineb T_i mitmel kohal alla avastamiskiiri, muutes elemendi ebausaldusväärseks. *ALR* meetodi rakendamiseks võiks kasutada A_i , mis on olemuselt

immobiilne element ja vastupidav erinevatele geoloogilistele protsessidele võrreldes teiste valikus olevate elementidega (Rollinson 1993). Al sobiks ka andmestiku alusel, esinedes puursüdamikul F270 alla avastamispiiri ainult 1,27%, need read saab andmestikust eemaldada.

Teise variandina andmete normaliseerimiseks oleks CLR (*centred log-ratio*) meetod ehk keskmistatud logaritmiline suhe, mis seisneb andmete jagamisel nendega samal real esinevate andmete keskmistega ja mida on samuti kasutatud Data Mosaic pseudoloogide loomisel (Hill *et al.* 2021^a). Nende erinevus antud töö puhul on toodud joonisel 8.



Joonis 8. Võrdlus CLR ja ALR meetodi vahel kasutades olemasolevat geoloogilist kirjeldust. Joonise koostamiseks on kasutatud ChatGPT GPT4o.

Võrdlusest tulenevalt on märgata, et CLR puhul on aluselised kivimid veidi rohkem eraldatud teistest kivimgruppidest. Samuti on teadmata Al käitumine ja esinemine käesolevas töös analüüsitavares kivimites, mis võib hilisema klassifitseerimise teha raskemaks. Käesoleva töö esimeste etappide käigus katsetati ALR ja CLR meetodit, mille tulemusel järelitati CLR meetodi eelist andmete üheselt

mõistmiseks ja sellest tulenevalt on töös kasutatud CLR meetodit andmete normaliseerimiseks. CLR meetod on tundlikum andmete suhtes, mistõttu elemendid mida ei kasutata pseudologi loomisel eemaldatakse enne andmete töötlust.

3.4.4. Pseudologi loomisel kasutatavate elementide valik

Oluline on valida milliste elementide põhjal Data Mosaiciga tööd alustatakse. Hill *et al.* (2021^b) töös on valitud pseudologi loomiseks Si, K, Cr, Rb, Sr, Zr ja Ti. Eelmainitud autor toob valitud elementide põhjenduseks Cr, Zr, Ti efektiivsuse aluseliste kivimite määramisel ja Si, K, Rb, Sr happeliste kivimite määramisel. Lisaks kinnitab valitud elementide, Cr, Zr, Ti efektiivsuse aluseliste kivimite määramiseks Hallberg (1983) töö, kus kasutati tulemuslikult eelnimetatud elemente moonduvad ja murenenud aluseliste kivimite määramisel ja klassifitseerimisel. Hill *et al.* (2021^b) tsiteerib enda töös elemendivaliku juures Barnes *et al.* (2011) tööd, kus määrati aluselisi kivimeid Bahias Brasiilias ja milleks kasutati Al, Ca, Cr, Fe, K, Mg ja Na. Eelmainitud autorite, Hill *et al.* (2021^b) ja Barnes *et al.* (2011), töödes on kasutatud andmestik olnud ilma suuremate puudusteta. Käesolevas töös esineb puursüdamiku XRF andmestikus laialdaselt 0 väärtusi, mis asendati eelmiste andmetöötluste etappides, ja alla avastamispiiri tulemusi, mis seab mõningaid piiranguid valitavatele elementidele. Ühe variandina oleks kõiki elemente kasutada, aga Hill *et al.* (2021^b) soovib seda mitte teha kui just tegu pole maavarade uuringuga. Arvestades eelmainitud autorite töid on vastavalt mõõtmiste usaldusväärsustele antud töös valitud pseudoloogide loomisel elementideks Si, Mg, Cr, Ca, Fe ja Ni.

3.4.5. Data Mosaic kasutatavad parameetrid

Data Mosaici poolt loodud domeenide klassifitseerimisel masinõppe meetodi valikul lähtutakse Hill *et al.* (2021^{a,b}) töös kasutatud k -means meetodit, mis on tüüpiline masinõppe etalon. Meetod põhineb iteratiivsel algoritmil suvalise alguspunktiga, mis eraldab ja jaotab andmestiku rühmadesse vastavalt nende lähimatele keskmistele. Eelmainitud autori töös mainitakse valitava klasside arvu kohta, et see on ligikaudselt sama, mis tavapärase kirjeldamise käigus geoloogi poolt tuvastatud. Käesolevas töös on valitud Data Mosaic domeenide klassifitseerimise masinõppe meetodiks k -means ja loodavate klasside arv on võetud 10, mis küll lihtustab olemasolevat geoloogiat, aga aluselised ja ultraaluselised intervallid peaksid välja joonistuma.

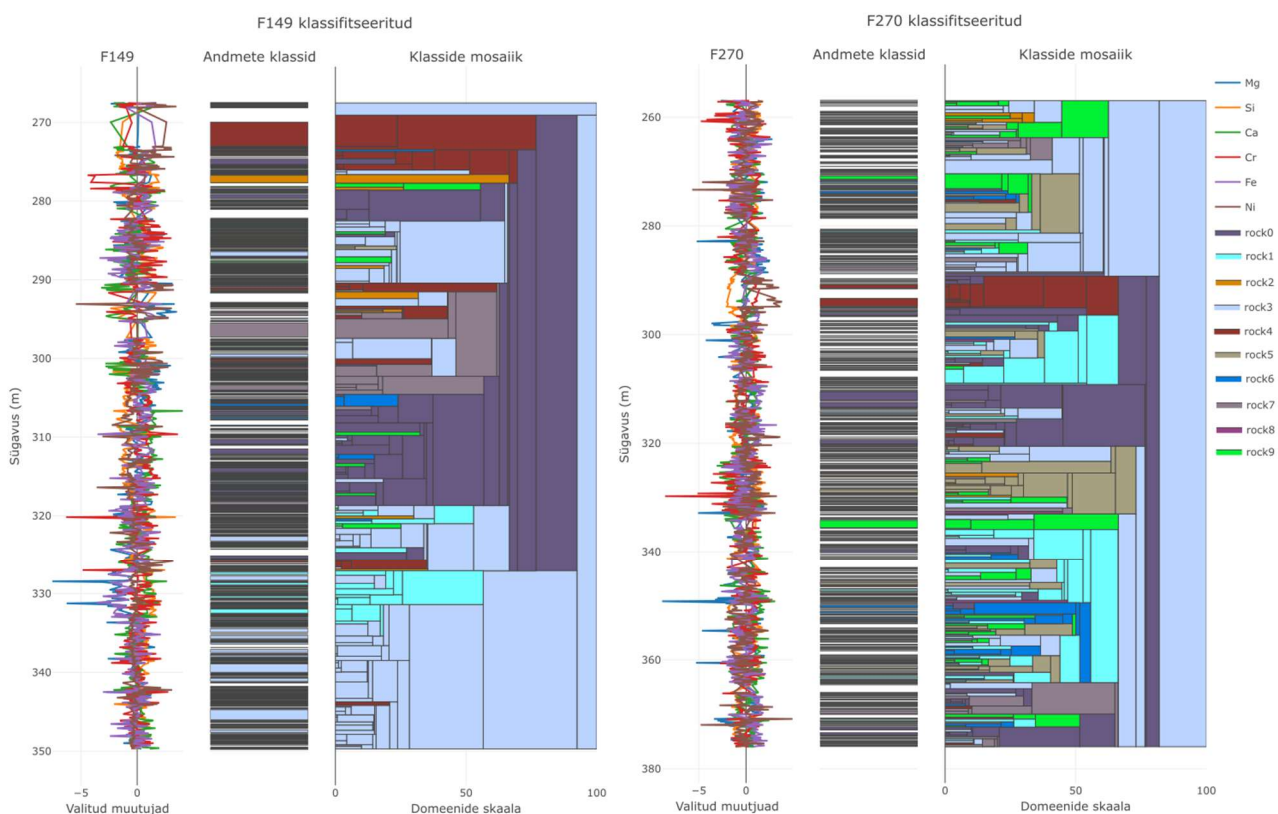
Tabel 4. Data Mosaic parameetrid

D.M. versioon	1.11.6	Combine boundaries method	Advanced (BETA)
Data filter	2	Gap handling	Fill
Depth tolerance	0	Scale tolerance	0
Classification method	k -means	Clusters	10

4. Tulemused ja arutelu

4.1. Pseudoloogide loomine kasutades Data Mosaic tarkvara

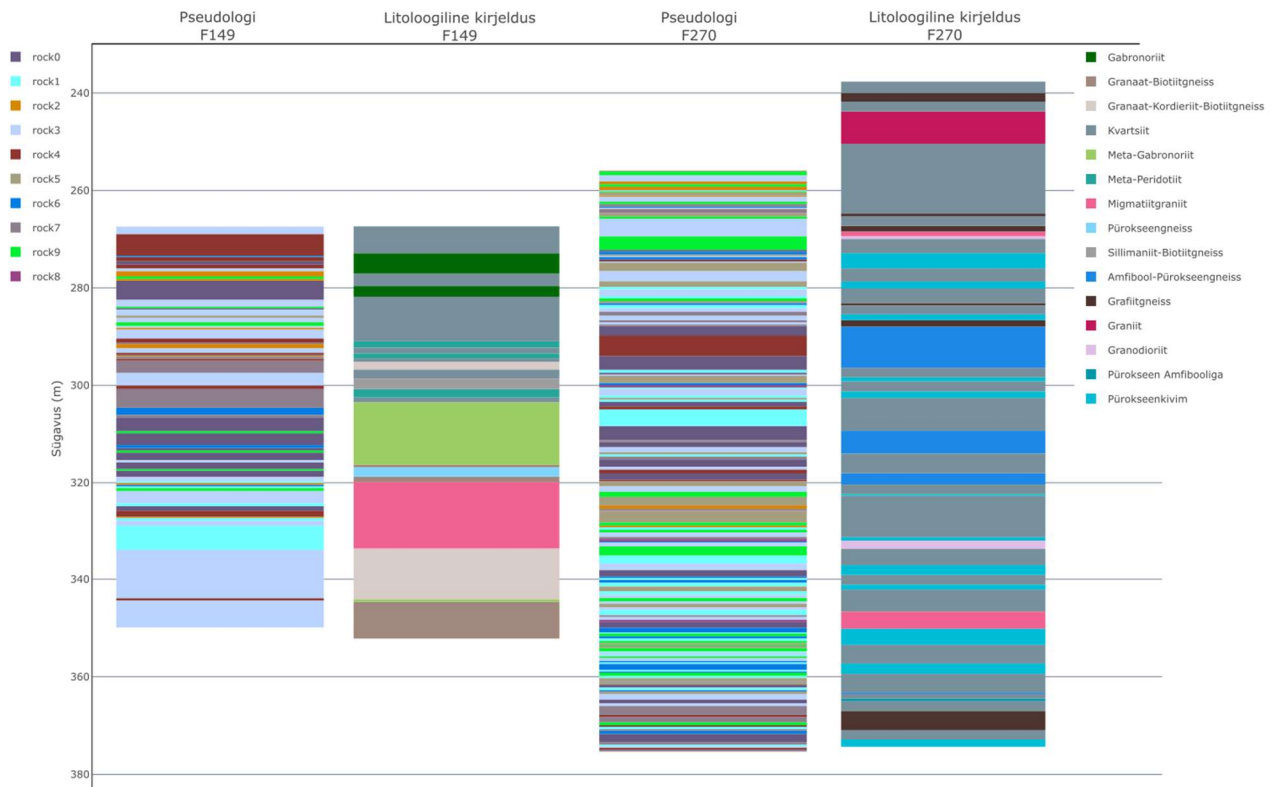
Data Mosaic tarkvara seadistati vastavalt peatükis 3 toodud parameetritele ja teostati pideva lainekehandi teisenduse meetodil töödeldud XRF andmestikule analüüs; keemiliste elementidena kasutati Si, Mg, Cr, Ca, Fe ja Ni. Kihipiiride klassifitseerimiseks kasutati *k-means* meetodit koos 10 klassiga, mis loob 10 erinevat kivimtüüpi (*rock*) vastavalt tuvastatud oletatavate kihipiiride sarnasusele.



