

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

Annamaria Krull

**Sonda-Uljaste magnetanomaalia geofüüsikalised ja
petrofüüsikalised uuringud**

Bakalaureusetöö geoloogias (12 EAP)

Juhendaja: Jüri Plado

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

allkiri, kuupäev

Tartu 2021

Sonda-Uljaste magnetanomaalia geofüüsikalised ja petrofüüsikalised uuringud

Käesolevas töös uuritakse Sonda-Uljaste magnetanomaaliat. Sonda-Uljaste piirkonnas asub neli positiivset anomaaliat: Uljaste, Nüri, Sonda ja Vana-Sonda. Töö raames uuriti aluskorra kivimite füüsikalisi ja termomagnetilisi omadusi ning modelleeriti magnetanomaaliat. Eesmärk oli iseloomustada anomaaliat põhjustavaid aluskorra kivimeid. Töös kasutatud proovid võeti puursüdamikust F188. Eelnevalt on arvatud, et Uljaste magnetanomaalia on Sonda-Uljaste piirkonnas pindalalt suurim. Käesolevas bakalaureusetöös selgus, et Nüri magnetanomaalia on suurima ruumala ja pindalaga. Töös selgus, et anomaalia on *monadnock*'i-taoline pinnavorm ehk Sonda-Uljaste piirkonna nn „kerked“ esindavad erosioonilisi jäänukeid.

Märksõnad: Sonda-Uljase magnetanomaalia, potentsiaalse välja mudeldamine, puursüdamik F188

CERCS: P500- Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia

The geophysical and petrophysical studies of Sonda-Uljaste magnetic anomaly

The study addresses the magnetic anomalies in the Sonda-Uljaste area. There are four positive anomalies (Uljaste, Nüri, Sonda and Vana-Sonda). As part of the bachelor's thesis, measurements of the physical and thermal magnetic properties of crystalline basement rocks were carried out and Sonda-Uljaste anomalies were modeled. The aim of the bachelor thesis is to characterize the crystalline basement rocks, which cause the Sonda-Uljaste anomaly. The samples were taken from the core of F188. Previously, it has been assumed that the Uljaste magnetic anomaly has the biggest area in the Sonda-Uljaste region. During this bachelor's thesis it became clear that Nüri's magnetic anomaly is the largest in terms of surface area and volume. The study revealed that the anomaly is a monadnock-like formation. The Sonda-Uljaste anomalies are erosional relicts.

Keywords: Sonda-Uljase magnetic anomaly, modelling, the core of F188

CERCS code: P500- Geophysics, physical oceanography, meteorology

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
Aluskord ja Alutaguse plokk.....	4
Sonda-Uljaste kerkestruktuur.....	6
Materjal ja metoodika	8
Füüsikalised omadused	9
Magnetomeetriline kaardistamine ja modelleerimine	10
Tulemused.....	11
Füüsikalised omadused	11
Termomagnetilised omadused.....	14
Uljaste piirkonna magnetväli ja mudel.....	19
Arutelu	25
Kokkuvõte.....	28
Summary	29
Tänuavaldus	30
Kasutatud kirjandus	31

Sissejuhatus

Maad ümbritseb magnetväli ja Maa pinnal mistahes punktis olev magnetnõel, mis ripub vabalt, suundub magnetvälja suunas (Lanza and Meloni, 2006; Kearey et al., 1988). Maa magnetväljal on mitu allikat. Kõige tugevam on globaalne väli, mis tekib pöörisvoolude tõttu Maa vedelas välistuumas. Variatsioonide väljaks nimetatakse ionosfääris ja magnetosfääris päikese elektromagnetkiirguse ja päikesetuule koostoimel tekkinud lühikese lainepikkusega ajas kiirest muutuvat magnetvälja. Induktsiooniväli tuleneb elektromagnetilisest induktsiooniprotsessist, mis toimib maakoos ja ülemises vahevöös variatsioonide välja poolt tekitatud elektrivoolude kaudu (Lanza and Meloni, 2006). Maapõues leiduvad kivimid loovad lokaalse ehk geoloogilise välja. Juhul kui kivimite magnetiseeritus on ümbritsevast keskkonnast erinev, siis nimetatakse nende poolt loodud magnetvälja anomaalseks (Kearey et al., 1988).

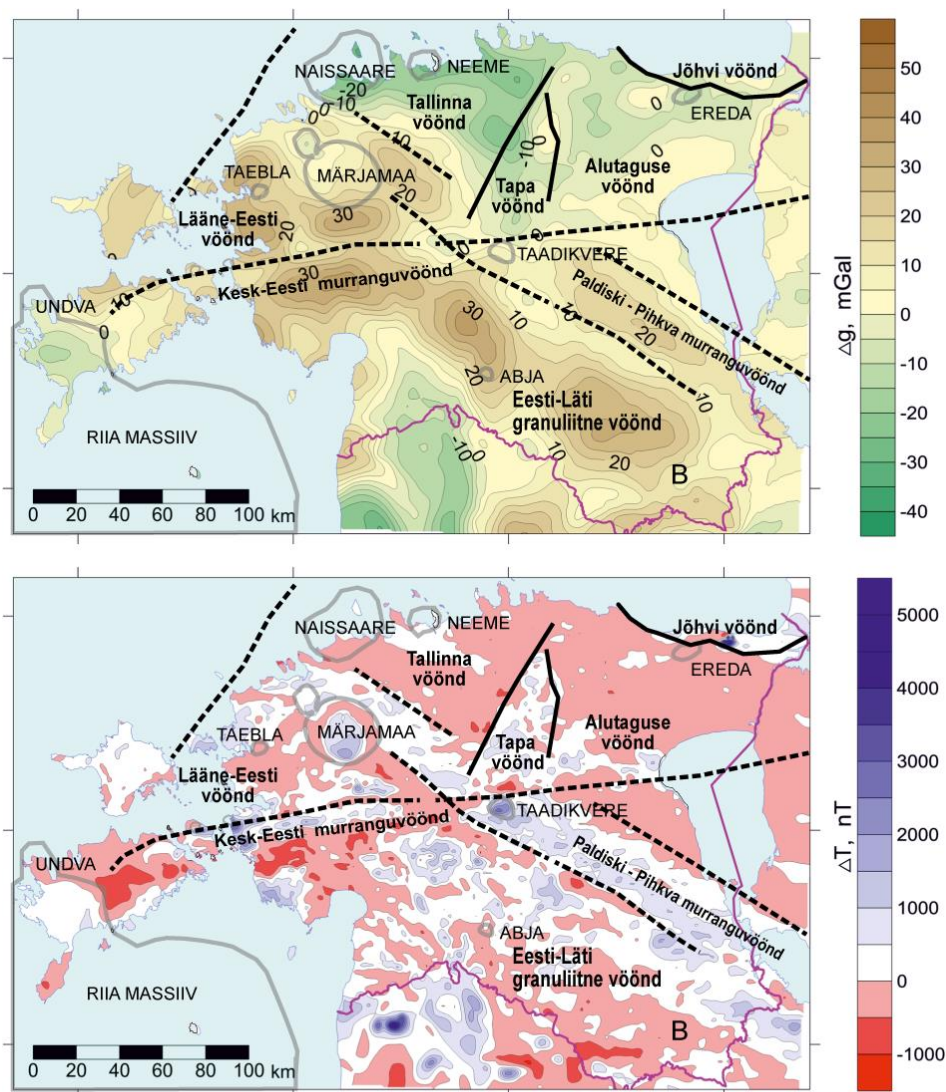
Eesti magnetanomaaliate kaart (Joonis 1) peegeldab valdavalt kristalliinse aluskorra magnetiseeritust, sest aluspõhja ja pinnakatte magnetiseeritused on võrreldes aluskorraga pea olematud (All et al., 2004). Käesolev bakalaureusetöö käsitleb magnetanomaaliat Sonda-Uljaste piirkonnas. Sonda-Uljaste asub Kirde-Eestis, Lääne-Virumaal Rägavere vallas ja Ida-Virumaal Sonda vallas. Sellele alale jääb Uljaste soo, järv ja oos (Suuroja jt., 2007). Anomaalia avastati 1930. aastatel (Reinwald, 1935; Suuroja jt., 2007). Piirkonnas esineb neli kerkestruktuuri, mille pindala on kokku umbes 30 km². Suuroja jt. (2007) andmetel on Uljaste kerkestruktuuril magnetanomaalia tugevus kuni 1000 nT ja gravitatsiooni väli on kuni +2,5 mGal (Suuroja et al., 2007). Uurimistöö esitleb piirkonna magnetanomaaliate kaarti, puursüdamiku F188 füüsikalisi- ja termomagnetilisi omadusi ning magnetanomaaliate modelleerimistulemusi.

Aluskord ja Alutaguse plokk

Eesti aluskorras domineerivad Paleoproterosoikumis 1,9-1,8 miljardit aastat tagasi tekkinud orogeneetilised Svekofenni kivimid. Eesti aluskord koosneb seega moonde- ja tardkivimitest ning jaguneb kaheks peamiseks geoloogiliseks üksuseks: Põhja-Eesti amfiboliitseks ning Lõuna-Eesti granuliitseks kompleksiks (Joonis 1). Nende kahe üksuse vahel paikneb tektoonilise piirina Paldiski-Pihkva murranguvöönd. Aluskord jaotatakse omakorda kuueks petrooloogilis-struktuurseks vööndiks: Tallinn, Tapa, Alutaguse ja Jõhvi vööndid amfiboliitses

kompleksis ning Lääne- ja Lõuna-Eesti vööndid granuliitses kompleksis. Aluskorral lasuvad 100-780 m paksuselt Paleosoikumi ja Ediacara sette kivimid (Soesoo et al., 2004).

Alutaguse vöönd koosneb enamasti moondekivimitest (Soesoo et al., 2004). Kompleksi põhikivimiks on gneiss, peamiselt vilgugneiss, kohati amfiboolgneiss ja harva kvartspäevakivigneiss, mis aktseessoorsete mineraalidena sisaldavad biotiiti, kordieriiti, granaati ja sillimaniiti. Alutaguse vööndi kivimid on tekkinud amfiboliidifaatsiese tingimustes ja



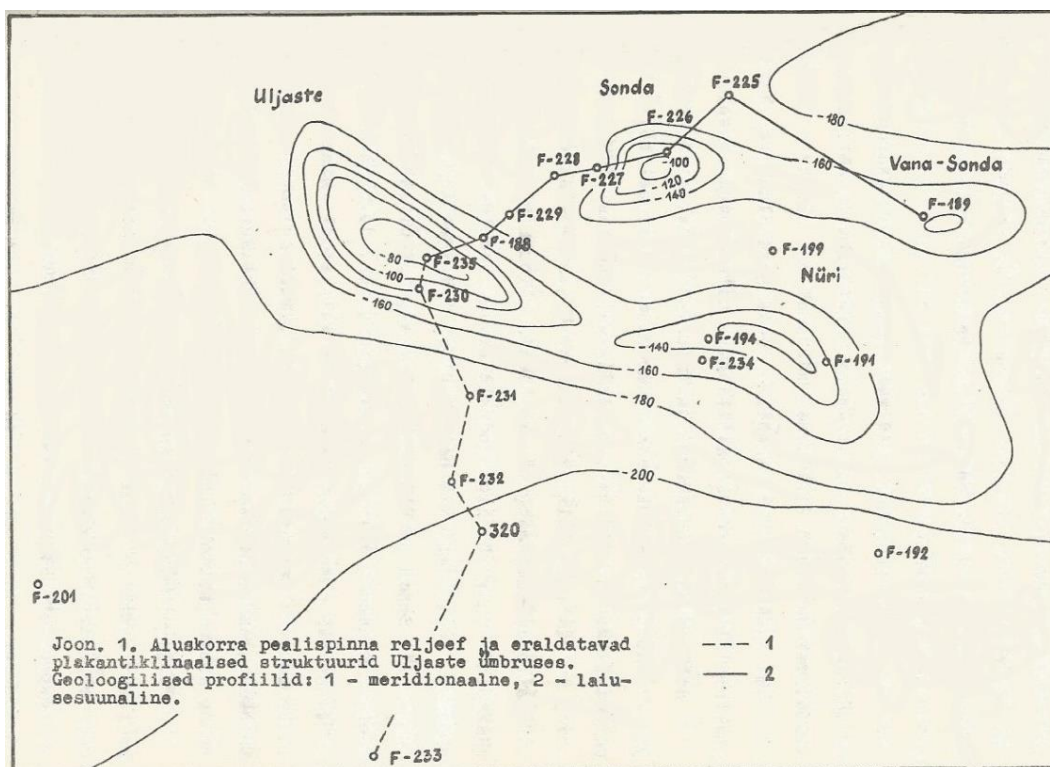
Joonis 1. Eesti gravimeetriliste (ülal) ja magnetomeetriliste (all) anomaaliade kaardid Eesti Geoloogiakeskuse andmetel. Kaartidele on kantud aluskorra peamised struktuursed vööndid (Dmitrijeva et al. 2018).

migmatiidistunud plagioklass-mikrokliingraniitidega. Alutaguse vööndis esineb amfiboolgneisse ja amfiboliite, mida leidub õhukeste vahekihtidena vilgugneissides ning amfiboolid on keskmise- või jämedateralised (Koppelmaa, 2002).

Ülepaksenenud maakoore tõttu on Alutaguse vööndile iseloomulik ~20 mGal võrra madalam gravitatsiooniväli võrreldes Lõuna- ja Lääne-Eestiga (Joonis 1; All et al., 2004). Lõuna- ja Lääne-Eestis on gravitatsiooniväli tugevam, kuna seal esineb granuliitne faatsies, mis tähendab, et kivimite tihedus on suurem kui Alutaguse vööndis ja Lääne-Eestis on maakoore vähem ülepaksenenud. Samas esineb üldise negatiivse anomaalia taustal ka positiivseid (näiteks Uljaste) anomaaliaid. Alutaguse vööndi magnetväli on reeglina madal väljendudes anomaalsetes väärtustes, mis on keskmiselt –300 nT. Samas ei ole magnetväli ühtlaselt madal, sest esinevad lokaalsed positiivsed anomaaliad (Sonda-Uljaste, Assamalla ning Haljala; All et al., 2004; Koppelmaa, 2002).

Sonda-Uljaste kerkestruktuur

1930. aastatel avastati põlevkivi-uuringute tulemusel Uljaste kerge (Reinwald, 1935; Suuroja et al., 2007). Kui Sonda-Uljaste piirkonnas viidi 1975-1977. aastatel läbi aluskorra detailne kaardistamine, avastati veel kolm kerget (Nüri, Sonda ja Vana-Sonda; joonis 2; Pirrus, 1981). Kerkestruktuuride harjad on peaaegu tasased (Uljaste) või kumerad (lääneosa Nüri kerkest). Suhteliselt kõrgeim (140 m) on Uljaste struktuur ning madalaim (45 m) Vana-Sonda struktuur. Kergete nõlvad on lauged kallakusnurgaga 5-15° (Pirrus, 1981). Kergetega kattuvad osaliselt magnetanomaalid, mis sarnaselt kergetega kulgevad kahes peaaegu lääneloode-idakagu-suunalises reas, kus põhjapoolses asuvad Sonda ja Vana-Sonda ning lõunapoolses Uljaste ja Nüri (joonis 2).



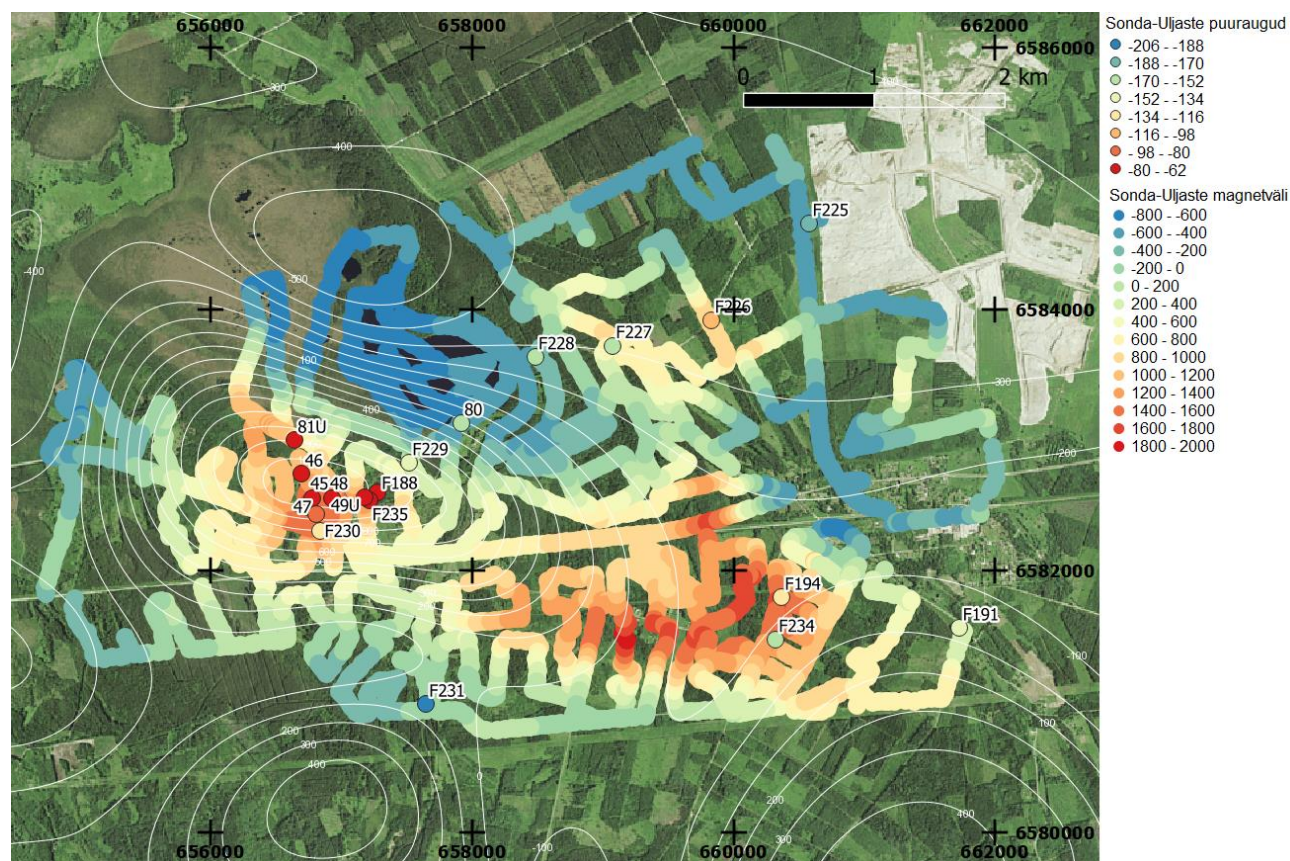
Joonis 2. Sonda-Uljaste piirkonna kerkestruktuurid (Pirrus, 1981).

Kerkestruktuurid on ühe arvamuse järgi tekkinud aluskorraplokkide moodustumise ajal (Puura and Kala, 1978; Suuroja et al., 2007). Teise seisukoha alusel arvatakse, et Sonda-Uljaste piirkonnas on tegemist *monadnock*'i taolise pinnavormiga, mis on mattunud settede alla. See tähendab, et pea miljard aastat valdavaks olnud erosioonile on ainult tugevam materjal vastu pidanud (Puura et al., 1996; Suuroja et al., 2007).

Koppelmaa (2002) kirjelduse alusel esineb Uljaste piirkonna aluskorras omapärane kivimite kooslus. Seal esineb sulfiid-grafiitgneisse, kvartsiite, karbonaate, vilgugneisse ja pürokseene. Sulfiid-grafiitgneiss on peene- või keskmiseteraline, tumedat värvi ning kivim koosneb grafiidist ja maakmineraalidest (põhiliselt pürroitiin ja vähesel määral sfaleriit, galeniit, püriit, kalkopüriit, magnetiit, hematit ning molübdeniit). Osa piirkonna kivimitest on grafiidi- ja sulfiidi-rikkad, kus nende mineraalide kogusisaldus jääb enamasti 10-15% piiresse. Kvartsiit ja karbonaatsed kivimid on keskmise- või jämeteralised, esinevad õhukeste vahekihtidena ning marmor moodustab karbonaatide mahust 65-80%. Uljastes esineb pürokseengneisse õhukeste vahekihtidena kvartsiides, sulfiidi-grafiitgneissides ja vilgugneissides.

Materjal ja metoodika

Töö käigus mõõdeti puursüdamikust F188 (puuritud aastal 1975; sügavus 351,1 m; X = 657272; Y = 6582601; asukoht vaata joonisel 3) võetud 19 proovi füüsikalisi omadusi. Füüsikalised omadused mõõdeti kontrollimaks varasemaid (1970ndad) käsikirjalisi andmeid tiheduse ja magnetilise vastuvõtlikkuse kohta ning saamaks informatsiooni kivimite jääkmagnetiseeritusest. Proovid võttis Arbavere puursüdamikuhoidlas Eesti Geoloogiateenistuse vanemgeoloog Siim Nirgi. Mõõdeti proovide tihedust, magnetilist vastuvõtlikkust, jääkmagnetiseeritust ja magnetmineraloogiat Varasematel andmetel oli südamiku kristalliinest osast mõõdetud 48 proovi (29 alumogneissi, 3 graniiti, 11 kvartsiiti ja 5 pürokseeniiti) füüsikalisi omadusi.



Joonis 3. Sonda-Uljaste magnetanomaaliade (nT; käesolev töö) kaart Maa-ameti ortofoto taustal. Kaardile on kantud aluskorrani ulatuvad puuraugud. Puuraugu sümbolit tähistav värv näitab aluskorra absoluutkõrgust. Valged jooned markerivad aeromagnetilisi anomaaliaid (isojooned iga 100 nT tagant; Maa-amet).

Puursüdamikku F188 on kirjeldanud 1977. aastal S. ja M. Niin. Nimetatud töö raames jagati makroskoopilise kirjelduse alusel aluskorrakivimid nelja rühma: alumogneiss, graniit, kvartsiit ja pürokseeniit. Aluskord on avatud sügavuselt 150,0 sügavuseni 351,1 m. Vahemikus 150,0-229,8 m esineb alumogneiss. Kivim on erineva murenemisastmega (tugevalt kuni nõrgani). Vahemiku ülemises osas sisaldab kivim galeniiti, sfaleriiti ja püriiti. Vahemiku alumises osas on kivim migmatiseerunud ja seal esineb ka pürrotiini. Proovid (F188-106 sügavuselt 198,5 m, F188-119 sügavuselt 203,8 m, F188-110 sügavuselt 212,5 m ja F188-115 sügavuselt 219,8 m) on võetud murenemata osast.

Sügavusel 229,8-268,0 m vahelduvad graniit ja alumogneiss. Graniit, mis esineb vahemiku ülemises osas, sisaldab püriiti (proov F188-122 sügavuselt 230,3 m). Alumistes graniidi kihtides esineb pürrotiini (proov F188-127 sügavuselt 239,8 m). Alumogneiss on kohati migmatiseerunud ja sisaldab pürrotiini. Vahemiku ülemises osas ka sillimaniiti (proov F188-123 sügavuselt 235,5 m). Vahemiku alumises (proov F188-130 sügavuselt 241,9 m ja proov F188-131 sügavuselt 257,5 m) osas on alumogneiss kohati murenenud.

Sügavusel 268,0-315,0 m vahelduvad kvartsiit ja pürokseeniit. Ülemises osas sisaldab kvartsiit (F188-134 sügavuselt 268,4 m ja F188-136 sügavuselt 281,5 m) pürrotiini ja esineb alumogneisi ja pürokseeniidi (F188-138 sügavuselt 287,0 m ja F188-144 sügavuselt 292,3 m) relikte. Vahemiku keskosas esineb kvartsiidi sees pürokseeniidi kihte. Vahemiku sügavamas osas sisaldab kvartsiit pürokseeniiti (F188-148 sügavuselt 296,3 m ja F188-149 sügavuselt 307,3 m), alumogneissi, pürrotiini ja kalkopüriiti.

Sügavust 315,0-351,1 m iseloomustab alumogneisi esinemine (proovid F188-151 sügavuselt 315,5 m, F188-152 sügavuselt 328,5 m, F188-156 sügavuselt 332,5 m ja F188-158 sügavuselt 341,5 m). Selles esineb kohati sillimaniiti ja kivim on kihiti migmatiseerunud. Alumogneissi alumises osas esineb kvartsiiti ja kivimis on pürrotiini ja galeniiti.