Joonis 9. Data Mosaic klassifitseeritud domeenid.

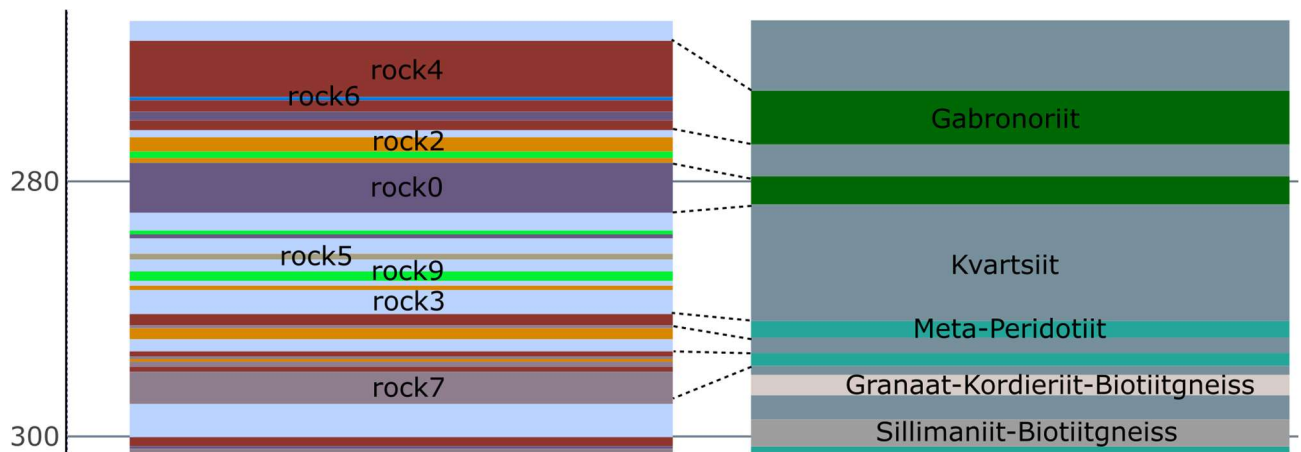
Pärast klassifitseerimist loodi pseudologi, millel võeti domeeni skaalaks 10. Mida väiksem skaala valida, seda n.ö. kirjum ehk täpsem on loodav pseudologi. Pseudoloogide loetavuse ja visuaalse eristamise eesmärgil on tehtud antud töös eelmainitud domeeni skaala valik. Pseudologi loomisel antakse domeenidest koonevatele klassidele kivimtüübid: kivim 0 kuni 9ni (*rock 0...rock 9*); uued kivimtüübid ei oma hetkel tähendust, markerides ainult pideva lainekehandi teisenduse tulemusel

andmestiku varieeruvuse põhiselt moodustatud kihipiire, mis grupeeritud ehk klassifitseeritud sarnasuse alusel klassidesse. Nendele tähenduse andmine on töö üks keerulisemaid osasid, sest uued kihipiirid kattuvad vaid osaliselt olemasoleva litoloogilise kirjeldusega ja eesmärk ei ole otseselt kopeerida olemasolevat litoloogilist tulpa vaid anda loodud kivimitüüpidele vastavalt XRF andmestikule tähenduslik nimetus. Sellegipoolest kõrvutame loodud pseudologi ja kirjeldatud litoloogilise tulpa, et tulemust visualiseerida (Joonis 10).



Joonis 10. Loodud pseudologid võrreldes originaalse litoloogilise kirjeldusega.

Pseudologi ja olemasoleva geoloogilise tulpa kõrvutamisel tekib enam-vähem sarnane pilt ja joonistuvad välja varem kirjeldatud kihipiirid. Kui varasemalt kirjeldatud aluseliste kivimite juures esineb enamvähem selge visuaalne korrelatsioon, siis moondekivimite ja gneisside puhul sama ei täheldata, lisaks tundub, et happelised kivimid ei ole niivõrd selgelt eristatavad.



Joonis 11. Suurendatud pilt litoloogilisest kirjeldusest ja pseudogeoloogist, mille kivimtüübid on klassifitseerimata. Illustreerimaks sarnasusi ja erinevusi masinõppe meetodil loodud pseudotulba ja olemasoleva kirjelduse vahel.

4.1.1. Kivimtüüpide klassifitseerimine

Eesti aluskorrakivimite kohta leidub laialdaselt informatsiooni Niin (2002) tööst, mille alusel ka käesolevas töös proovitakse töödeldud XRF andmestiku põhjal aluseliseid kivimeid määrata. Puursüdamikku F270 ei ole eelmainitud autori töös kajastatud, aga kuna kivimtüübid on Data Mosaic abil ühildatud, saame kasutada puursüdamiku F149 infot aluseliste kivimtüüpide klassifitseerimisel ehk n.ö. masinõppe treeningsüdamikuna.

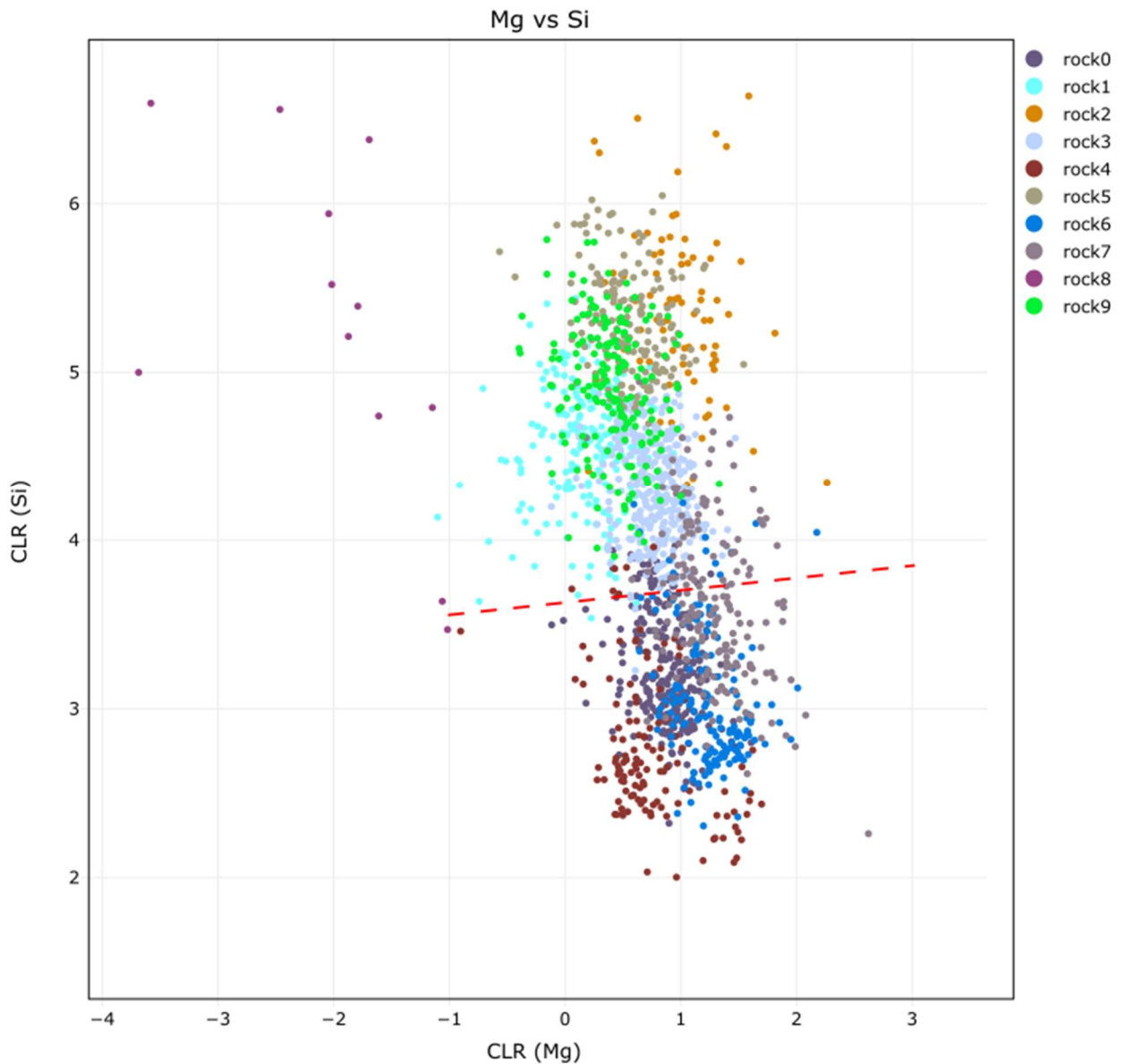
Niin (2002) toob välja puursüdamikul F149 esineva ultraaluselise meta-peridotiidi ja aluselise gabbronoriidi mineraalsed koostised. Meta-peridotiidi mineraalse koostise moodustavad peamiselt tugevalt moondunud oliviin, vähesel määral pürokseen, amfiboolidest on peamiselt esindatud küünekivi, vähesemal määral ka aktinoliit ja tremoliit ning esineb aksessuarset spinelli ja apatiiti. Gabbronoriidi mineraalse koostise moodustab suures osas plagioklass, tavaliselt labradoriit või bütauniit, lisaks pürokseen, mis osaliselt asendunud küünekiviga ja väikeses osast kvartsist.

Tabel 5. Puursüdamiku F149 ultraaluseliste ja aluseliste kivimite mineraalne koostis. (Niin 2002).

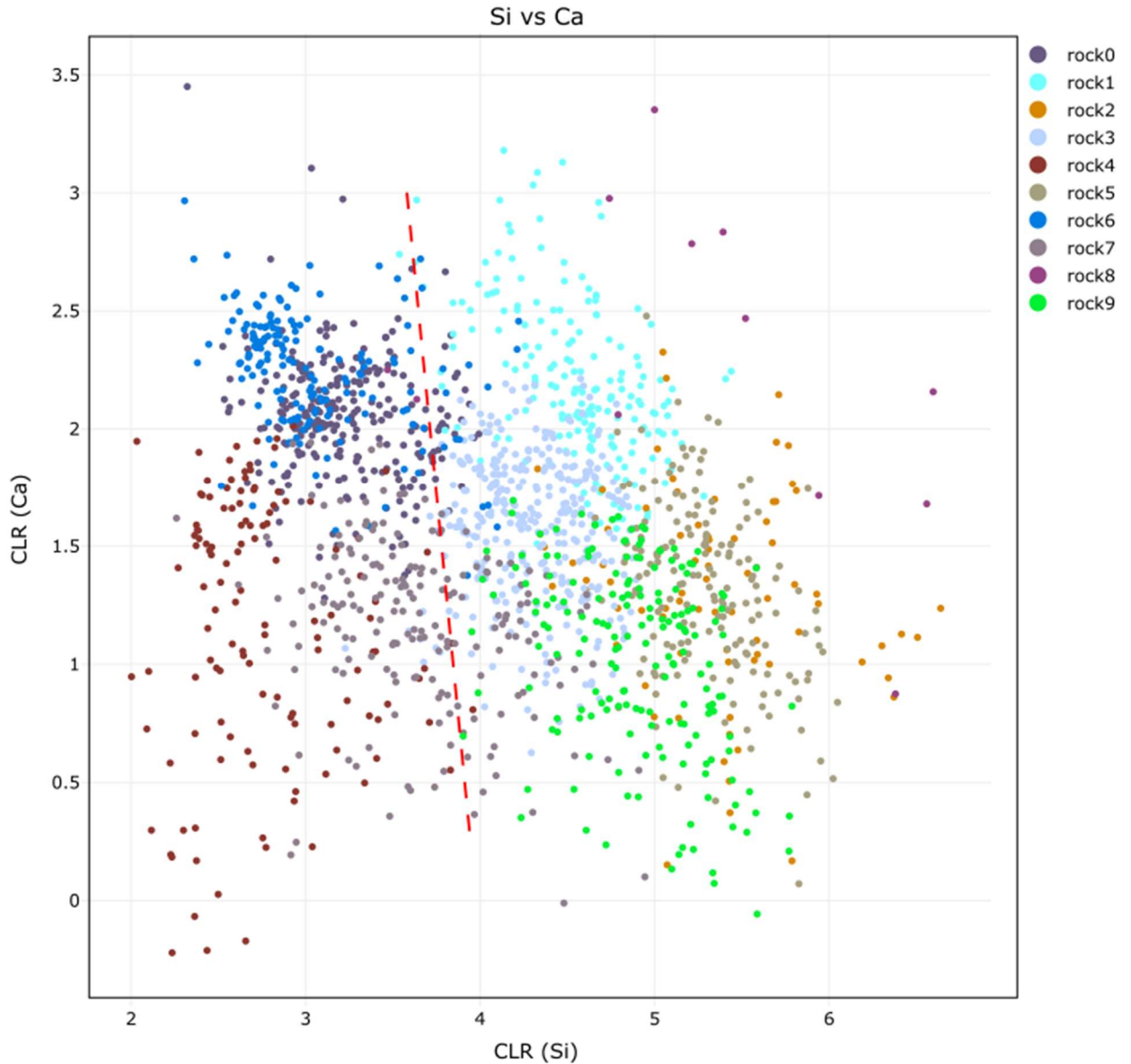
Kivim	Pl %	An %	Hbl %	Bt %	Cpx %	Opx %	Q %	Op%	Ap%	Ol %	Sp %
Gabbronoriit	48.2	55-80	6.2	0.8	27.1	13.8	0.9	3	+		
Meta-peridotiit			29	0.4	1.3	3.7		8	0.1	51.8	2.7