Füüsikalised omadused

Tiheduse leidmiseks mõõdeti esmalt kuiva proovi mass (m_a ; g) ja seejärel mõõdeti proovi mass vees (m_w ; g). Kaalumistulemuste alusel arvutati proovi näivtihedus (ρ ; g/cm³):

$$\rho = \frac{m_a \times m_w}{\rho_w - m_w} \quad \text{Valem 1}$$

Vee tihedusena (ρ_w) kasutati väärtust 0,9978 g/cm³, mis vastab temperatuurile 22°C. Saadud tiheduse abil arvutati proovi ruumala (V ; cm³), mis on proovi massi ja tiheduse suhe:

$$V = \frac{m_a}{\rho} . \quad \text{Valem 2}$$

Ruumala oli vaja magnetilise vastuvõtlikkuse ja jääkmagnetiseerituse normaliseerimiseks. Magnetilist vastuvõtlikkust (x_v ; -) mõõdeti kapameetriga KLY5. Magnetilise vastuvõtlikkuse tulemuse alusel arvutati indutseeritud magnetiseerituse (J_i ; Am⁻¹) väärtus:

$$J_i = x_v \times H \quad \text{Valem 3}$$

Magnetvälja tugevusena (H) kasutati väärtust 39,7899 Am⁻¹.

Jääkmagnetiseerituse (J_{NRM} ; Am⁻¹) väärtus mõõdeti spinner-magnetomeetriga JR-6A. Jääkmagnetiseerituse ja indutseeritud magnetiseerituse alusel arvutati Koenigsbergeri suhe (Q ; -):

$$Q = \frac{J_{NRM}}{J_i} \quad \text{Valem 4}$$

Magnetilise vastuvõtlikkuse sõltuvust temperatuurist mõõdeti kuuel proovil (F188-127, F188-131, F188-136, F188-148, F188-151 ja F188-156) kasutades magnetilise vastuvõtlikkuse kapameetrit KLY5. Selleks purustati esmalt proovid pulbriks. Pulbrite puhul uuriti nii nende magnetilise vastuvõtlikkuse käitumist toatemperatuurist madalamatel kui ka kõrgematel temperatuuridel. Proovide jahutamiseks kasutati vedelat lämmastikku ja proovi temperatuur langes ligikaudu -195° C. Pärast külmutamist hakkas temperatuur tõusma ja kapameeter mõõtis perioodiliselt proovi magnetilist vastuvõtlikkust. Kuumutamisel tõsteti proovi temperatuur toatemperatuurilt ligikaudu 700°C-ni ja seejärel jahutati 50°C-ni.

Magnetomeetriline kaardistamine ja modelleerimine

Maapealsed magnetvälja mõõtmised viidi läbi detsembris 2019 (05.12.19., 12.12.19. ja 19.12.19.), juunis 2020 (29.06.20), juulis 2020 (09.07.2020 ja 14.07.2020), detsembris 2020

(04.12.20) ja märtsis 2021 (17.03.21). Käesoleva töö autor käis välitöödel 2020. aasta juunis, juulis ja detsembris. Uuringuala kogupindala oli $\sim 23 \text{ km}^2$. Magnetvälja mõõtmiseks kasutati kahte protonpretsessioon-magnetomeetrit (G-856 ja G-857; Geometrics). Mõõteriista hoiti mõõtmise ajal paigal ja sensor oli ligikaudu kahe meetri kõrgusel. Mõõtmisi tehti iga paarikümne meetri tagant. Mõõtmistulemused korrigeeriti (Jüri Plado) ajaliste variatsioonide suhtes kasutades Soome Meteoroloogia Instituudi Nurmijärvi observatooriumi andmeid.

Sonda-Uljaste anomaalia modelleerimiseks kasutati tarkvara Potent v4.16.07 (Geophysical Software Solutions). Potent programmiga saab teha 3-dimensionaalseid mudeleid. Programmiga töötamisel on võimalik kasutada erinevaid programmi poolt defineeritud lihtsaid geomeetrilisi kujundeid (ellipsoid, silinder, prisma, jne) modelleerimise alusena.

Algselt laaditi alla välitööde tulemusel saadud, koordineeritud ja ajaliste variatsioonide suhtes parandatud magnetvälja tugevuse väärtused. Eemaldati regionaalne väli kasutades selleks üle kogu uuringuala väärtust 52110 nT. Määrati magnetvälja omadused (magnetvälja tugevus 52195,8 nT, deklinatsiooninurk $9,6^\circ$ ja inklinatsiooninurk $73,1^\circ$; vastavad detsembrile 2019) rahvusvahelise geomagnetilise võrdlusvälja (*International Geomagnetic Reference Field*) alusel. Vältimaks järske väljamuutuseid keha servadel kasutati modelleerimisel ellipsoide. Modelleerimine toimus piki profiile, mida oli kokku kaheksa (kaks iga individuaalse anomaalia kohta), millest vähemalt üks läbis anomaalia tippu.

Kõikide modelleerimisel kasutatud ellipsoidide puhul fikseeriti laboratoorsete mõõtmistulemuste alusel nende magnetiline vastuvõtlikkus (0,015 SI) ning jääkmagnetiseeritus (155,8 A/m; $Q = 250$). Modelleerimise käigus muudeti ellipsoidi suurust, asendit (välja arvatud keha kõrgeima punkti sügavust 200 m) ning jääkmagnetiseerituse suunda moel, et arvutatud anomaalia sobituks kõige paremini.

Tulemused

Füüsikalised omadused

Sonda-Uljaste magnetanomaalia kivimtüüpide keskmised füüsikalised omadused ning standardhälbed on toodud Tabelis 1. Tabelis on esitatud keskmised väärtused ka käsikirjalise laboripäeviku andmetel. Vastavalt tulemustele on pürokseenil kõige suurem tihedus ja magnetiline vastuvõtlikkus, kuid alumogneisil jällegi suurim jääkmagnetiseeritus ning Koenigsbergeri suhte

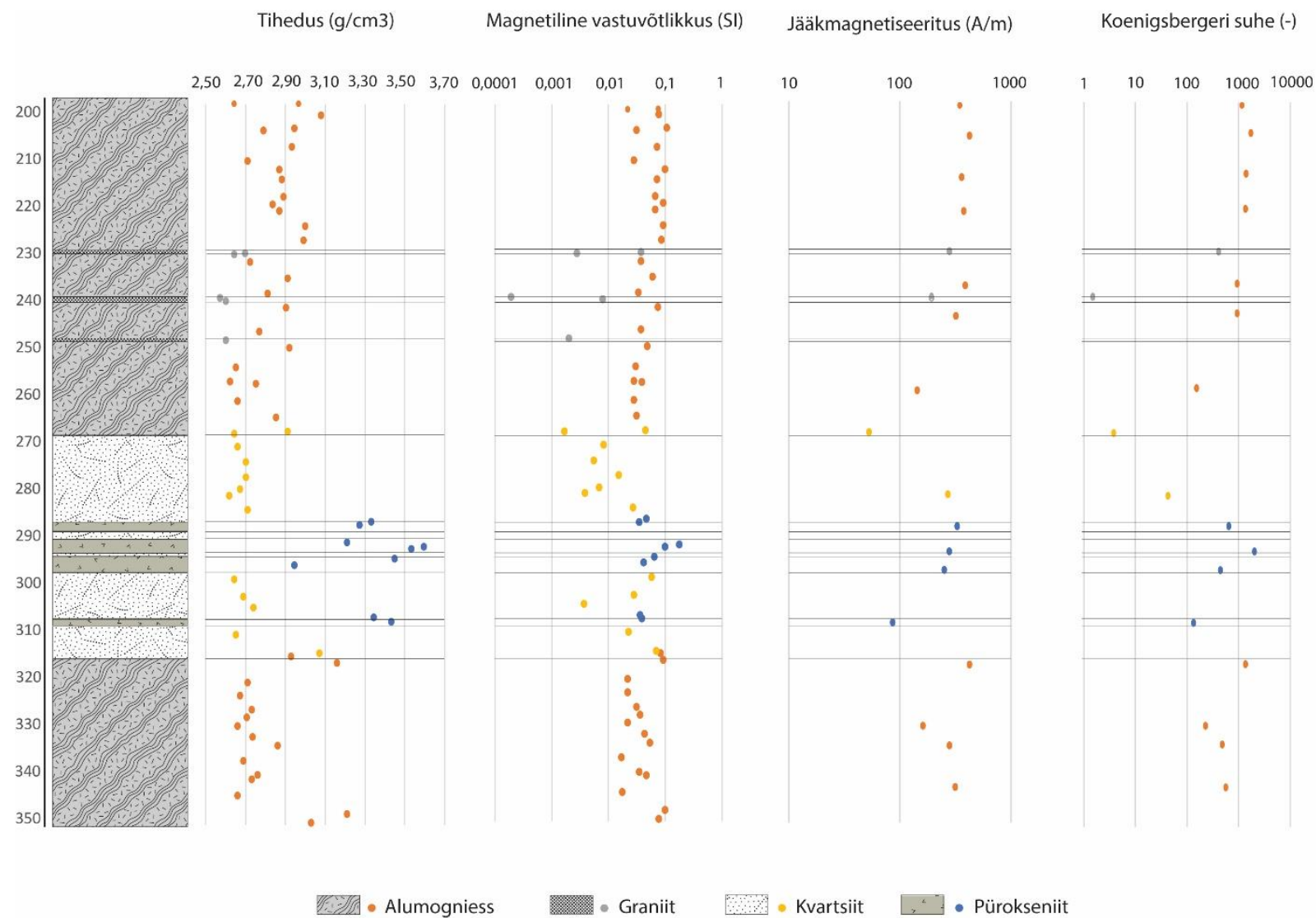
väärtus. Väikseima tihedusega ja magnetilise vastuvõtlikkusega on graniit, aga kõige väiksema jääkmagnetiseerituse ning Koenigsbergeri suhte väärtusega on kvartsiit.

Pürokseniit on suurima tihedusega kivim (Tabel 1; Joonis 4), kuid selle tihedus on ka kõige suurema varieeruvusega ($2,94\text{--}3,59\text{ g/cm}^3$). Tiheduse poolest järgneb alumogneiss. Seejärel kvartsiit, kus vähesel määral kasvab tihedus sügavuse suunas. Kõige väiksema tihedusega kivim on graniit. Pürokseniidil on ka kõige suurem magnetiline vastuvõtlikkus. Järgneb alumogneiss, millel väheneb magnetiline vastuvõtlikkus sügavuse suunas. Seejärel kvartsiit, millel suureneb magnetiline vastuvõtlikkus sügavuse suunas. Graniit on kõige väiksema aga varieeruva ($0,000194\text{--}0,036920\text{ SI}$) magnetilise vastuvõtlikkusega (Tabel 1; Joonis 4) Magnetilisel vastuvõtlikkusel esineb mõningaid erinevusi uute mõõtmistulemuste ja vanad andmete (laboripäevik) vahel (Tabel 1).

Tabel 1. Puursüdamiku F188 kristalliinsete kivimite füüsikaliste omaduste aritmeetilised keskmised ja mediaanväärtused käesoleva töö (K) ning vanade käsikirjaliste (1970. aastate laboripäevik) andmete (V) alusel.

Kivimtüüp	Andmed	N	$\rho\text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\chi\text{ (SI)}$	$J_{\text{NRM}}\text{ (A/m)}$	Q (-)
Alumogneiss	K	11	$2,83\pm0,11$	$0,0670\pm0,0249$	$923,5\pm495,2$	$318,5\pm89,7$
	V	29	$2,83\pm0,16$	$0,0466\pm0,0252$	-	-
	Kokku	40	$2,83\pm0,14$	$0,0529\pm0,0266$	$923,5\pm495,2$	$318,5\pm89,7$
Graniit	K	2	$2,63\pm0,02$	$0,0186\pm0,0184$	$205,9\pm204,5$	$236,0\pm43,4$
	V	3	$2,61\pm0,06$	$0,0042\pm0,0026$	-	-
	Kokku	5	$2,62\pm0,04$	$0,0010\pm0,0137$	$205,9\pm204,5$	$236,0\pm43,4$
Kvartsiit	K	2	$2,63\pm0,13$	$0,0028\pm0,0011$	$23,5\pm19,7$	$171,4\pm115,1$
	V	11	$2,74\pm0,12$	$0,0261\pm0,0258$	-	-
	Kokku	13	$2,72\pm0,12$	$0,0225\pm0,0211$	$23,5\pm19,7$	$171,4\pm115,1$
Pürokseniit	K	4	$3,30\pm0,13$	$0,0746\pm0,0569$	$814,7\pm726,4$	$250,3\pm95,9$
	V	5	$3,38\pm0,21$	$0,0470\pm0,0323$	-	-
	Kokku	9	$3,34\pm0,18$	$0,0593\pm0,0470$	$814,7\pm726,4$	$250,3\pm95,9$

N = proovide arv, ρ = tihedus, χ = magnetiline vastuvõtlikkus, J_{NRM} = jääkmagnetiseerituse intensiivsus, Q = Koenigsbergeri suhe



Joonis 4. Puursüdamiku F188 kivimite tihedus, magnetiline vastuvõtlikkus, jääkmagnetiseeritus ja Koenigsbergeri suhe sügavuse suhtes. Andmestik pärineb käesolevast tööst ning vanadest käsikirjalistest andmetest (laboripäevik). Litoloogiline tulp on joonestatud Puura ja Vaher 1963. aasta aruande alusel.