Eelnevalt valitud elemendid Si, Mg, Cr, Ca, Fe ja Ni peaksid sobima eelnimetatud mineraalide eristamiseks ülejäänud kivimist. Kõige intuiitsem element võiks olla Si, mis vastavalt TAS diagrammile peaks ultraluseliste ja aluseliste kivimite juures olema väga vähe esindatud. Teisena peaksid Mg ja Fe kajastama eelnevalt mainitud oliviini, pürokseeni ja küünekiivi. Ni ja Cr esinevad eelmainitud kivimites peamiste asendajatena ja nende koguste suurusjärgud võivad indikeerida ultraaluseliste kivimitele. Ca on kasulik nii küünekiivi kui plagioklassi määramisel. Loodud kivimtüüpide tuvastamiseks ja klassifitseerimiseks proovitakse seostada eelmainitud punktdiagrammidel kajastatud infoga. Punktdiagrammid luuakse kasutades Data Mosaic sisseehitatud funktsiooni. Klassifitseerimisel võetakse abiks ka olemasolev litoloogiline tulp. Pisteliselt kontrolliti ka õhikute andmebaasi ning vaadeldi seal toodud õhikuid, mis käesolevas töös otseselt ei kajastu.

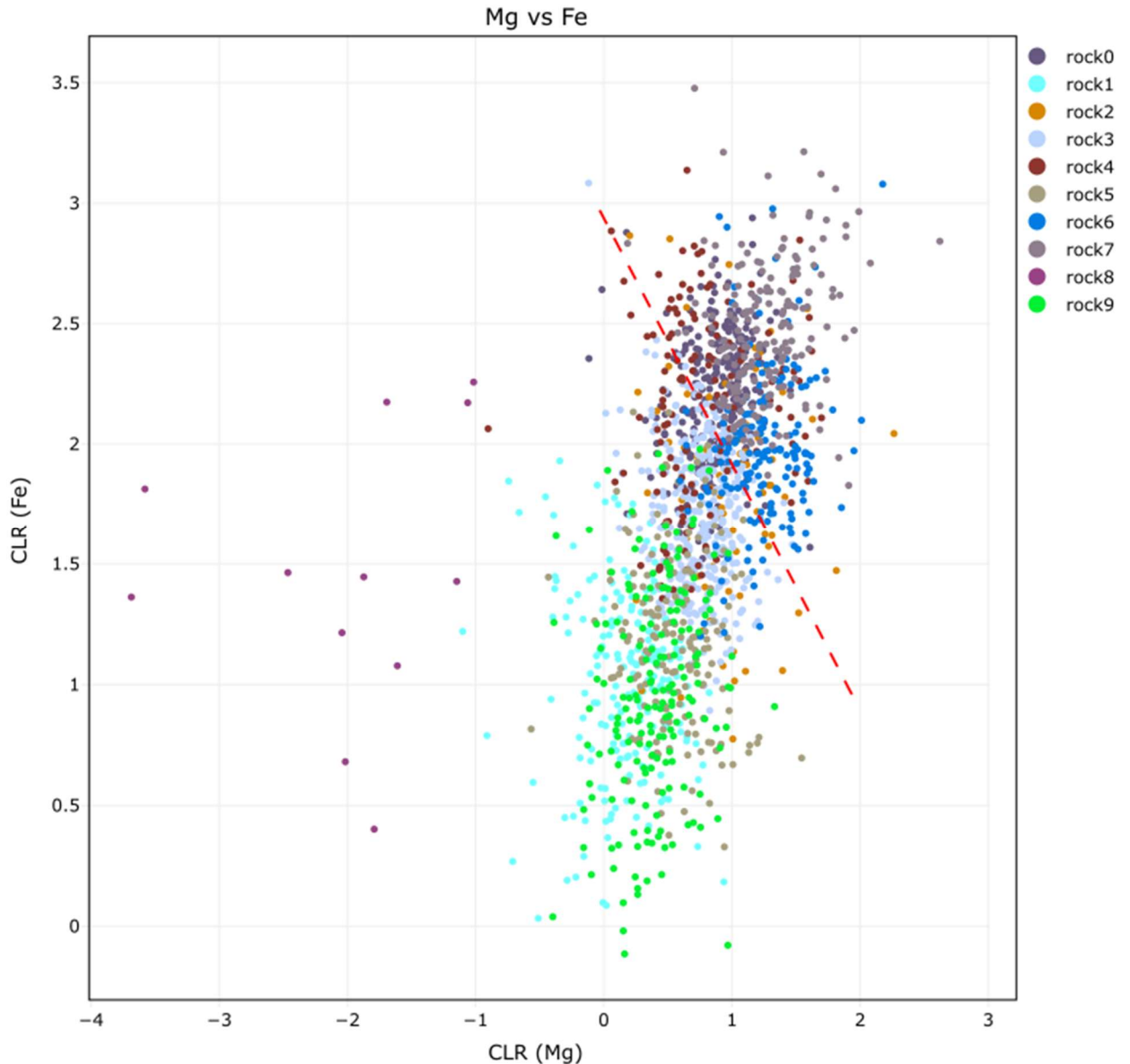
Käesolevas töös keskendutakse eelkõige aluseliste intervallide tuvastamisele, mis tuleneb andmestiku olemusest; ultraaluseliste kivimite tuvastamiseks ja teistest kivimitest eristamiseks oleks ideaalne lisaks eelmainitud elementidele kasutada ka ultraaluseliste ja aluseliste kivimitele iseäraseid jälgelemente, mis tõstaks kõigi kivimite määramise usaldusväärsust, olles tavapraktika sarnases olukorras (Hill *et al.* 2021^{a,b}). Samuti toob Pearce (2014) esile immobiilsete jälgelementide vajaduse ultraluseliste ja aluseliste kivimite määramisel subduktsiooni ja saarkaarte vööndis, kus üldlevinud klassifitseerimise meetodid ei ole moondeprotsesse arvestades enam täpsed ega kajasta tegelikku olukorda. Eelmainitud autor mainib ka Ni ja Cr olulisust aluseliste kivimite määramisel, mis on meil andmestikus olemas, aga mainib ka nende elementide tuvastamisel tekkivaid potentsiaalseid mõõtmisvigu ja teiste elementidega kattumisi, millega käesolevas töös arvestatakse ja kontrollitakse Ni vs Cr diagrammi loomisel.



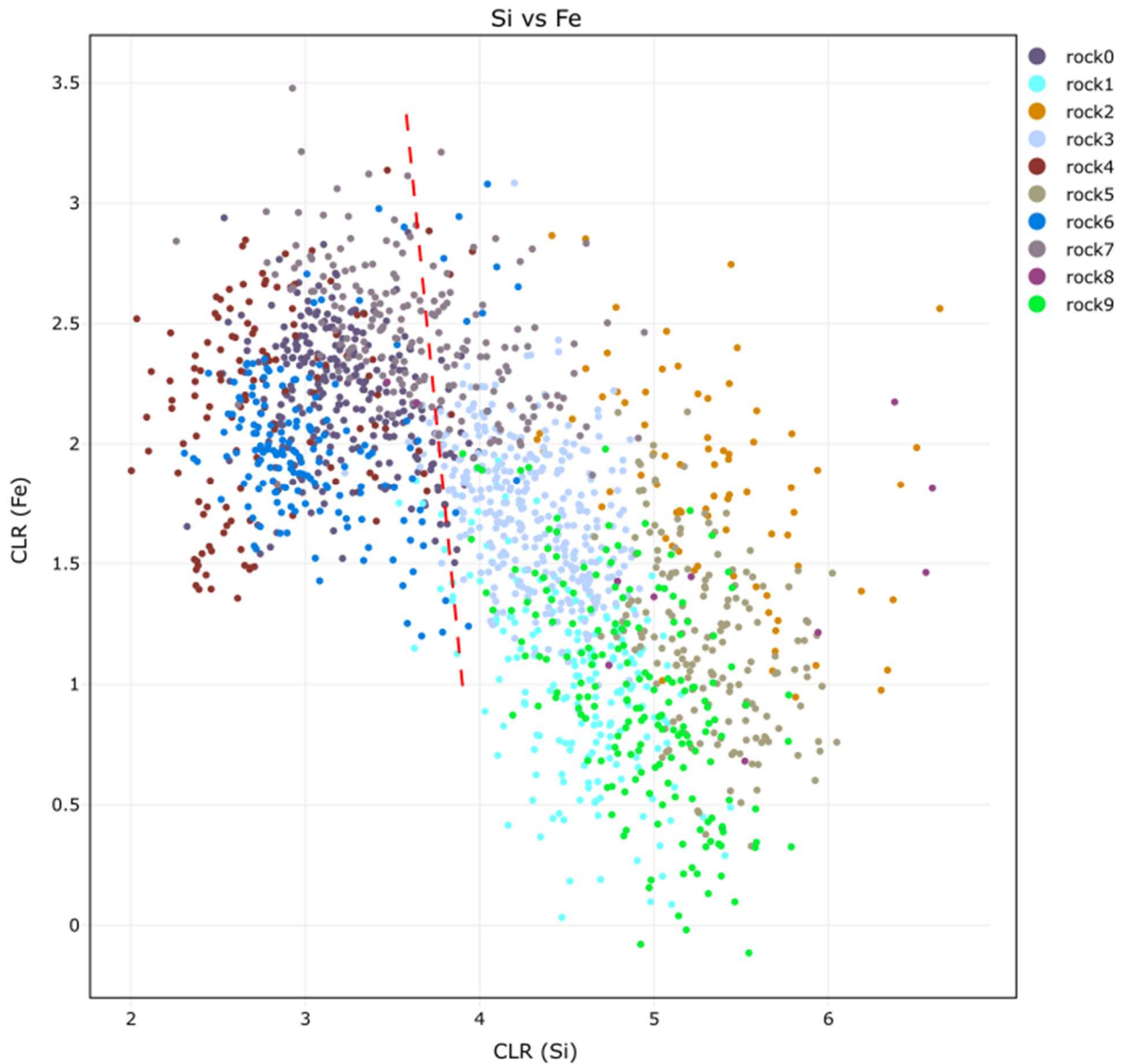
Joonis 12. Mg vs Si diagramm. Kujutatud diagrammil tulevad esile madala Si sisaldusega ja kõrgema Mg sisaldusega kivi 0, 4, 6 ja 7. Antud kivimtüübid kattuvad aluseliseid kivimeid iseloomustavate printsiipidega, tõenäoliselt koosnevad küünekest, pürokseenist, plagioklassist ja oliviinist. Kivi 3, asudes ränisisalduse poolest keskel võib kujutada segakivimit; ülejäänud kivimid on kõrge räni sisaldusega ja suure tõenäosusega metasetendid või happeliste kivimite intrusioonid. Kivi 8 võib esindada happelise kivimi intrusiooni.