Alumogneiss on uuritud kivimtüüpidest kõige suurema jääkmagnetiseeritusega. Samas väheneb jääkmagnetiseeritus sügavuse suunas. Mõnevõrra väiksem on jääkmagnetiseeritus pürokseeniidil, mille jääkmagnetiseeritus samuti väheneb sügavuse suunas. Järgneb graniit, mille jääkmagnetiseeritus on varieeruvaim. Kvartsiit on kõige väiksema jääkmagnetiseeritusega. Kvartsiidil kasvab jääkmagnetiseeritus sügavuse suunas (Tabel 1; Joonis 4). Koenigsbergeri suhe käitub sarnaselt jääkmagnetiseeritusele.

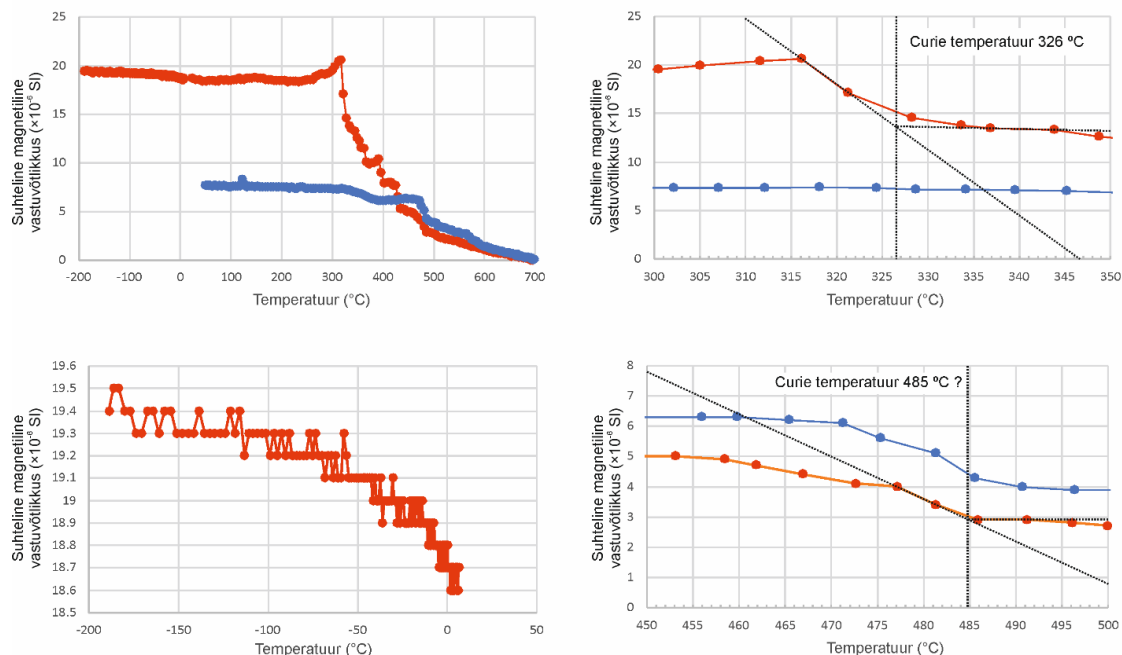
Termomagnetilised omadused

Termomagnetiliste uuringute tulemusel (Joonised 5-10; Tabel 2) tõestati, et puursüdamiku F188 materjalis esineb valdaval määral pürroitiini, mis põhjustab tõenäoliselt materjali ülisuure jääkmagnetiseerituse magnetilise vastuvõtlikkuse suhtes. Pürroitiini magnetiseeritus sõltub tema koostisest ja süngooniast. Monoklinaalne pürroitiin (Fe_7S_8) on ferrimagnetiline Hopkinsoni tipuga $\sim 320^\circ\text{C}$ juures ja Curie temperatuuriga $\sim 325^\circ\text{C}$. Heksagonaalne pürroitiin (Fe_9S_{10}) Curie temperatuuriga 260°C on samas antiferromagnetiline, kuid omab ferrimagnetilisi omadusi temperatuurivahemikus $210\text{--}260^\circ\text{C}$ (Dorogina et al., 2015; Minyuk et al., 2013; Kontny et al., 1997). Valdavalt esineb käesoleva töös proovides monoklinaalset pürroitiini ja vähesel määral on heksagonaalset pürroitiini. Proovidel F188-151 ja F188-156 (Joonis 9 ja 10) on jahtumise käigus magnetilise vastuvõtlikkuse tipp nihkunud 210 ja 260°C vahele, mis võib olla tingitud kuumutamise käigus toimunud faasimuutustega.

Lisaks esineb kivimites, valdavalt alumogneissides ja pürokseeniitides, veel magnetiiti (Joonised 6, 8-10). Magnetiidi olemasolust annab tunnistust Verwey siire, mis on ligikaudu -150°C (Mang and Kontny, 2013) juures ning Curie temperatuur (580°C ; Direen et al., 2008). Graniidis ja kvartsiidis (Joonised 5 ja 7) esineb ka titanomagnetiiti või titanohematiiti, mille Curie temperatuurid varieeruvad laias vahemikus sõltudes Ti hulgast (Minyuk et al., 2013).

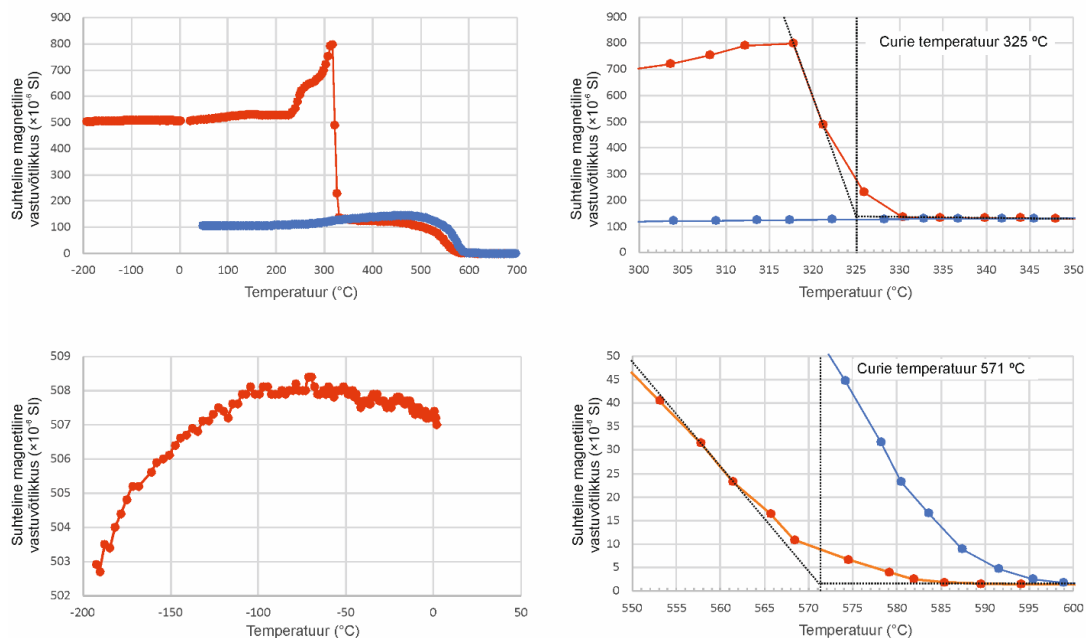
Graniitses proovis 127 (Joonis 5) esineb pürroitiini, seda saab järeldada sellest, et toimub magnetilise vastuvõtlikkuse valdav vähenemine 326°C ja esineb Hopkinsoni tipp 316°C juures. Nõrgalt väljendub 485°C juures esinev magnetilise vastuvõtlikkuse muutus nii soojenemise kui jahtumise graafikutel, mis võib viidata titaanirikka magnetiidi või hematiidi esinemisele.

Uljaste puurauk 188, sügavus 239,2-240,4 m, proov #127, graniit



Joonis 5. Puursüdamiku F188 proovi 127 (graniit) termomagnetilist käitumist iseloomustav andmestik. Punased graafikud markerivad proovi soojenemist, sinised jahtumist. Täielikud graafikud on toodud vasakul ülal; ülejäänud on väljavõtted olulistest temperatuurivahemikest.

Uljaste puurauk 188, sügavus 257,0-258,0 m, proov #131, alumogneiss



Joonis 6. Puursüdamiku F188 proovi 131 (alumogneiss) termomagnetilist käitumist iseloomustav andmestik. Punased graafikud markerivad proovi soojenemist, sinised jahtumist. Täielikud graafikud on toodud vasakul ülal; ülejäänud on väljavõtted olulistest temperatuurivahemikest.

Tabel 2. Kokkuvõtte ferromagnetiliste mineraalide esinemisest puursüdamiku F188 proovides.

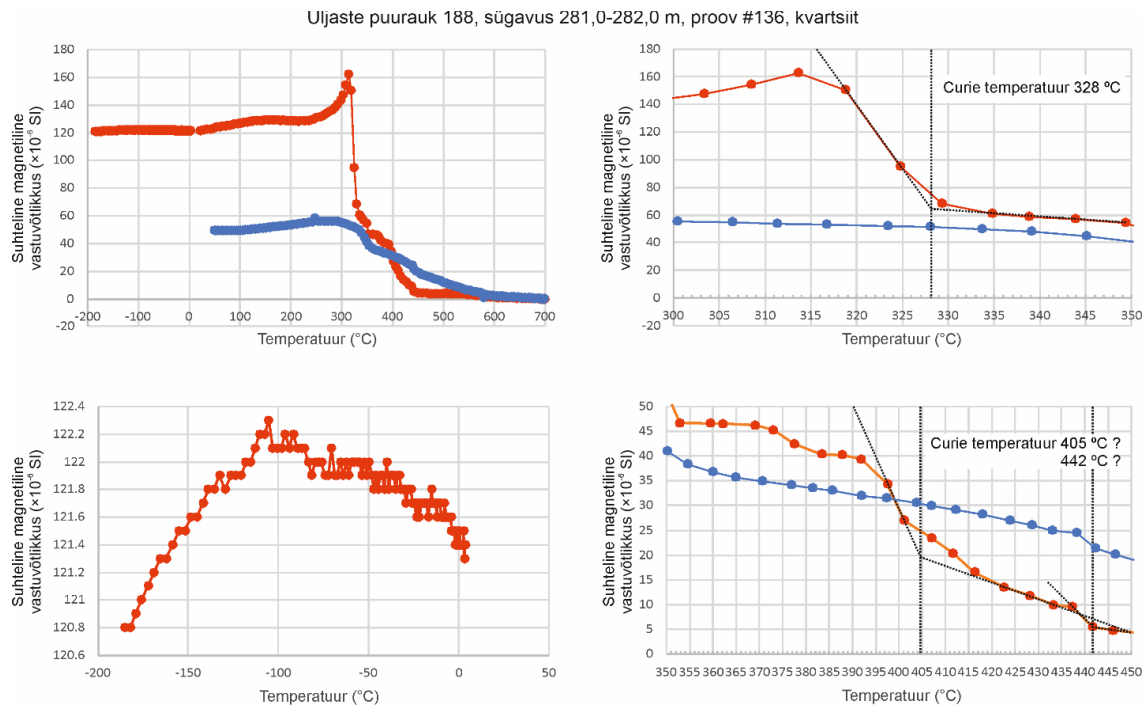
Proov	Sügavus (m)	Kivimtüüp	Ferromagnetilised mineraalid
F188-127	239,2-240,4	Graniit	Pürroitiin (HT = 316°C, T _C = 326°C); Titanomageitiit või titanohematiit (T _C = 485°C)
F188-131	257,0-258,0	Alumogneiss	Pürroitiin (HT = 318°C, T _C = 325°C) Magneitiit (T _V = -150 °C, T _C = 571°C)
F188-136	281,0-282,0	Kvartsiit	Pürroitiin (HT = 313°C, T _C = 328°C) Titanomageitiit või titanohematiit (T _C = 405°C ja 442°C)
F188-148	295,8-296,7	Pürokseeniit	Pürroitiin (HT = 316°C, T _C = 327°C) Magneitiit (T _V = -165 °C T _C = 581°C)
F188-151	315,0-316,0	Alumogneiss	Pürroitiin (HT = 315°C, T _C = 325°C) Magneitiit (T _V = -165°C T _C = 585°C)
F188-156	332,0-333,0	Alumogneiss	Pürroitiin (HT = 317°C, T _C = 329°C) Magneitiit (T _V = -145 °C, T _C = 580°C)

HP = Hopkinsoni tipp, T_C = Curie temperatuur, T_V = Verwey siire

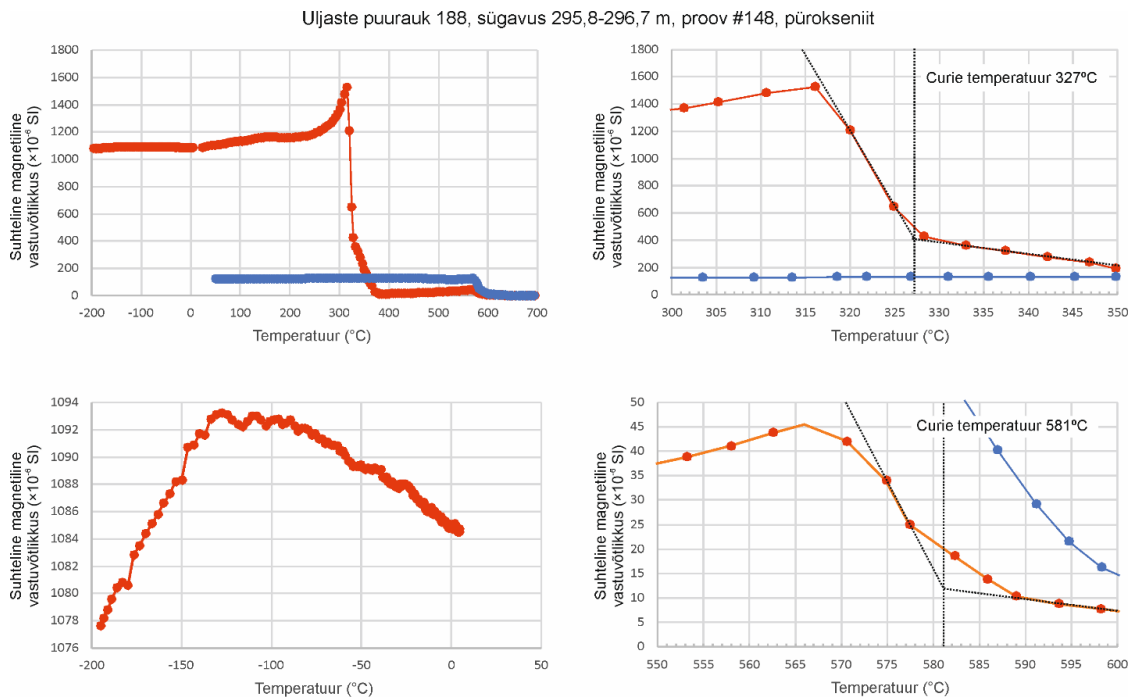
Proovis 131 (alumogneiss; Joonis 6) esineb magneitiiti, mis väljendub Verwey siirde esinemises. Magneitiidile vastav Curie temperatuur (585°C) on siiski vaevuaimatav, näidates magneitiidi vähest sisaldust. Samas toimub märkimisväärne magnetilise vastuvõtlikkuse vähenemine temperatuuri 325°C juures, mis vastab pürroitiini Curie temperatuurile. Magnetilise vastuvõtlikkuse järsule vähenemisele eelneb suurenemine (Hopkinsoni tipp). Jahtumiskõveral ei ole pürroitiini signaali näha; põhjus on teadmata.

Kvartsiidi proovis 136 (Joonis 7) esineb pürroitiini, seda saab järeldada sellest, et toimub magnetilise vastuvõtlikkuse valdav vähenemine 328°C ja Hopkinsoni tipp on 313 °C. Nõrgalt väljendub 405°C ja 442°C juures esinev magnetilise vastuvõtlikkuse muutus nii soojenemise kui jahtumise graafikutel, mis võib viidata titaanirikka magneitiidi või hematiidi esinemisele.

Proovis 148 (pürokseeniit; Joonis 8) on Hopkinsoni tipp 316°C ja Curie temperatuur 327°C, mis tähendab, et proovis esineb pürroitiini. Magneitiidile vastav Curie temperatuur (581°C) on siiski vaevuaimatav näidates magneitiidi vähest sisaldust. Samas toimub märkimisväärne magnetilise vastuvõtlikkuse vähenemine temperatuuri 327°C juures, mis vastab pürroitiini Curie temperatuurile. Magnetilise vastuvõtlikkuse järsule vähenemisele eelneb suurenemine (Hopkinsoni tipp), mis on 316 °C, mis viitab pürroitiini esinemisele.



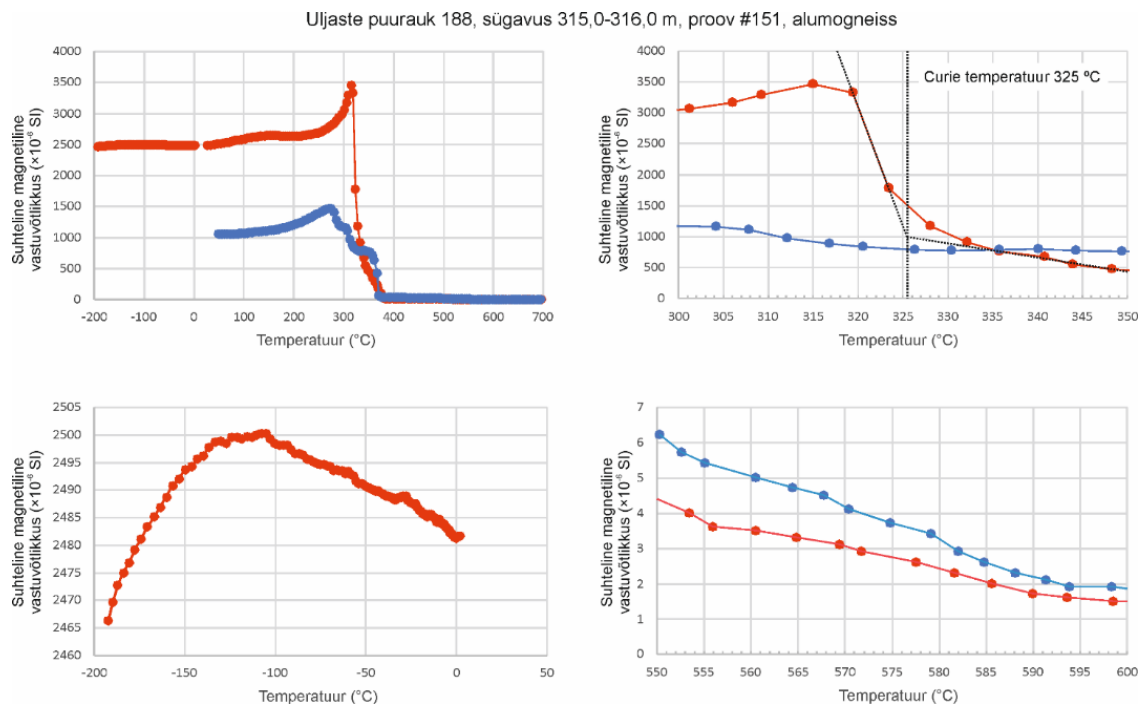
Joonis 7. Puursüdamiku F188 proovi 136 (kvartsiid) termomagnetilist käitumist iseloomustav andmestik. Punased graafikud markerivad proovi soojenemist, sinised jahtumist. Täielikud graafikud on toodud vasakul ülal; ülejäänud on väljavõtted olulistest temperatuurivahemikest.



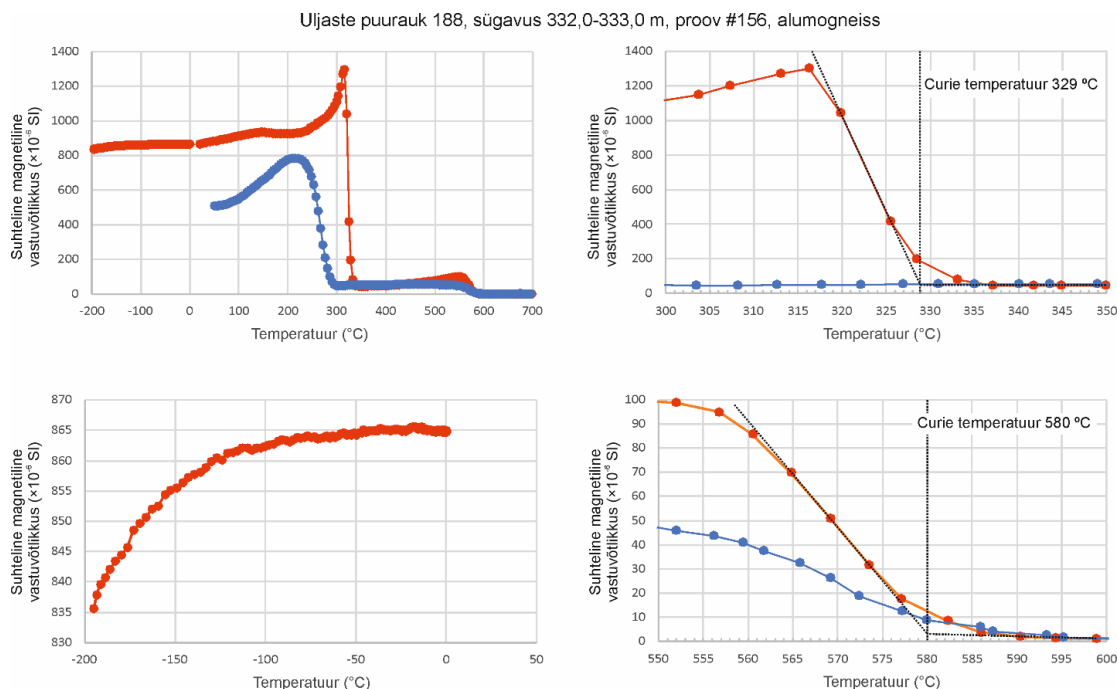
Joonis 8. Puursüdamiku F188 proovi 148 (pürokseniit) termomagnetilist käitumist iseloomustav andmestik. Punased graafikud markerivad proovi soojenemist, sinised jahtumist. Täielikud graafikud on toodud vasakul ülal; ülejäänud on väljavõtted olulistest temperatuurivahemikest.

Alumogneisi proovis 151 (Joonis 9) esineb magnetiiti (Verwey siire). Magnetiidile vastav Curie temperatuur (585°C) on vaevuaimatav näidates magnetiidi vähest sisaldust. Samas toimub märkimisväärne magnetilise vastuvõtlikkuse vähenemine temperatuuri 325°C juures, mis vastab pürroitiini Curie temperatuurile. Magnetilise vastuvõtlikkuse järsule vähenemisele eelneb suurenemine (nn Hopkinsoni tipp). Ka jahtumiskõver illustreerib pürroitiini esinemist aga kuna jääb „madalamaks“ kui soojenemiskõver siis ka asjaolu, et prooviga ei toimunud kuumutamise käigus olulisi keemilisi muutusi, mis väljenduksid magnetilise vastuvõtlikkuse suurenemises.

Proovis 156 (alumogneiss; Joonis 10) esineb magnetiiti (Verwey siire, Curie temperatuur 585°C). Märkimisväärne magnetilise vastuvõtlikkuse vähenemine toimub temperatuuri 325°C juures, mis vastab pürroitiini Curie temperatuurile. Magnetilise vastuvõtlikkuse järsule vähenemisele eelneb suurenemine (Hopkinsoni tipp). Ka jahtumiskõver illustreerib pürroitiini esinemist.



Joonis 9. Puursüdamiku F188 proovi 151 (alumogneiss) termomagnetilist käitumist iseloomustav andmestik. Punased graafikud markeerivad proovi soojenemist, sinised jahtumist. Täielikud graafikud on toodud vasakul ülal; ülejäänud on väljavõtted olulistest temperatuurivahemikest.