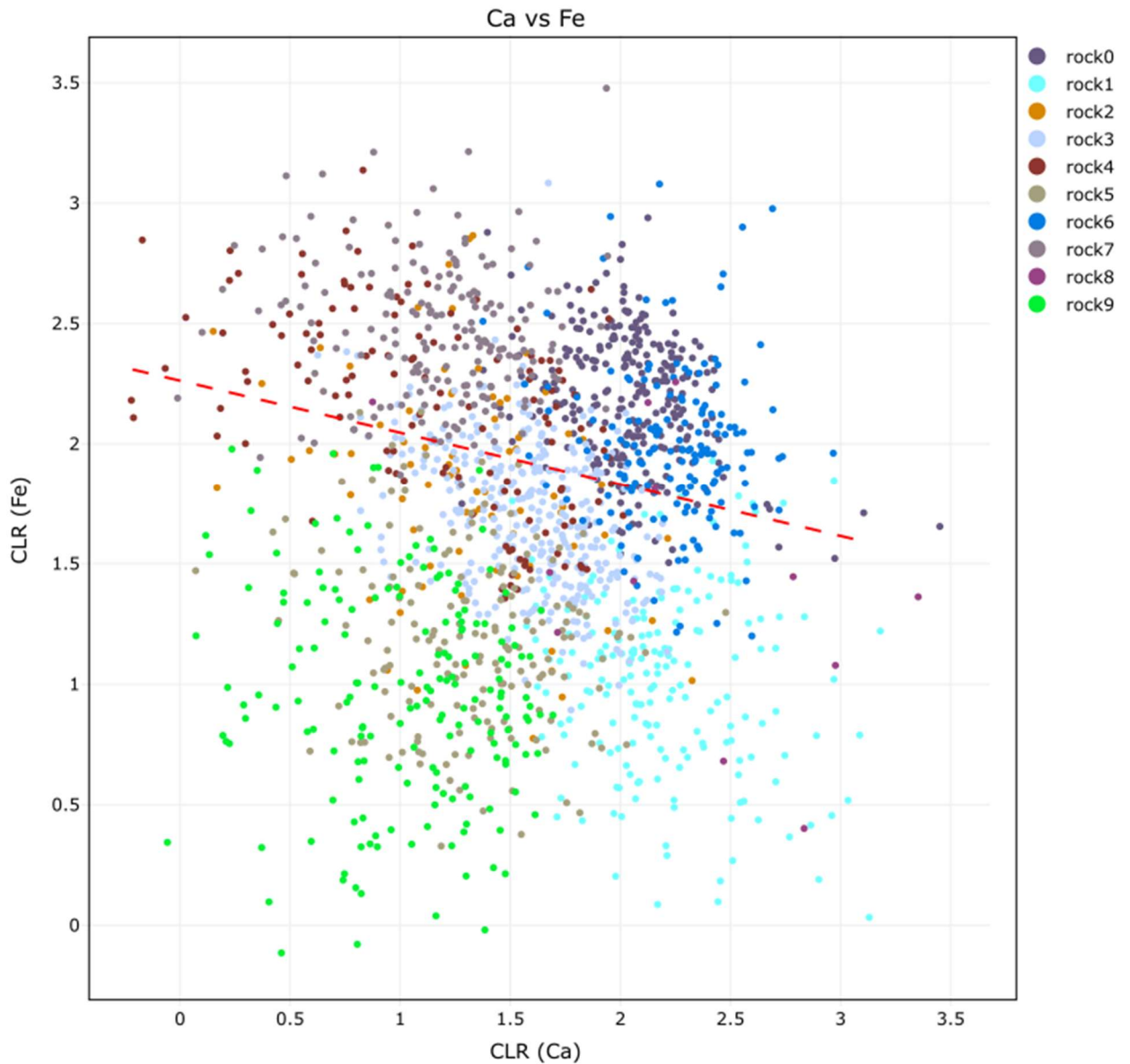
Joonis 13. Si vs Ca diagramm. Kõrgem Ca sisaldus indikeerib aluselistes kivimites plagioklasside ja amfiboolide olemasolule ehk kivi 0 ja 6 võiksid eelmaintud mineraalid olla rohkem esindatud. Kivi 4 ja 7 võiks olla pürokseen ja oliviin rohkem esindatud. Kivi 3, 5, 9 ja 2 on kõrge Si sisalduse ning madalama Ca, mis võivad olla metaseteendid või happelised intrusioonid.



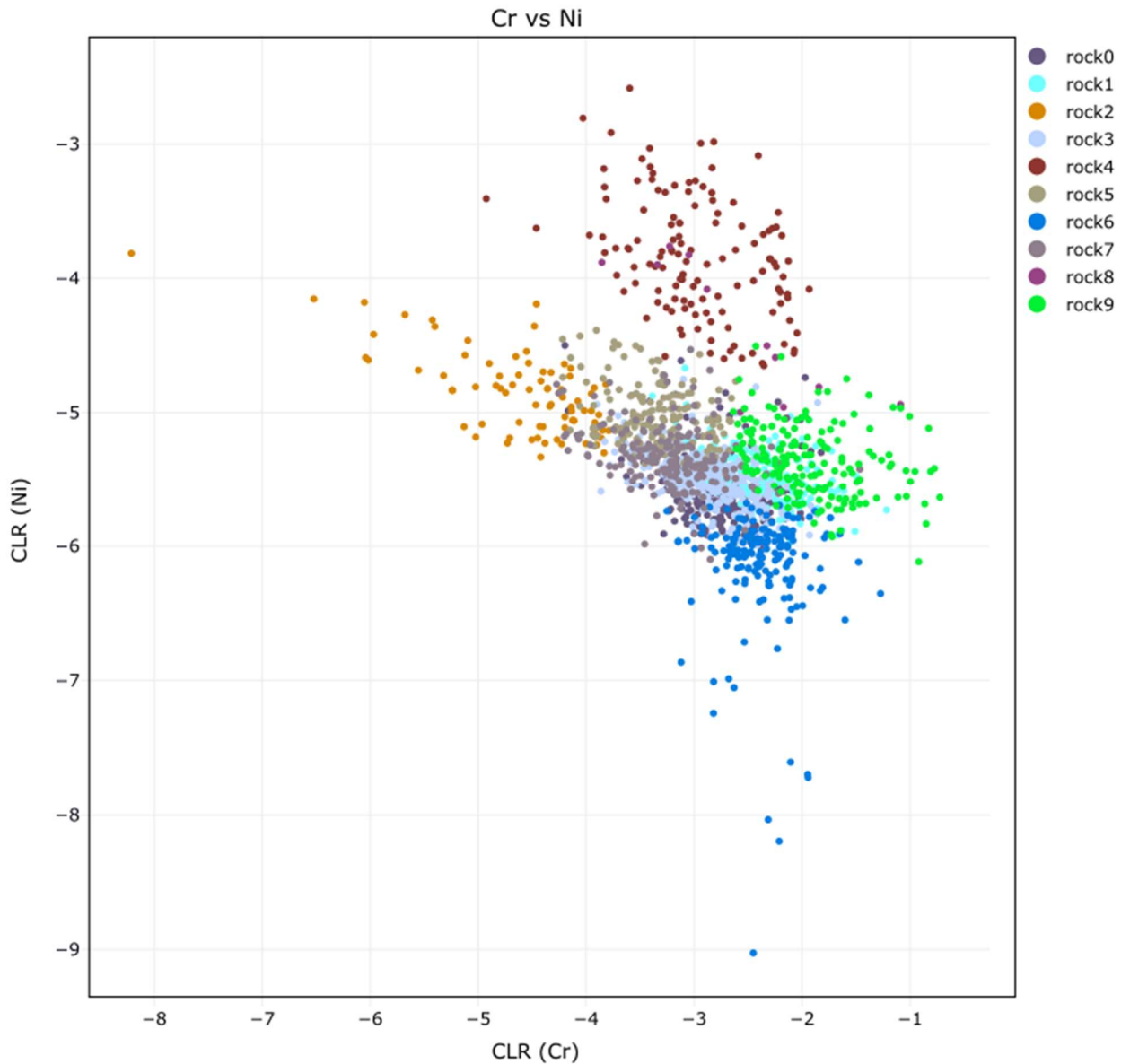
Joonis 14. Mg vs Fe diagramm. Kujutatud diagrammil jäävad silma kõrge Fe ja Mg sisalduse poolest kivi 0, 4, 6 ja 7. Kõrgema Mg sisaldusega kivimtüübid võiks sisaldada rohkemal määral pürokseeni ja oliviini; kõrgem Fe sisaldus võib indikeerida küünekivi domineerimisele või magnetiidi olemasolule. Kivi 2 ja 3 on samuti kõrgendatud Fe ja Mg sisaldusega võrreldes ülejäänud kivimtüüpidega, mis võib potentsiaalselt indikeerida aluselise lähtekivimi moonet või kivi 3 puhul aluselisi kivimeid läbivaid happelisi intrusioone eelnevalt tuvastatud kõrge Si sisalduse tõttu.



Joonis 15. Si vs Fe diagramm. Märgata on kõrget Fe sisaldust juba aluselisteks kivimiteks määratud kivi 0, 4, 6, 7. Kõrge Fe sisaldus võib indikeerida magnetiidi ja ilmeniidi olemasolule kivimis. Kivi 1, 5 ja 9 on selgelt rauavaesed ja ränirikkad, mis võib viidata kvartsi ja päevakivi olemasolule. Kivi 3 jääb keskele, olles ka Mg sisalduse poolest keskel (joonised 14 ja 12), võib tegu olla kõvasti moondunud aluselise kivimiga.



Joonis 16. Ca vs Fe diagramm. Kõrgenenud Fe sisaldus kivimites 0, 4, 6, 7 kinnitab aluselisi kivimeid ning neist Ca rikkamad kivimtüübid. 0 ja 6. Selgelt on Fe vaesemad kivimtüübid 1, 5, 9 ning neist Ca rikkaim kivi 1. Nagu eelnevatel element diagrammidel püsib kivi 3 kõige keskel ja kivi 2 on laiali kogu diagrammi peale.



Joonis 17. Cr vs Ni diagramm. Antud diagrammi tuleb kasutada veidi ettevaatlikult, mistõttu kasutame seda ainult kivi 4 määramisel ja kõrge Ni sisalduse alusel võiks tegu olla ultraaluselise kivimiga. Ülejäänud kivimtüüpide puhul peab tõdema, et Ni ja Cr sisaldused ei ole usaldusväärsed võrreldes eelmiste diagrammidega, sest ükski eelmainitud elemendi olemus siit ei kajastu.