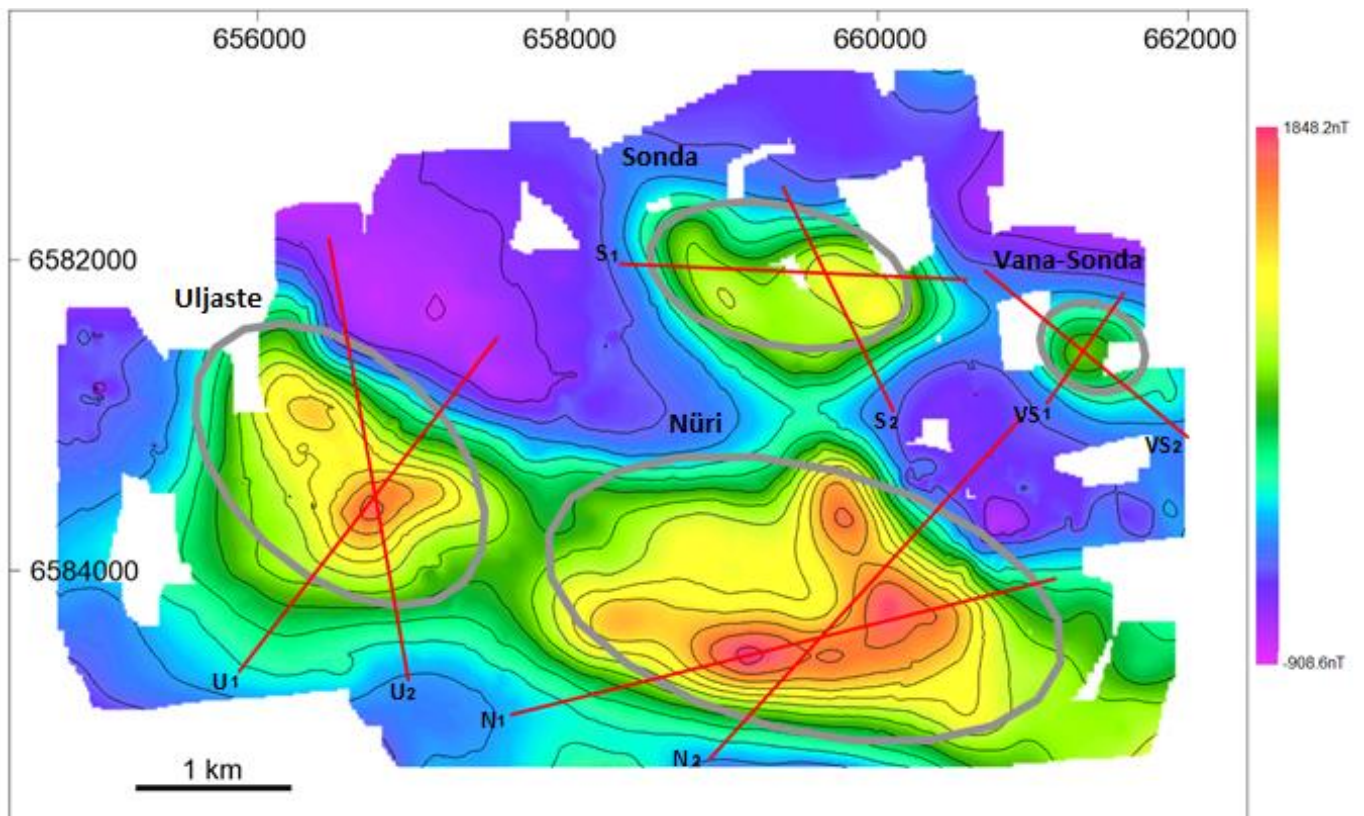


Joonis 10. Puursüdamiku F188 proovi 156 (alumogneiss) termomagnetilist käitumist iseloomustav andmestik. Punased graafikud markeerivad proovi soojenemist, sinised jahtumist. Täielikud graafikud on toodud vasakul ülal; ülejäänud on väljavõtted olulistest temperatuurivahemikest.

Uljaste piirkonna magnetväli ja mudel

Sarnaselt aluskorra reljeefis väljatoodud nelja kerkega (Uljaste, Nüri, Sonda ja Vana-Sonda; Joonis 2) esineb ka piirkonna magnetväljas neli positiivset anomaaliat (Joonised 3 ja 11). Kerked ja magnetanomaaliad osaliselt kattuvad, mistõttu on siinkohal anomaaliad nimetatud vastavalt kergetele (Pirrus 1981 alusel). Piirkonnas mõõdetud väljatugevused jäid 54041,1 ja 51353,3 nT vahele, kusjuures tugevamaid magnetvälja väärtusi mõõdeti lõunapoolsetes Uljaste ja Nüri anomaaliates. Madalamad väärtused esinesid Uljaste järvel ja soos, Sonda alevikust loodes ning uuringuala põhjaosas.

Käesoleva töö käigus mõõdetud ja arvutatud magnetanomaaliade kaart sarnaneb aeromagnetiliste anomaaliade kaardiga (Maa-ameti kaardiserver) Uljaste anomaalia osas (Joonis 3). Samas ei ole aeromagnetilisel kaardil vihjeid ülejäänud anomaaliade kohta, mille põhjuseks on ilmselt algsete lennuprofiilide hõredus. Samas eksisteerib uuringuaruanne (Puura ja Vaher 1963), milles on kirjeldatud piirkonna magnetvälja vertikaalse komponendi mõõtmistulemusi ning kolme (Uljaste, Nüri ja Sonda) anomaaliat.

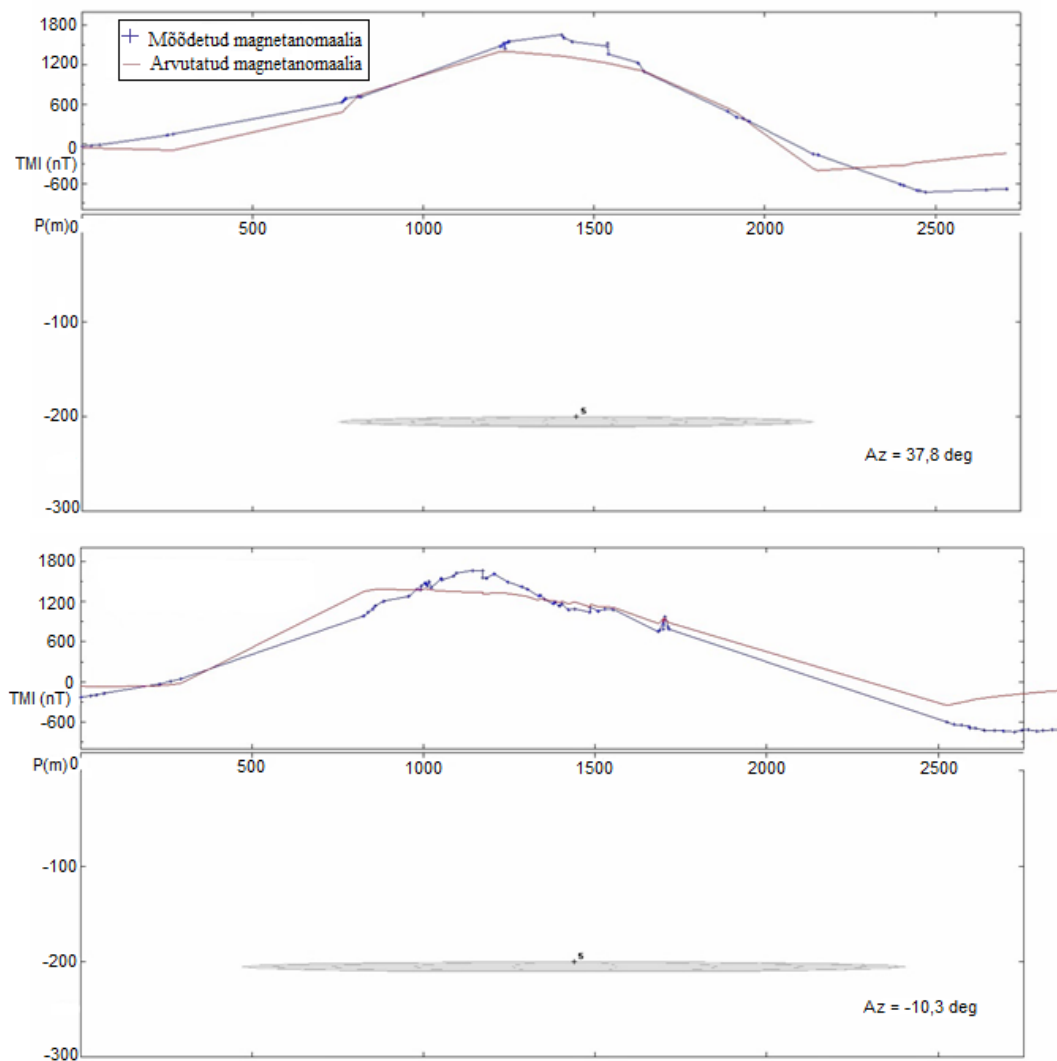


Joonis 11. Magnetanomaalia kaart Sonda-Uljaste Piirkonnast. Hallina on tähistatud mudelite asendit. Punased jooned näitavad mudeli profiili asukohta, kusjuures tähistus märgib profiili parempoolset serva joonistel 11-14.

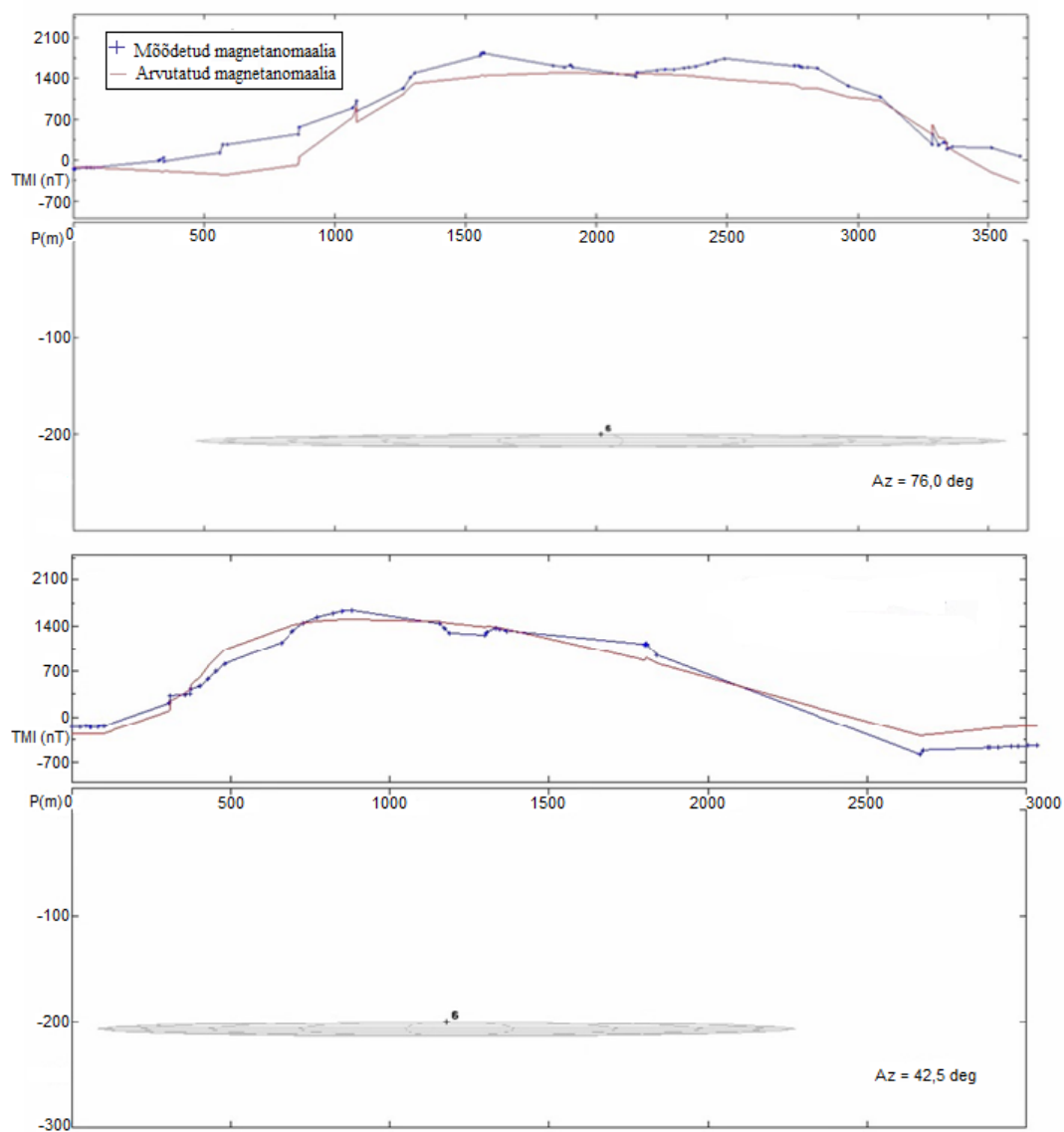
Uuringuala piirkonnas esineb kaks anomaalset vööndit: Uljaste-Nüri- (lõunapoolne) ja Sonda vöönd (põhjapoolne) (Joonis 11). Uljaste-Nüri vöönd on suurema pindalaga ja see koosneb kahest magnetanomaaliast – Uljaste (läänepoolne) ja Nüri (idapoolne). Uljaste ja Nüri vahel ei esine negatiivset anomaaliat. Vööndi keskmine laius on ~2000 meetrit. Uljaste magnetiline anomaalia on kolmnurgakujuline, mille pikim telg on loode-kagu-suunaline. Uljaste anomaalia on Sonda-Uljaste piirkonnas laiuselt, pikkuselt ja pindalaliselt teine Nüri anomaalia järel. Nüri anomaalia on asümmeetriline, sellel esineb kolm tugevamat positiivse anomaalia ala. Nüri anomaalia pikem telg on läänelo-idakagu-suunaline. Sonda vöönd, mis koosneb kahest magnetilisest anomaaliast – Sonda (läänepoolne) ja Vana-Sonda (idapoolne) on väiksema pindalaga. Sonda vööndi pikkus on ~2900 meetrit. Sonda ja Vana-Sonda vahele jääb negatiivne anomaalia. Sonda anomaalia keskmine laius on ~900 meetrit ja pikkus ~1700 meetrit. Piirkonna

kõige väiksem anomaalia on Vana-Sonda pikkusega ~1000 meetrit. Sonda ja Vana-Sonda anomaaliad on pikima telje suhtes läänelo-idakagu-suunalised. Anomaaliade modelleerimistulemused on esitatud joonistel 11-14 ning modelleerimise muudetud parameetrid tabelis 3. Ellipsoidide magnetilise vastuvõtlikkuse ja jääkmagnetiseerituse väärtused olid fikseeritud ja neid modelleerimise käigus ei muudetud (vt. Materjal ja metoodika peatükk).