Punktdiagrammide analüüsi tulemusel klassifitseeritakse kivimid aluselisteks, happelisteks või moondekivimiteks. Klassifitseerimisel ei anta kivimitele reaalseid IUGS standardi kohaseid nimetusi,

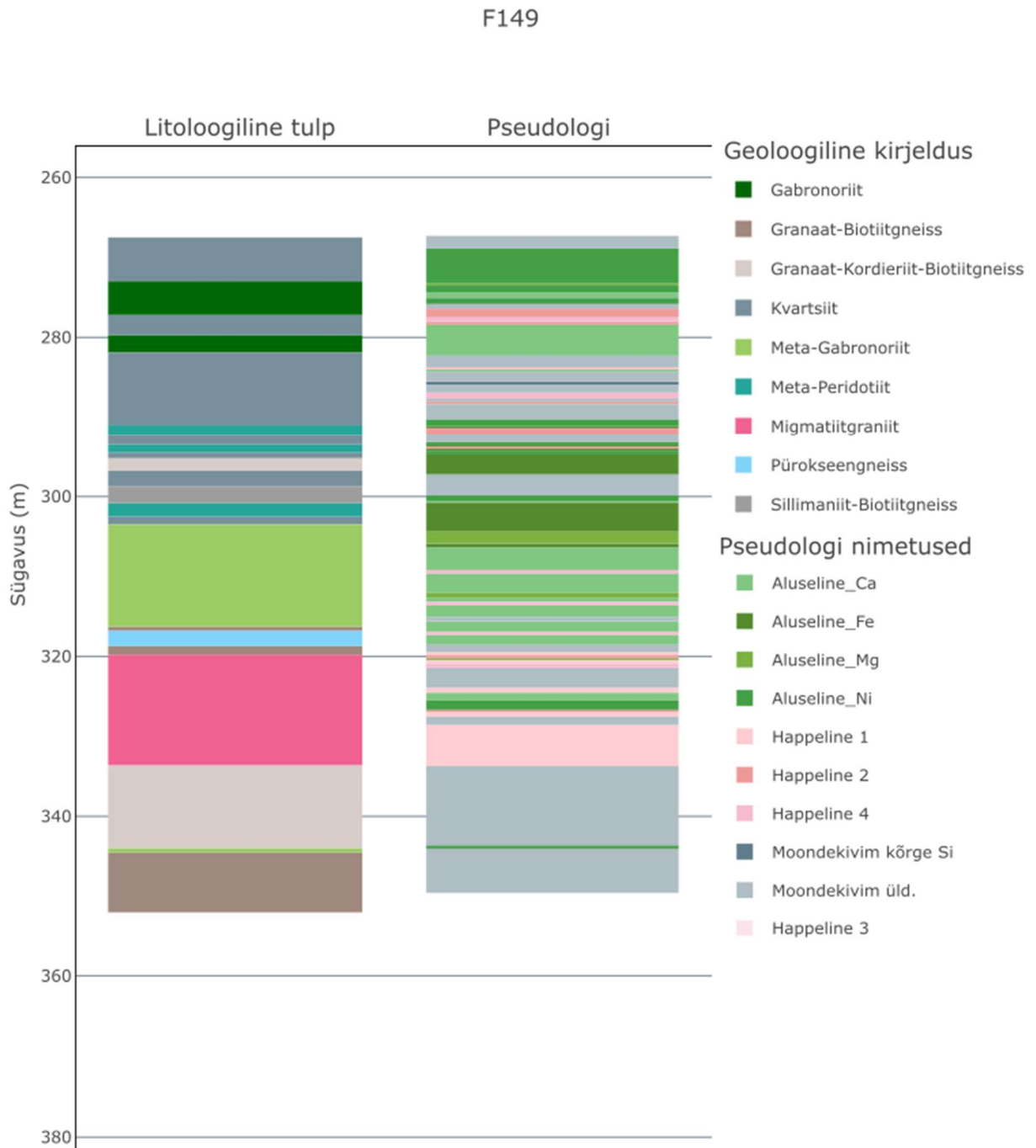
sest see ei ole töö peamine eesmärk. Samuti ühildatakse ultraaluseline ja aluseline kivim ning neid otseselt ei eristata, aga sellegipoolest on ainsana kivi 4 ultraaluselise tunnusega tulenevalt Ni ja Cr sisaldusest.

Kindlate aluseliste ilmingutega kivimtüübid on kivi 0, 4, 6, 7. Eristame neid omavahel vastavalt kõige rohkem esindatud elemendi sisaldusega, mis võiks neid illustreerida. Happelisteks kivimiteks, mis kujutavad endast migmatiidistumist või intrusioone, eristame eelkõige kõrge Si, Ca ja madalate Fe, Mg tulemuste alusel tuvastatud kivimtüüpidega kivi 1, 8 ja 9; samuti kivi 2, mis kõrge Si sisaldusega, aga varieeruva Fe, Mg, Ca tulemustega, mida võib seletada kui ümbritseva kivimi osalise sulamisega. Happelisi kivimeid eristatakse üksteisest ainult numbriga, kuna neid esineb väikeses koguses. Moondekivimiteks klassifitseerime kivimtüüpidega kivi 3 ja 5. Kivi 3 puhul on tegu väga keskmise kivimiga ja kuigi punktdiagrammidelt saadud info alusel võiks liigitada seda ka tugevalt moondu aluseliseks kivimiks, puudub selleks usaldusväärsus ja jäädakse moondekivimi juurde. Kivimtüübi 5 puhul kehtib enamvähem sama, kuid esineb kõrge Si sisaldus, mis tuuakse eraldi välja.

Tabel 6. Algne kivimtüüp ja selle esialgne värv ning uued nimetused koos värviga.

Algne kivimtüüp	Algne värvus	Nimetus	Värvus
0		Aluseline_Ca	
1		Happeline 1	
2		Happeline 2	
3		Moondekivim üldine	
4		Aluseline_Ni	
5		Moondekivim kõrge Si	
6		Aluseline_Mg	
7		Aluseline_Fe	
8		Happeline 3	
9		Happeline 4	

4.2. Puursüdamiku F149 pseudologi kõrvutatud olemasoleva litoloogilise tulbaga



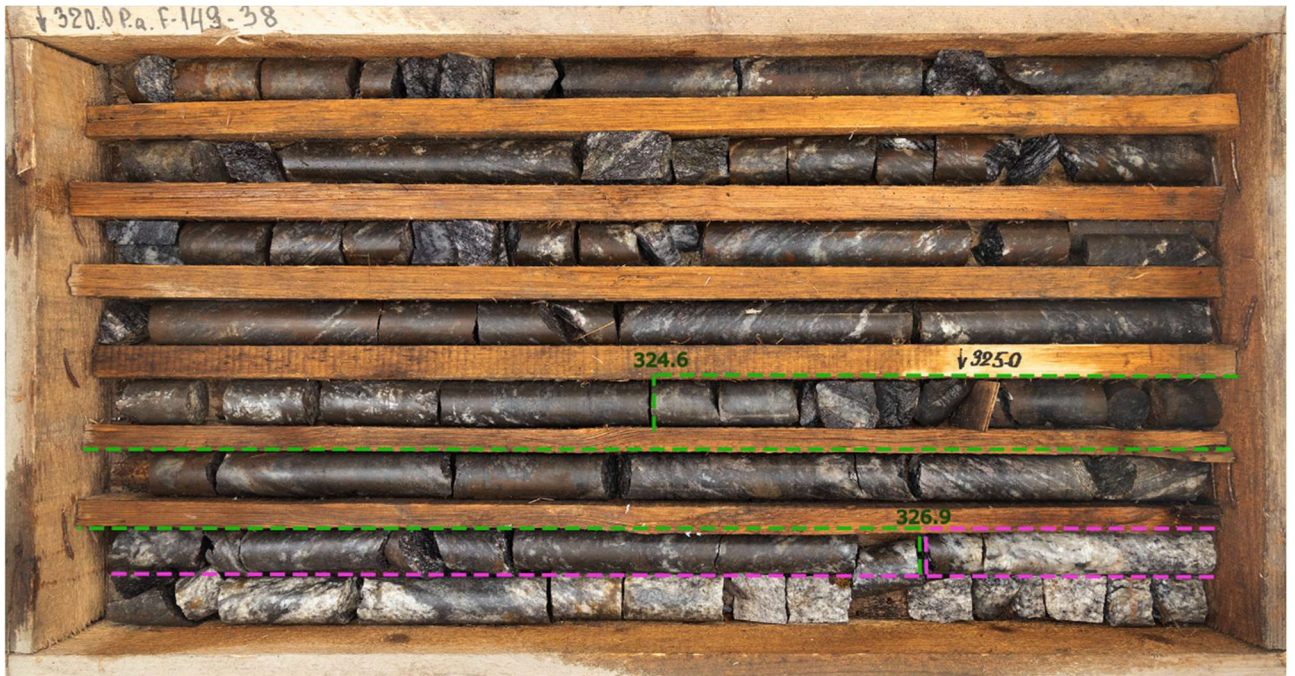
Joonis 18. Puursüdamiku F149 loodud pseudologi koos nimetatud kivimtüüpidega, mis kõrvutatud olemasoleva litoloogilise tulbaga.

Esimene kirjeldatud aluseline intervall, gabronoriit, lasub kahel eraldatud sügavusel 273 m - 277.2 m ja 279.7 m - 281.9 m. Pseudoloogil on kujutatud aluseline intervall 269 m - 276 m ja 278.6 m - 282.5 m. Lisaks on pseudoloogil kajastatud õhukest aluselist intervalli sügavusel 284.2 m - 284.5 m.

Teine aluseline intervall on meta-peridotiidid, mis on eraldatud kolme eraldiseiva üksusena, lasudes sügavustel 291 m - 292.3 m, 293.5 m - 294.5 m ja 300.8 m - 302.8 m. Pseudoloogil on kujutatud aluselisi kivimeid 290.4 m - 291.3 m, 293.3 - 297.4 m, mis sisaldab happelist intrusiooni (kõrge Si). Varasemalt kirjeldatud kolmas üksus algab 300 m pealt ja sulab pseudoloogil kokku järgmise aluselise ilminguga, meta-gabronoriidiga, mis on kirjelduste alusel eraldatud 1 m paksuse kvartsiidi vahekihiga. Antud olukorras oleks võinud 1 m paksune vahekiht esile tulla, sest kvartsiidi eeldatav kõrge Si sisaldus peaks olema tuvastatav.

Kolmas intervall, meta-gabronoriit, lasub sügavustel 303.5 m - 316.3 m ja lisaks järgneb nimetatud intervallile koheselt pürokseengneiss, lasudes sügavustel 316.8 m - 318.7 m; pseudoloogil algab nimetatud intervall varem, sulades kokku eelnevalt mainitud meta-peridotiidi kihiga, lasudes sügavusel 300 m - 317.5 m. Pseudologi puhul pole eraldatud meta-peridotiidi ja meta-gabronoriidi vahelist 1 m kvartsiidi vahekihti ega meta-gabronoriidi ja pürokseengneisi vahelist granaat-biotiitgneisi 0.5 m vahekihti ehk joonistub üks tusedam aluseline intervall. Antud aluseline intervall koosneb ülemises otsas Ni ja Fe rikkamast osast, mis võiks kujutada meta-peridotiiti ja alumises otsas Ca rikkamast osast. Samuti eraldab pseudologi nimetatud aluselises üksuses välja õhukesed happelise kivimi ilmingud, mis võiksid viidata migmatiseerumisele.

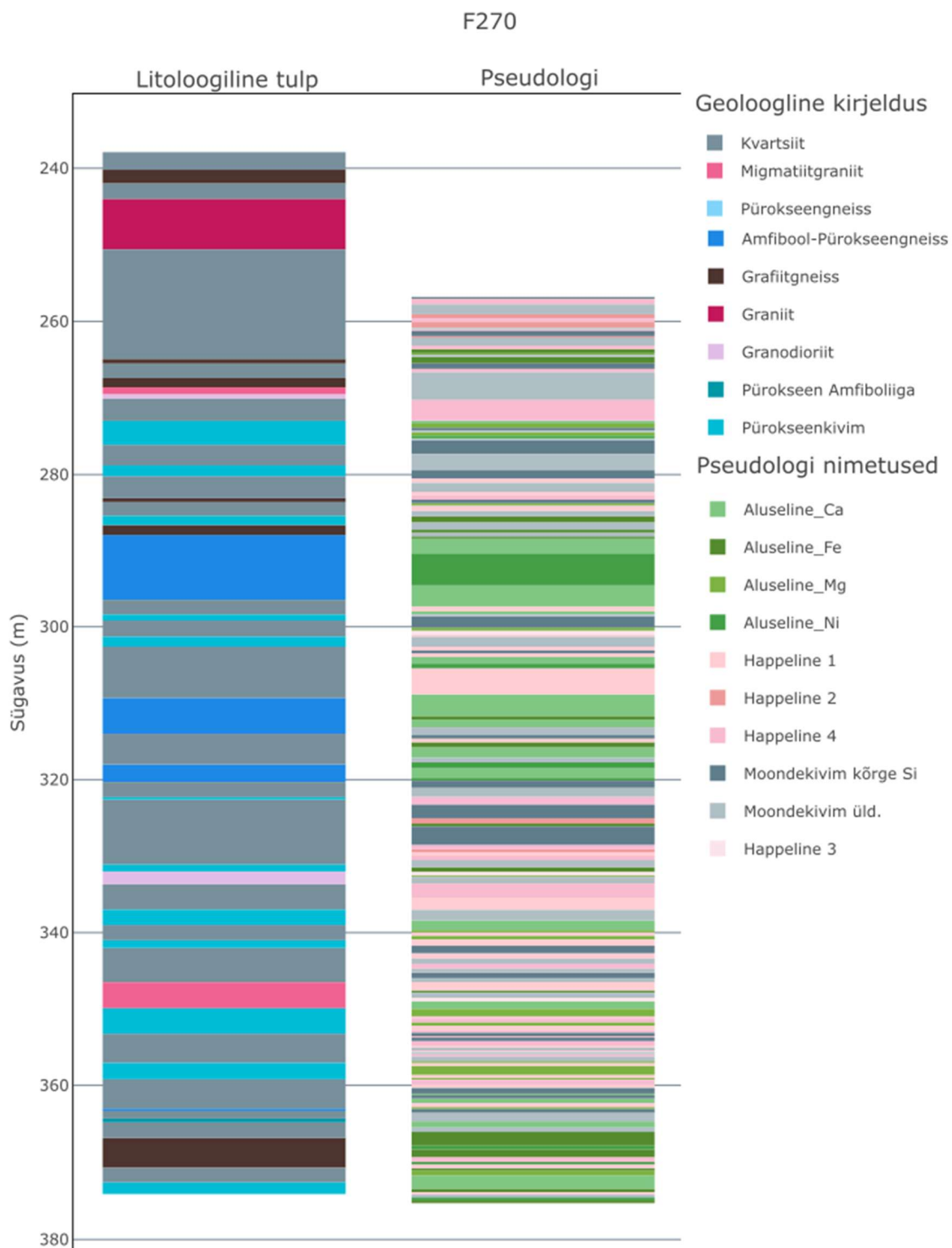
Järgmisi aluselisi intervale pole geoloogilises kirjelduses täheldatud, nimelt sügavustel 320.4 m - 320.7 m on tuvastatud aluseline intervall kahe happelise kivimi vahel ja sügavusel 324.7 m - 326.9 m samuti tuvastatud aluseline intervall happeliste kivimite vahel. Geoloogilise kirjelduse alusel levib eelmainitud intervallis migmatiitgraniit, lasudes sügavusel 319.8 m - 333.6 m. Sellist iseäralikku erinevust geoloogilise kirjeldusega kontrollitakse piltmaterjali alusel, sest kuigi pseudologi loomisel võib kohati toimuda kihtide ühtesulamist, peaksid aluseliste kivimite ja happeliste kivimite keemiline koostis olema piisavalt erinev, et neid omavahel eristada.



Joonis 19. F149 Puursüdamiku kast 320 m - 328.8 m. Rohelise joonega on kujutatud pseudoloogil tuvastatud aluseline kivim ja roosaga happeline. Joonisel on näha, et algselt kirjeldatud migmatiigraniidi intervallis, sügavusel 319.6 m - 333.6 m, esineb tumeda värvusega ja gneisiliku välimusega kivim. Alles sügavuselt 326.9 m algab migmatiitgraniidile iseloomulik heledam värvus.

Viimane aluseline intervall, mis geoloogilises kirjelduses kajastub, on meta-gabronoriit, lasudes sügavustel 344 m - 344.5 m; pseudoloogil on see esindatud sügavusel 343.8 m - 344.2 m. Väike erinevus sügavustes, aga kihi paksus on sarnane.

4.3. Puursüdamiku F270 pseudologi kõrvutatud olemasoleva litoloogilise tulbaga



Joonis 20. Puursüdamiku F270 loodud pseudologi koos nimetatud kivimtüüpidega, mis kõrvutatud olemasoleva litoloogilise tulbaga.

Puursüdamiku F270 pseudologi puhul on aluseliste intervallide algus varem kui seda on täheldatud geoloogilistes kirjeldustes. Esimene aluseline intervall kajastub pseudoloogil sügavusel 263.8 m - 264.5 m ja 264.8 m - 265.6 m, mida eraldab moondekivimina klassifitseeritud kivim. Geoloogilise kirjelduse alusel levib antud vahemikus kvartsiit ja grafiitgneiss. Puursüdamikukasti pilt toodud joonisel 21.



Joonis 21. F270 Puursüdamiku kast 259 m - 275.8 m. Rohelise joonega on kujutatud pseudoloogil tuvastatud aluseline kivim ja halliga mooneline. Joonisel on kujutatud aluseline intervall sügavusel 263.7 m - 265.6 m, mida originaalses kirjelduses pole toodud. Kuna kivim on ümbritsetud moondekivimitega on visuaalselt tuvastamine keeruline.

Esimene geoloogilistes kirjeldustes toodud aluseline intervall, pürokseenkivim, koosneb kolmest eraldiseisvast vahelihist sügavustel 273 m - 276.1 m, 278.8 m - 280.2 m ja 285.5 - 286.7 m. Pseudoloogil on esindatud aluselised kivimid 273.1 m - 274.1 m ja 274.6 m - 275.1 m, mida eraldavad moondekivimid ning järgmised aluselised intervallid on tuvastatud vahemikus 284 m - 284.4 m ja 285.8 m - 286.6 m, mida eraldavad üksteisest happeline ja moondekivim. Pseudoloogil pole tuvastatud keskmist intervalli.

Järgmise aluselise ilminguna on puursüdamikus F270 kirjeldatud amfibool-pürokseengneissi, mis lasub sügavusel 288 m - 294.2 m ja millel järgneb kaks pürokseenkivimi ilmingut sügavustel 298.4 m - 299.2 m ja 301.3 m - 302.6 m, kõik kolm ilmingut on eraldatud kvartsiidiga. Pseudoloogil kajastuvad

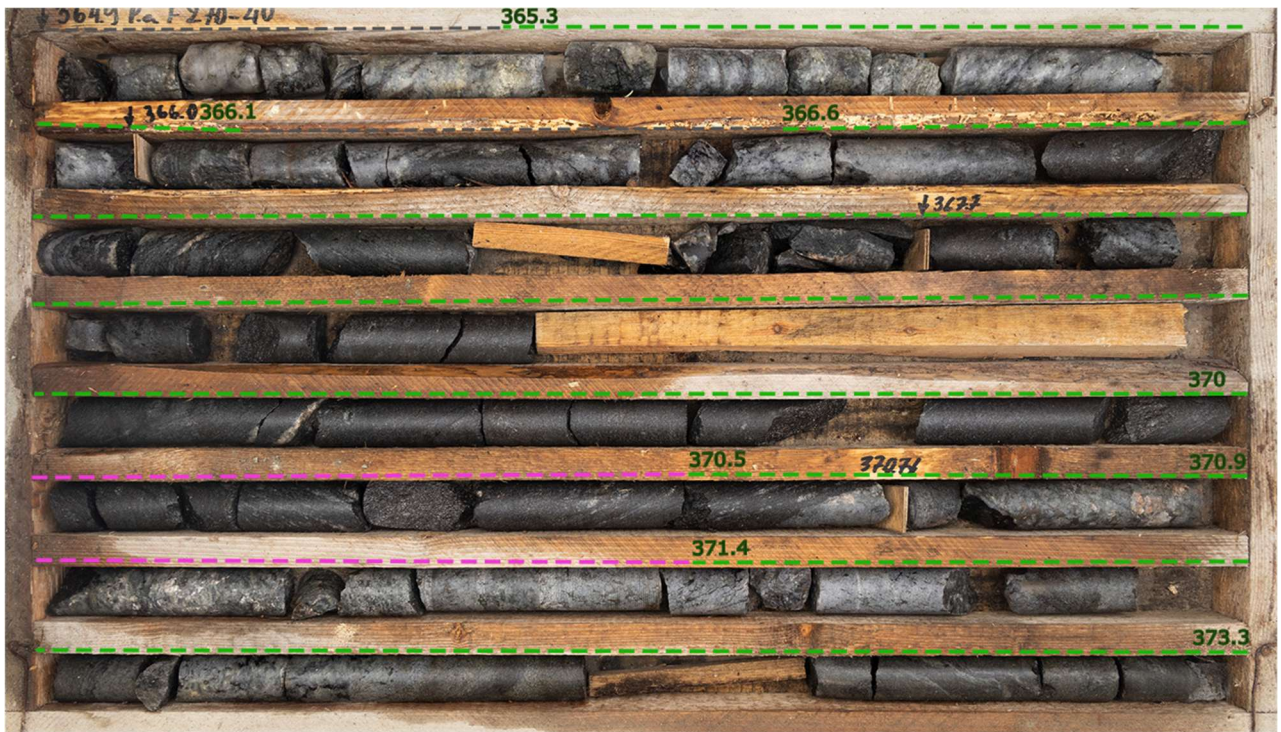
aluselised kivimid 287.6 m - 288 m, 288.4 m - 297.7 m, mis eraldatud õhukese moondekivimi ilminguga ja millele järgneb aluseline kivim 298.3 m - 298.7 m, eraldatud eelmisest aluselisest kihist happelise kivimiga, 300.4 m - 300.8 m, eraldatud eelmisest ilmingust moondekivimiga ja 304.3 m - 305.8 m. Viimase intervalli vahel esineb tüsedamalt moondekivimi ja happelise kivimi seeria. Võrreldes geoloogiliste kirjeldustega tunduvad pseudoloogil aluselised kivimid kergelt nihkes sügavuse suunas. Samuti on vahemiku 286.7 m - 288 m kirjeldatud grafiitgneisiga, kus pseudoloogil esineb õhuke aluseline kivim.

Kolmanda aluselise ilminguna on geoloogilistes kirjelduses täheldatud amfibool-pürokseengneisi olemasolu sügavusel 309.3 m - 314 m ja 318 m - 320.3 m, millele järgneb õhuke pürokseenkivimi kiht sügavusel 322.3 m - 322.6 m, mis kõik omavahel eraldatud kvartsiidiga. Pseudoloogil esineb aluseline kivim sügavusel 309.2 m - 313.5 m, 315.5 m - 317.5 m ja 318.1 m - 320.5 m. Eraldatud ülemises otsas moondekivimi ja happelise kivimiga ning alumises otsas õhukese moondekivimi kihiga. Sellele järgneb aluseline ilming sügavusel 326.2 m - 326.5 m, mida geoloogilistes kirjeldustes pole mainitud, aga tegu võib olla nihkes südamikuga, sest viimane kirjeldatud kiht on sama paksune varasemalt kirjeldatud pürokseenkivimiga.

Neljanda ühildatud intervallina on geoloogilises kirjelduses aluseliste intervallidena pürokseenkivim sügavustel 331.1 m - 332 m, 337 m - 339 m ja 341 m - 342 m, mis eraldatud peamiselt kvartsiidiga, ülemise aluselise kivimi juures esineb granodioriit. Pseudoloogil on aluselised kivimid sügavusel 331.9 m - 332.5 m, esineb happelise kivimi vahekiht, mis võiks olla migmatiit ja selle all lasub aluseline kiht 333 m - 333.2 m. Esineb laiem happelise ja moondelise kivimi tsoon, sarnaselt geoloogilistes kirjeldustes toodud granodioriidile, millel järgnevad aluselised kivimid sügavustel 338.9 m - 340.5 m ja 340.9 m - 341.4 m, mida eraldab happeline kivim.