Uljaste anomaaliat katavad profiilid U1 (edelast kirdesse) ja U2 (lõunakagust põhjaloodesse; Joonised 11 ja 12). Anomaalia amplituud ulatub ~1800 nT. Modelleeritud ellipsoidi lühima (vertikaalse) telje pikkus (keha paksus) on 11 m, ellipsoidi ruumala on 0,018 km³. Keha jääkmagnetiseeritus on subvertikaalne ja suunatud põhjaloodesse (Tabel 3).



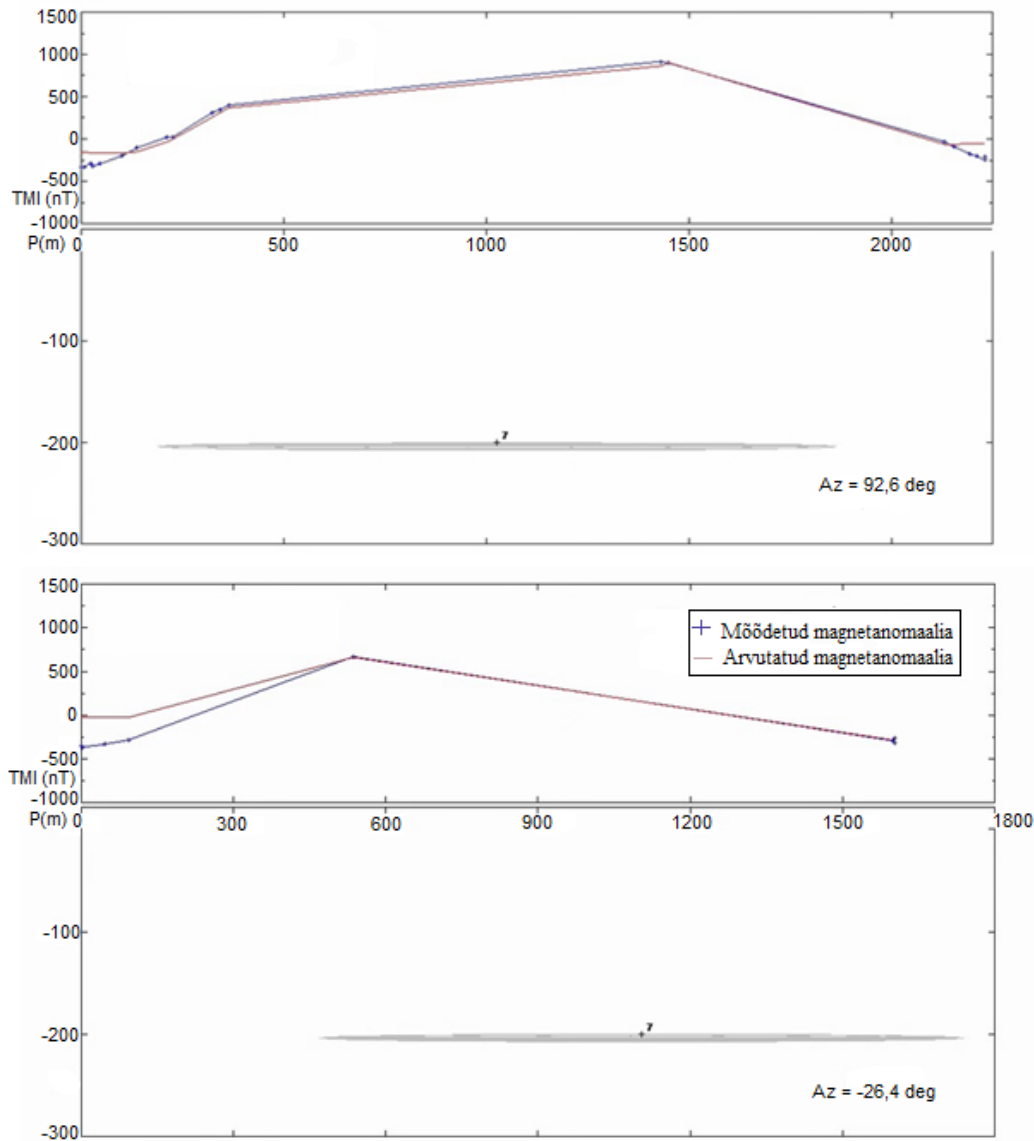
Joonis 12. Uljaste anomaalia mudelid. Ülemine profiil on U1 ja alumine U2 (Joonis 11). Sinine joon on mõõdetud magnetanomaalia ja pruun on arvutatud magnetanomaalia.



Joonis 13. Nüri anomaalia mudel. Ülemine profiil on N1 ja alumine N2 (Joonis 11). Sinine joon on mõõdetud magnetanomaalia ja pruun on arvutatud magnetanomaalia.

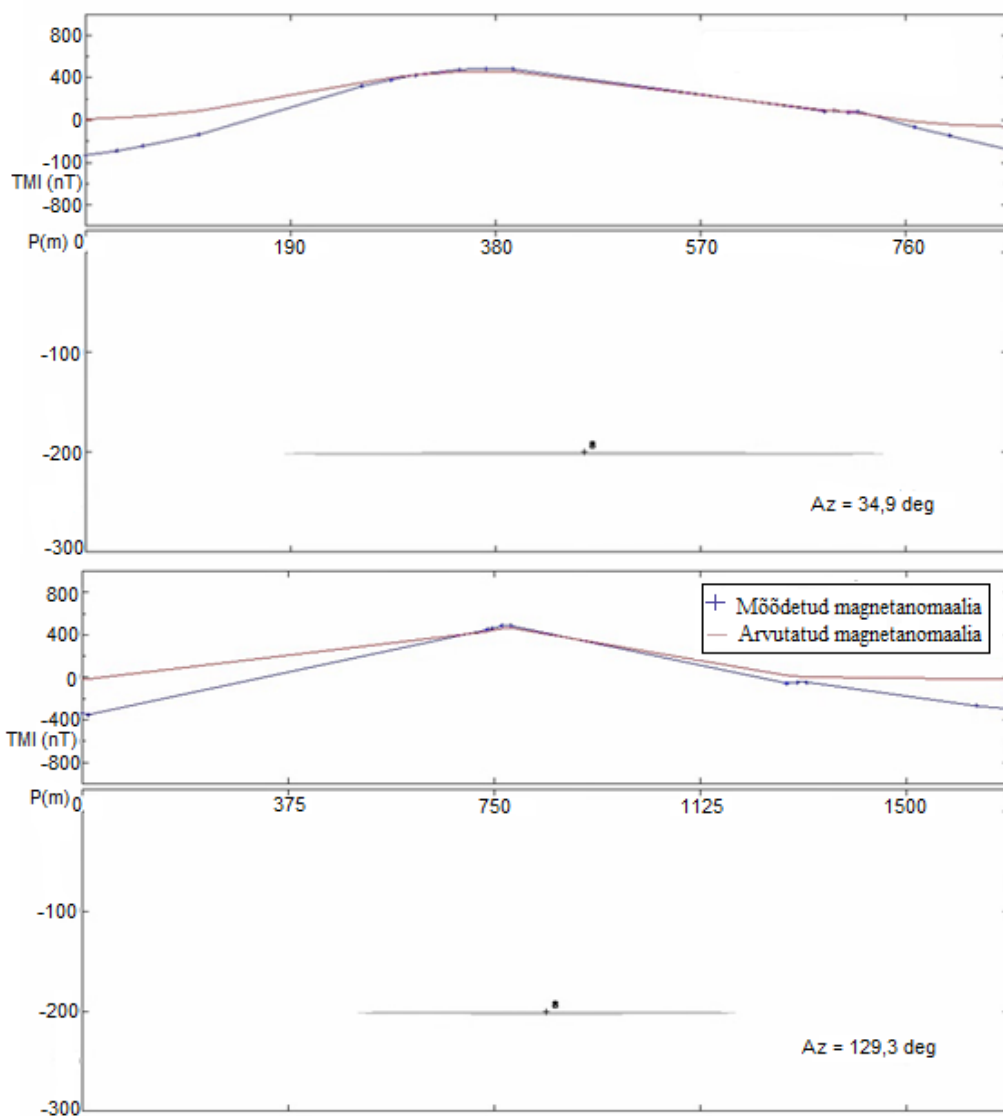
Tabel 3. Modelleeritud ellipsoidide parameetrid.

Keha	Telgede pikkused (m)			Jääkmagnetiseeritus		Keskpunktide koordinaadid	
	Laius (m)	Pikkus (m)	Paksus (m)	D (°)	I (°)	X	Y
Uljaste	1400	2200	11	-17	78	6582719	656548
Nüri	1700	3400	14	-45	84	6581855	659543
Sonda	900	1700	7,5	-70	69	6583934	659380
Vana-Sonda	550	700	3	48	85	6583473	661402



Joonis 14. Sonda anomaalia mudel. Ülemine profiil on S1 ja alumine S2 (Joonis 10). Sinine joon on mõõdetud magnetanomaalia ja pruun on arvutatud magnetanomaalia.

Piirkonna pindalaliselt ja amplituudilt suurim anomaalia on Nüri anomaalia (Joonis 11). Anomaalia maksimaalne amplituud on $\sim 2100\text{nT}$ (Joonis 13) ja anomaalia poollaius on keskmiselt $\sim 870\text{ m}$ (Joonis 11). Modelleeritud keha maksimaalne paksus on 14 m ja ruumala 0.042 km^3 . Keha jääkmagnetiseeritus on praktiliselt vertikaalne (Tabel 3). Sonda ja Vana-Sonda anomaaliad on eelnevatest väiksemad nii pindalalt kui ka amplituudilt. Sonda magnetanomaalia amplituud on

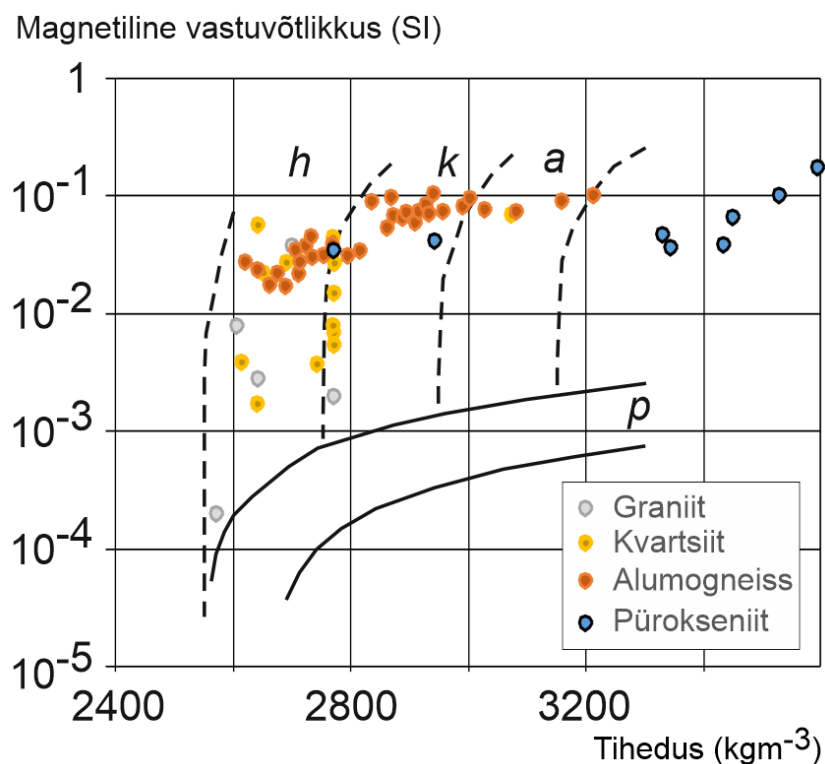


Joonis 15. Vana-Sonda anomaalia mudel. Ülemine profiil on VS1 ja alumine VS2 (Joonis 10). Sinine joon on mõõdetud magnetanomaalia ja pruun on arvutatud magnetanomaalia.

maksimaalselt 750 nT (Joonis 14). Sonda anomaalia poollaius põhja-lõuna-suunaliselt on ~370 m ja ida-lääne-suunaliselt ~650 m. Modelleeritud keha ruumala on ligikaudu 0.06 km³. Vana-Sonda magnetanomaalia on kõige lihtsam ehitusega (Joonis 11) ja kõige väiksem nii pindala kui ka modelleeritud keha suuruse (0,001 km³) poolest (Tabel 3). Vana-Sonda anomaalia maksimaalne amplituud on ~400nT ja poollaius on ~590 m (Joonis 15).