Viimaseid aluselisi kivimeid ülemistest eraldab geoloogilistes kirjeldustes kvartsiit ja migmatiitgraniit, millele järgneb pürokseenkivim sügavusel 350 m - 353.3 m ja 357.1 m - 359.2 m. Neile järgneb amfibool- pürokseengneiss sügavusel 363 m - 363.3 m ja pürokseen amfibooliga sügavusel 364.3 m - 364.8 m. Viimane aluseline ilming asub sügavusel 372.6 m - 374.1 m. Pseudoloogil kajastuvad aluselised ilmingud 348 m - 348.4 m, 349.5 m - 351.6 m, 352.4 m - 352.8 m, millele järgneb tihe happelise ja moondelise kivimi seeria. Järgmine aluseline ilming on sügavusel 357.4 m - 357.7 m, 358 m - 359.2 m ja 359.6 m - 359.9 m, mida eraldavad üksteisest happeline kivim. Järgmiste intervallidena esineb aluseline kivim 361.7 m - 361.9 m, 362.3 m - 363 m ja 363.4 m - 363.7 m. Esineb

moondekivimi vahekiht, millele järgnevad aluselised kivimid sügavustel 365.3 m - 366 m, 366.6 m - 370 m, eraldatud happelise kivimi poolt üks õhuke ilming sügavusel 370.5 m - 370.8 m ja millele järgneb happeline kivim. Viimased aluselised ilmingud on sügavustel 371.4 m - 374.5 m ja 375.2 m - 376 m. Originaalses kirjelduses on vahemikus 366.8 m - 370.7 m kirjeldatud grafiitgneissi, mis on vastuolus pseudologiga, kus on märgitud aluselise kivimi esinemine. Samuti on huvitav, et antud vahemikus kajastub pseudologilt happelise kivimi olemasolu; tegemist võib olla valesti klassifitseerimisega elementide punktdiagrammidel või Mosaic Data poolt tehtud üldistusega.



Joonis 22. F270 Puursüdamiku kast 364.9 m - 373.3 m. Rohelise joonega on kujutatud pseudologil tuvastatud aluseline kivim ja halliga moondeline.

Jooniselt 22 tuleb ilmsiks, et suurem osa südamikust on kadunud, mis tähendab, et andmete puudumisel on Mosaic Data interpoleerinud puuduvad andmed olemasolevatest ja pseudologis kajastatu on umbmäärane. Samas ei ole originaalsetes kirjeldustes üldse antud vahemikus aluselisi kivimeid kirjeldatud, mis-tõttu antud vahemik nõuaks täiendavaid uuringuid ja tähelepanu.

4.4. Pseudoloogide kattuvus varasema kirjeldusega

Töö käigus eraldati masinõppe meetodil ja punktogrammide analüüsi tulemusel 4 erinevat aluselist kivimit. Pseudoloogidel kajastuvad aluselised kihid on tihti triibulised, mis võivad endas kujutada moondeastmeid, osalist põhikivimi üles sulamist ja segunemist või magma diferentseerumist. Niin (2002) on toonud välja Eesti aluskorra aluseliste kivimite visuaalse kirjeldamise keerukuse; moonutusprotsesside tulemusel on kivimpiirid tihti hägusad ja moondesarjad moodustavad ühtlaseid üleminekuid. Eelnimetatud üleminekuid on loodud pseudoloogidel kohati näha nii aluselistes kivimites endas, kui ka ülejäänud kivimites ja töös kasutatud uuringumeetod võib osutada kasulikus seal kus tundlikud üleminekud võivad jääda silmale nähtamatuks.

Algselt n.ö. masinõppe treeningsüdamikuks võetud puursüdamiku F149 võrdlemisel loodud pseudoloogiga on üpris selgelt näha, et olemasolevates kirjeldustes eraldatud aluselised intervallid on sarnastel sügavustel, mis masinõppe meetodil loodud pseudoloogidel kajastuvad ja nimetatud aluselised vahemikud enamjaolt kattuvad, kuigi tihti esineb paksuste erinevusi. Paksuste erinevused võivad tuleneda mitmest asjaolust: kirjeldamisel tehtud üldistusest või kasutatud andmestikust ja selle valesti klassifitseerimisest masinõppe meetodiga. Tuleb ka arvestada, et vanadel puursüdamikel on mõned intervallid puudu ja alati ei ole märgitud sügavused usaldusväärsed, sest puurkastide plokid ehk birkad võivad olla loetamatud või ajas nihkunud. Tegelikuses ei saa kumbagi välistada ja antud olukorras oleks lahendus puursüdamik üle kirjeldada või proovida olemasolevaid andmeid korrigeerida, viimasel ja äärmisel juhul tuleks uuesti skaneerida. Võrreldes omavahel puursüdamike F149 ja F270 pseudoloogisid on märgata esimese puhul ühtlasemat pilti, mis võib tuleneda andmestikust, sest esineb vähem alla avastamispiiri tulemusi, aga välistatud ei ole ka viimase keerulisem geoloogiline ehitus.

Lisaks heale kattuvusele on pseudoloogidel kajastatud aluselisi kihte, mida geoloogilistes kirjeldustes pole mainitud. Silmapaistvaim neist on puursüdamikul F149 sügavusel 324.7 m - 325.6 m tuvastatud aluseline intervall, mis on geoloogilistes kirjeldustes märgitud migmatiitgraniidiks. Puursüdamiku pilte vaadates esineb nimetatud sügavusintervallis tumedam kivim, mis värvuse poolest viitab aluselise kivimile ja mida toetavad XRF andmed. Pseudoloogisi analüüsides tekib tunne, et kohati on mõned aluselised intervallid kokku liidetud. Lisaks kajastub pseudoloogidelt täiendavat infot, mida geoloogilisel kirjeldusel pole, nagu õhukesed happeliste kivimite vahekihid puursüdamikul F149 tuvastatud meta-gabronoriidi kehas sügavusel 303.5 m - 316.3 m ja võivad endast kujutada

migmatiitseid sooni. Eelnimetatud nüanss tuleb nähtavale ainult juhtudel, kus XRF mõõtepunkt sellele satub ehk eelduseks on väga tihe andmestik.

Kui vaadata puursüdamikku F270 pseudologi, on pilt väga kirju ja kohati on aluseliste kihtide paksused väga õhukesed ja lõikuvad varasemalt klassifitseeritud moondekivimitega. Tüsedamad aluselised ilmingud seevastu on ka loodud pseudoloogil kenasti kajastatud. Sarnaselt puursüdamikule F149, on kajastatud aluseline ilming kohas, kus seda originaalses kirjelduses pole täheldatud; sügavusel 263.7 m - 265.6 m, mis originaalselt kirjeldatud kui kvartsiit. Kohati on mõned originaalselt kirjeldatud aluselised vahemikud täiesti puudu, nagu näiteks pürokseenkivim sügavusel 278.8 m - 280.2 m. Originaalne kirjeldus mainib migmatiidgraniiti ja selle all lasuvat pürokseenkivimit sügavusel 350 m - 353.3 m; pseudoloogil on kirjeldatud migmatiidgraniidi vahemikus tihedalt happelise ja moondekivimi vahekihte. Eelnev võib tuleneda keerukast geoloogiast, happelise ja moondekivimi segunemine intrusioonide käigus või andmetöötuse ja kivimite klassifitseerimise puudulikkusest. Võib ka oletada, et puursüdamiku F270 pseudologi alumises otsas kujutatud õhukeste aluseliste, moondekivimite ja happeliste kivimite triibulisus indikeerib tugevatele moondeprotsessidele, mis kajastub happelise, aluselise ja põhikivimi segunemisest või võimalikust gneisistumisest. Puursüdamiku F270 pseudologist tuleb ilmsiks andmepunktide tihedus, mis võimaldab esialgseid andmeid täpsustada, aga liiga tihedate kirjelduste muutuste korral on logi ka raskesti mõistetav ja loetav, mis eeldab mõningaid lihtustamisi ja üldistamisi. Käesoleva töö raames, kus otsiti aluselisi kivimeid on tihedama logi kasutamine õigustatud ja kuigi tehti mõningaid lihtsustusi, tuleks vastavalt loodava logi eesmärgile valida õige täpsusklass ehk pseudologi domeeni skaala.

On huvitav asjaolu, miks pole ei Niin (2002) ega ka nimetatud töö eelkäia Kivisilla *et al.* (1994) maininud enda töödes puursüdamikku F270? Nii varasematest kirjeldustest ning õhikute petrograafilistest kirjeldustest lähtuvalt kui ka käesoleva töö tulemusena on aluseliste kivimite ilming puursüdamikus F270 tuvastatud.

4.5. Edasised tegevused

Käesoleva uuringu raames kasutati Data Mosaic-i ainult kahe puursüdamiku pseudologi loomisel, aga antud tarkvara on teiste poolt edukalt kasutatud sadade puursüdamike andmestikku ühildamiseks üle suurema ala (Hill *et al.* 2021^{a,b}; Zekri *et al.* 2025). Sisestavate andmetele on seatud 99MB piirang, aga arvestades, et käesolevas töös kasutatud XRF andmestik oli ~145KB võiks ühe korraga analüüsida ligikaudselt 700 puursüdamikku ja nende andmed ühildada. Mitme puursüdamiku samaaegne

klassifitseerimine ja töötlemine tagab andmete ühesuse, mis võimaldaks luua üheselt mõistetava ja omavahel seostuva Eesti aluskorra kaardi. Edasiste etappidena saaks andmeid kasutada esialgse ja mõnevõrra lihtsustatud aluskorra 3D mudeli loomisel.

3D mudeli loomise vajadusele viitab ka asjaolu, et enamus töö käigus pseodoloogidele kujutatud ja ka varasemalt kirjeldatud aluseliste kivimite ilmgud paiknevad sarnastel sügavustel ning võib eeldada, et samad intrusioonid lõikavad puursüdamikku F149 ja F270. Selle kinnitamiseks võiks teostada jälgelementide analüüsi, mille alusel saaks määrata aluseliste intrusioonide vanuse Svekofenni orogeneesi aegseteks või hilisemateks post-orgoenseteks ja viimase puhul võiks juba 3D kaardistamisega otsida intrusioonide koldeid maakmineraalide leidmiseks.

Tulevikus tuleks tähelepanu pöörata skaneerimisjaama kasutamisele, käesolevas töös on kajastatud skaneerimisjaamast tuleneva XRF andmestiku olemus. Antud töö käigus selgus puudulike andmete hulk, mis eelkõige kajastub alla avastamispiiri saadud analüüsi tulemustena, millest on toodud kokkuvõtte tabelis 3. See ei tähenda, et andmed oleks ebausaldusväärsed, aga nende kasutamisel tuleb olla ettevaatlik ja eelmainitud arvesse võtta. Kuna meie aluskord koosneb peamiselt moondekivimitest, mis on läbinud mitmeid orogeenseid sündmusi (Koppelmaa 2002; Soesoo 2004; Soesoo *et al.* 2020), on oluline rõhk immobiilsete jälgelementide tuvastamisel, sest neilt saadavad sisendid on usaldusväärsed (Pearce 2014). See on mõistetav, et mõningased mõõtevead on tulnud puursüdamike olemusest: ümmargune, reljeefne ja alatihti lõhenenud; eelmainitud me lihtsalt muuta ei saa, aga pikem XRF analüüsi aeg võiks lahendada alla avastamispiiri tulemuste saamise. Detailne ja usaldusväärne andmestik on aluseks vanade kirjelduste täiendamiseks ning uute teadmiste saamiseks.

4.6. Data Mosaic kasutamise kogemusest

Käesolevas töös kasutatud Data Mosaic on mitmekülgne töövahend geokeemiliste, spektraalsete või geoloogiliste kirjelduste interpreteerimiseks ning töötlemiseks. Hetkel töödeldi ainult geokeemilisi andmeid koos olemasoleva geoloogiliste kirjeldustega ja kogemus spektraalandmete analüüsi võimalustest puudub. Tarkvara mitmekülgsus ja tõhusust kinnitavad väga selged töö tulemused ja isiklik tarkvara kasutamise kogemus. Data Mosaici eeliseks on selle ligipääsetavus; tarkvara ei pea alla laadima, ega üles seadistama, sest see asub täielikult veebikeskkonnas ja ainus eeldus selle kasutamiseks on interneti olemasolu. Lisaks on olemas väga põhjalik ja selge tööjuhend tarkvara kasutamiseks, mis aitab pakutud masinõppe meetodeid maksimaalselt kasutada. Saadaval on ka mitmeid Data Mosaic kasutavaid uuringuid, mis käsitlevad tarkvara rakendamist reaalsetes oludes (Hill *et al.* 2021^{a,b}; Zekri *et al.* 2025).

Kuigi tegemist on lihtsa, kättesaadava ja intuitiivse tarkvaralahendusega, on käesoleva töö tegemisel täheldatud mitut kitsaskohta, millele tuleb tähelepanu pöörata. Analüüsitav andmestik eeldab põhjalikku eeltööd, mis pole ebatavaline sarnaste tarkvarade puhul ja Data Mosaic tööjuhendis on aksepteeritavate andmete koostamiseks juhend olemas. Tarkvara kasutamine ja selle ülesehitus eeldab lineaarset tööprotsessi, mis tähendab, et vahepealseid tulemusi ei saa katsetamise eesmärgil salvestada; kuigi veebiliides salvestab tehtud tööd reaalajas, pole võimalik jooksvalt muudetavaid parameetreid algsesse olukorda taastada ehk kui olen pseudoloogile andnud uued värvid ja nimetused ei ole võimalik algset seisundit lihtsalt taastada ja samuti ei ole võimalust kopeerida tööseansse, et üht analüüsi erinevalt katsetada. Tihti pole ka tulemused 100% korratavad, mis tuleneb masinõppe meetodi eripärast; samu elemente samade parameetritega analüüsides võib märgata pisikesi muutusi ja erinevusi kihipiiride määramisel, kehvema andmestiku puhul on sellised variatsioonid tugevamad. Data Mosaic liidesesse on sisseehitatud punktdiagrammi tegemise võimekus mida kasutati ka käesoleva töö andmete visualiseerimiseks. Lisaks on võimalus luua olemasoleva geoloogilise kirjelduse alusel litoloogiline tulp. Kahjuks puudub võimalus mitut funktsiooni samaaegselt kasutada ja visualiseerida, mis muudab töövoolu kohati aeglasemaks. Kindlasti on eeliseks andmete eksportimise võimalus, et neid ka mujal kasutada.

Sellegipoolest, et tarkvaral esineb kitsaskohti, on selle potentsiaal väga suur. Data Mosaic võib sobida abivahendina esmastel geoloogilistel kirjeldustel, eeldades, et puursüdamikult on kogutud enne põhjalikku visuaalset kirjeldamist spektraalsed või geokeemilised andmed. Pideva lainekehandi

teisendusega saadud kihipiiride klassifitseerimisel erinevate masinõppe meetoditega on võimalik luua n.ö. spikker, mis võiks viidata sügavusvahemikele kust otsida üleminekuid ühelt kivimilt teisele, eriti juhul kui need on visuaalselt eristamatud.

Samuti kui töödeldavad andmed peaks koosnema mitmest puursüdamikust, kus on teadaolevalt sarnaste omadustega kihid ja ainuüksi visuaalse kirjeldamise tulemusel ei pruugi need ühtida näiteks lihtsa värvuse varieeruvuse tõttu, saab geokeemiliste andmete põhjal kogu läbilõike sarnaselt ja üheselt defineerida.

Data Mosaic on hea abivahend geoloogile, aga selle kasutamine eeldab head algandmestikku ja mõningasi eelteadmisi uuritavast kivimist. Kahjuks või õnneks ei saa tarkvaraga asendada geoloogilist intuitsiooni ja teadmisi, vähemalt veel mitte.

Kokkuvõte

Töö tulemused näitavad, et masinõppe meetodiga on võimalik tuvastada eesti aluskorras aluseliste kivimite ilminguid. Kasutades Geotek MSCL-XYZ XRF skaneerimisjaama XRF andmeid ja Data Mosaic tarkvara loodi pseudoloogid, millele anti geoloogiline tähendus kivimite keemilise koostise järgi. Kivimite tuvastamisel kasutati elemente Si, Mg, Cr, Ca, Fe ja Ni, millest eriti kasulikuks osutusid Si, Mg, Fe aluseliste kivimite määramisel.

Loodud pseudoloogide kattuvus olemasoleva geoloogilise kirjeldusega oli hea, kuigi esines ka iseäralikke lahknevusi ja andmestikule tuginedes osutus happeliste ning moondekivimite määramine keeruliseks. Eelnev viitab vajadusele meetoodika täiendamisele; kas andmestiku usaldusväärsuse tõstmisele ja jälgelementide kasutamisele, kasutatud masinõppe parameetrite muutmisele või mainitud lahknevuste kontrollimiseks muul viisil.

Käesolev töö illustreerib andmepõhist lähenemist vanade puursüdamike kirjelduste täpsustamiseks ja selle potentsiaali suuremal skaalal rakendamiseks. Järgmiste etappidena võiks katsetada masinõppe rakendamist korraga rohkematele puursüdamike andmetele, mis sobiks aluskorra struktuuride visualiseerimiseks 3D mudeli baasil.

Identification of ultramafic and mafic rocks using machine learning methods based on XRF data from drill cores F149 and F270

Karel Pettai

Summary

The results of this study demonstrate that machine learning methods can be used to identify occurrences of basic rocks in Estonia's crystalline basement. Using XRF data acquired with a Geotek MSCL-XYZ scanning system and processed in Data Mosaic software, pseudo logs were generated and geologically interpreted based on the chemical composition of the rocks. The classification relied on the elements Si, Mg, Cr, Ca, Fe, and Ni, among which Si, Mg, and Fe proved especially useful for distinguishing basic lithologies.

The similarity between the generated pseudo logs and existing geological logs was generally good, although some notable discrepancies emerged. Based on the dataset, acidic and metamorphic rocks were more difficult to classify reliably. These issues highlight the need to improve the methodology, either by increasing data quality and incorporating trace elements, adjusting machine learning parameters, or validating the mismatches through alternative means.

This study illustrates the potential of a data-driven approach to refining descriptions of legacy drill cores and its applicability on a broader scale. As the next step, machine learning could be applied to a wider range of cores simultaneously, providing a basis for visualizing basement structures using 3D geological models.

Tänuavaldused

Töö autor soovib tänada oma juhendajat Johannes Vindi koostöö eest. Samuti tänatakse Siim Nirgit teema pakkumise eest.

Kasutatud kirjandus

- Aitchison, J., 1986. The statistical analysis of compositional data. Chapman and Hall, London, 416.
- Barnes, S. J., Osborne, G. A., Cook, D., Barnes, L., Maier, W. D. and Godel, B., 2011. The Santa Rita nickel sulfide deposit in the Fazenda Mirabela intrusion, Bahia, Brazil: geology, sulfide geochemistry, and genesis. *Economic Geology*, 106, 1083–1110.
- Cawthorn, R. G., Barnes, S. J., Ballhaus, C. and Malitch, K. N., 2005. Platinum Group Element, Chromium, and Vanadium Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks. In: Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J. and Richards, J. P. (eds), One Hundredth Anniversary Volume, Society of Economic Geologists, 513–546.
- CSIRO, 2021. Data Mosaic factsheet. CSIRO Mineral Resources, Australia.
- DataMosaic, 2025. Data Mosaic user guide. <https://datamosaic.exploration.tools/userguide> (viimati külastatud 15.05.2025).
- EGT, 2023. Eesti kristalsete aluskorra kivimite strateegiliste maavarade otsingute ja uuringute teekart. Eesti Geoloogiakomitee, Tallinn, 22.
- Geotek Ltd. MSCL-XYZ Manual. Multi-Sensor Core Logger – XYZ. Geotek Ltd., Daventry, United Kingdom.
- Hallberg, J. A., 1984. A geochemical aid to igneous rock type identification in deeply weathered terrain. *Journal of Geochemical Exploration*, 20(1), 1–8.
- Hill, E. J., Fabris, A., Uvarova, Y. and Tiddy, C., 2021^a. Improving geological logging of drill holes using geochemical data and data analytics for mineral exploration in the Gawler Ranges, South Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 70(4), 1-27.
- Hill, E. J., Pearce, M. A. and Stromberg, J. M., 2021^b. Improving automated geological logging of drill holes by incorporating multiscale spatial methods. *Mathematical Geosciences*, 53(1), 21–53.
- Kirs, J., Puura, V., Soesoo, A., Klein, V., Konsa, M., Koppelmaa, H., Niin, M. and 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(4), 219–228.
- Kivisilla, J., ja Niin, M., 1994. Eesti aluskorra kivimikomplekside geokeemiline ja mineraloogiline korrelatsioon Balti kilbiga. Aluselised kivimid. Aruanne, Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, 63.
- Koppelmaa, H., 2002. Eesti kristalse aluskorra geoloogiline kaart. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, 32.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745–750.
- Le Bas, M. J. and Streckeisen, A. L., 1991. The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society of London*, 148, 825–833.
- Le Maitre, R. W. (ed.), Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B. and Bateman, P., 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union*

of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press, Cambridge, 256.

Niin, M., 2002. Non-acid igneous rocks of the crystalline basement of Estonia. *Bulletin of the Geological Survey of Estonia*, 10(1), 4–19.

Nirgi, S., Maala, L., Kont, R., 2024. Kriitiliste toormete ja nendega assotsieeruvate elementide tuvastamine ning uuringupotentsiaali hindamine Eesti aluskorras. *Eesti Geoloogiateenistus, aruanne nr EGF 9895*, 57.

Palarea-Albaladejo, J. and Martín-Fernández, J. A., 2015. zCompositions: R package for multivariate imputation of left-censored data under a compositional approach. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 143, 85–96.

Palarea-Albaladejo, J. and Martín-Fernández, J. A., 2024. zCompositions: Treatment of Zeros, Left-Censored and Missing Values in Compositional Data Sets. R package version 1.5.0-4. <https://CRAN.R-project.org/package=zCompositions> (viimati külastatud 03.05.2025).

Pearce, J. A., 2014. Immobile element fingerprinting of ophiolites. *Elements*, 10(2), 101–108.

Puura, V., Vaher, R., Klein, V., Koppelmaa, H., Niin, M., Vanamb, V. ja Kirs, J., 1983. Eesti kristalne aluskord. *Nauka, Moskva*, 1–208. (vene keeles)

Ripley, E. M. and Li, C., 2018. Metallic Ore Deposits Associated with Mafic to Ultramafic Igneous Rocks. In: *Ore Deposits: Origin, Exploration, and Exploitation*. Elsevier, 101–122

Rollinson, H. R., 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical, Harlow, 352.

Soesoo, A., Nirgi, S. and Plado, J., 2020. The evolution of the Estonian Precambrian basement: geological, geophysical and geochronological constraints. *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 3, 5–18.

Soesoo, A., Puura, V., Kirs, J., Petersell, V., Niin, M. and All, T., 2004. Outlines of the Precambrian basement of Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, 53(3), 149–164.

Streckeisen, A. L., 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12, 1–33.

Wang, J., Su, B.-X., Robinson, P. T., Xiao, Y., Bai, Y., Liu, X., Sakyi, P. A., Jing, J.-J., Chen, C., Liang, Z. and Bao, Z.-A., 2021. Trace elements in olivine: Proxies for petrogenesis, mineralization and discrimination of mafic-ultramafic rocks. *Lithos*, 388–389, 106085.

Winter, J. D., 2010. *Principles of igneous and metamorphic petrology*. 2nd ed. Pearson Education, Boston, 738.

Zekri, H., Cohen, D., Rutherford, N., Folkes, C. and Thomas, M., 2025. Rapid analysis of drill core data for detection of geological boundaries. *Journal of Geochemical Exploration*, 269, 107634.

Lisad

Töös kasutatud algandmed on saadaval Eesti Geoloogia Fondist, aruanne nr EGF 9895.

Nirgi, S., Maala, L., Kont, R., 2024. Kriitiliste toormete ja nendega assotsieeruvate elementide tuvastamine ning uuringupotentsiaali hindamine Eesti aluskorras. Eesti Geoloogiateenistus, aruanne nr EGF 9895.

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina,

Karel Pettai,
(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) minu loodud teose:
Ultraaluseliste ja aluseliste kivimite määramine masinõppe meetodil kasutades XRF andmeid
puursüdamike F149 ja F270 näitel,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

Johannes Vind,
(juhendaja nimi)

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

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karel Pettai
26.05.2025