Arutelu

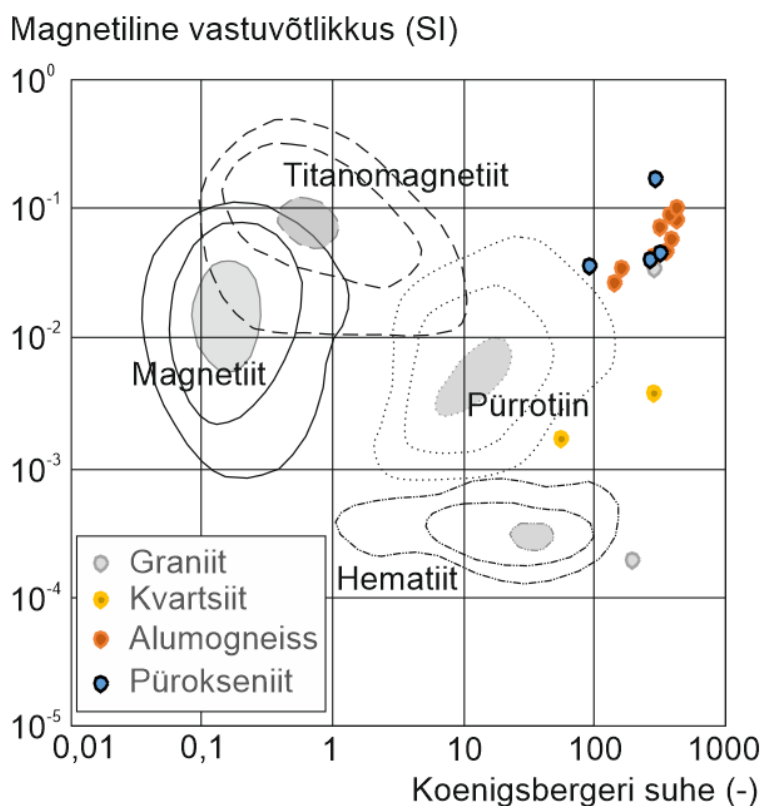
Herbert Henkel koostas 1994. aastal Skandinaavia tuhandete kristalliinsete kivimite füüsikaliste omaduste muutmiste alusel rea kahe muutujaga graafikuid, mis võimaldasid kivimeid grupeerida. Käesolevas töö puhul võrdlesin puuraugu F188 tiheduse ja magnetilise vastuvõtlikkuse mõõtmistulemusi Skandinaavia andmestikuga. Meie andmestiku alusel joonistub tiheduse – magnetilise vastuvõtlikkuse graafikul välja kaks trendi. Esimese trendi, mille puhul kivimite tihedus on suhteliselt väike, kuid magnetiline vastuvõtlikkus muutlik, moodustavad graniidid ja kvartsiidid. Tõenäoliselt sõltub nende kivimite puhul magnetiline vastuvõtlikkus oluliselt neis sisalduvate ferromagnetilise (Uljaste puhul pürrotiini ja magnetiit) mineraalide hulgast. Võrreldes Skandinaavia andmestikuga grupeeruvad nad füüsikalise omaduste järgi valdavalt happelise ja happeliste-keskmiste kivimite piirile. Alumogneisside ja pürokseniitide



Joonis 16. Puursüdamiku F188 kivimite tiheduse ja magnetilise vastuvõtlikkuse suhe. Andmestik pärineb käesolevast tööst ning vanadest käsikirjalistest andmetest (laboripäevik). Taustal on Skandinaavia andmestiku (Henkel 1994) alusel väljatoodud tardkivimite grupid: p = paramagnetilised kivimid, h = happelised kivimid, k = keskmise koostisega kivimid, a = aluselise koostisega kivimid. h, k ja a markerivad ferromagnetiliste kivimite gruppi.

puhul magnetilise vastuvõtlikkuse suurenedes suureneb ka kivimi tihedus. Kuigi ferromagnetilised mineraalid on suhteliselt suure tihedusega, on tiheduse suurenemise peamiseks põhjuseks erinevused kivimite üldises mineraloogilises koostises.

Võrreldes Henkeli (1994) poolt koostatud kokkuvõtva graafikuga erinevaid ferromagnetilisi mineraale sisaldavate kivimite paiknemisega magnetilise vastuvõtlikkuse – jääkmagnetiseerituse (väljendatuna Koenigsbergeri suhte kaudu) joonisel (17) on Uljaste materjal erakordne. Erakordsus väljendub ülisuures Koenigsbergeri suhtes ehk jääkmagnetiseerituse valdavuses indutseeritud magnetiseerituse üle, mistõttu väärtused langevad väljapoole Henkeli joonestatud „alaid“ pürroitiini-ala lähedusse. Uljaste kivimid on pürroitiinile joonestatud alast nii suurema magnetilise vastuvõtlikkuse kui ka Koenigsbergeri suhtega. Sellise erinevuse põhjuseks võib Uljaste materjali puhul olla pürroitiini ja ülipeeneteralise (titano)magnetiidi koosinemine.



Joonis 17. Puuraugu F188 kivimite magnetiline vastuvõtlikkus vs Koenigsbergeri suhe. Joonise taustal olevad hallid alad ja jooned illustreeriv kujundus on pärit Henkeli 1994. aasta artiklist. Hallid alad markeerivad kivimeid, milles on üle 2% vastavat ferromagnetilist mineraali, jooned vastavalt 1 ja 0,5 % sisaldust.

Uljaste magnetanomaaliat põhjustab praeguste tulemuste alusel valdavalt kivimite jääkmagnetiseeritus, mis võrreldes indutseeritud magnetiseeritusega on ülitugev. Seega on oluline roll ka kivimite jääkmagnetiseerituse suunal. Kahjuks ei võimalda olemasolev orienteerimata puursüdamikumaterjal jääkmagnetiseerituse suuna mõõtmist, kuid suund oli modelleerimise käigus üheks oluliseks muudetavaks parameetriks. Eelpool esitatud mudeleid ei tohi seetõttu käsitleda kui geoloogilistele kehadele vastavaid, see tähendab, et maapõues ei esine ellipsoidseid kehasid. Mudelid väljendavad pigem ferromagnetiliste kivimite, ennekõike pürrotiini-sisaldavate kivimite sisaldust aluskorras. Mudelid näitavad, et kõige rohkem esineb vastavaid kivimeid (~maagistumist) Nüri anomaaliat põhjustavas aluskorras. Seetõttu ei saa magnetilistele andmetele toetudes nõustuda väitega, et Sonda-Uljaste piirkonnas esinev Uljaste kerge on suurim (Pirrus, 1981; Suuroja et al., 2007). Samas vajab Nüri kerke ning magnetanomaaliat põhjustavate kivimite (maagistumise) iseloom täiendavat (p)uurimist.

Henkel (1994) vihjab, et pürrotiini jääkmagnetiseeritus on sageli suunatud geoloogiliste struktuuride tasapinnas. Kui see väide kehtib ka Uljaste-Sonda anomaaliade puhul siis on meil tegemist subvertikaalsete moondekivimite lasunditega. Magnetiseerituse vertikaalsust näitab ka oluliste külgnevate negatiivsete anomaaliade puudumine positiivsete anomaaliade kõrval. Käesoleva töö tulemused toetavad pigem teooriat (Puura et al., 1996; Suuroja et al., 2007), mille alusel on tegemist *monadnock*'i taolise pinnavormiga. Seega ei tohiks Sonda-Uljaste struktuure nimetada kergeteks, vaid jäänukiteks.

Kokkuvõte

Käesolevas bakalaureusetöös käsitletakse Sonda-Uljaste piirkonnas esinevad magnetanomaaliaid (Uljaste, Nüri, Sonda ja Vana-Sonda). Töö raames mõõdeti puursüdamikust F188 pärinevate kivimite füüsikalised omadused (tihedus, magnetiline vastuvõtlikkus ja jääkmagnetiseeritus), termomagnetilised omadused ning modelleeriti mainitud anomaaliad. Lisaks koostati maapealsete tööde käigus magnetvälja tugevuse kaart. Modelleerimisel kasutati nii välitööde kui ka laboratoorselt mõõdetud andmeid. Bakalaureusetöö eesmärk oli iseloomustada Sonda-Uljaste anomaaliat põhjustavaid kivimeid.

Tööst järeldub, et Sonda-Uljaste aluskorra kivimid on ülisuure jääkmagnetiseeritusega, mida põhjustab mineraal pürrotiin. Modelleerimise käigus selgus, et Uljaste ei ole piirkonna ainuke ega suurim anomaalia. Selgus, et suurim on hoopis Nüri anomaalia, mis ei oma aeromagnetiliste anomaaliade kaardil väljundit. Modelleerimisel järeldus, et Sonda-Uljaste magnetanomaaliaid põhjustavad aluskorrastruktuurid on tõenäoliselt subvertikaalsed ning esindavad erosioonilisi jäänukeid.

Summary

The geophysical and petrophysical studies of Sonda-Uljaste magnetic anomaly

This bachelor thesis addresses the magnetic anomalies in Sonda-Uljaste area (Uljaste, Nüri, Sonda and Vana-Sonda). The aim was to measure petrophysical (density, magnetic susceptibility, and remanent magnetization) and thermomagnetic properties of crystalline basement rocks from drill-core F188. As part of the research, fieldwork was carried out, where magnetic field was measured on the ground. Models were based on the data which were measured during laboratory and fieldwork. The aim of the bachelor thesis was to characterize the crystalline basement rocks which cause the Sonda-Uljaste anomaly.

The results prove that the rocks of the Sonda-Uljaste Precambrian basement have an extremely high remanent magnetization which is caused mainly by pyrrhotite. From the modeling it was found that Uljaste is not the biggest anomaly in the area but is outraced by Nüri which is not seen in the aeromagnetic map. The modeling concluded that the layers of metamorphic rocks, which cause the Sonda-Uljaste magnetic anomalies are oriented subvertically. Thus, the results support the previous idea that the structures represent erosional relicts, not uplifted blocks.

Tänuavaldus

Töö autor tänab väga oma juhendajat Jüri Pladot pideva konstruktiivse tagasiside ja toetuse eest. Autor tänab väga Juho Kirsi, kes aitas kivimeid määrata. Samuti tänab kõiki, kes käisid välitöödel.

Kasutatud kirjandus

- All, T., Puura, V. and Vaher, R., 2004. Orogenic structures of the Precambrian basement of Estonia as revealed from the integrated modelling of the crust. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, 53, 165–189.
- Direen, N.G., Pfeiffer, K. M., Schmidt P. W., 2008. Strong remanent magnetization in pyrrhotite: A structurally controlled example from the Paleoproterozoic Tanami orogenic gold province, northern Australia, *Precambrian Research*, 165, 96–106
- Dmitrijeva, M., Plado., Oja., 2018. The Luusika potential field anomaly, eastern Estonia: modelling results, *Estonian Journal of Earth Sciences*, 4, 228–237
- Dorogina, G. A., Gulyaeva, R. I., Selivanov E. N., Balakirev V. F., 2015. Thermal and Thermomagnetic Properties of Pyrrhotites, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 60, 349–355
- Henkel, H. 1994. Standard diagrams of magnetic properties and density-a tool for understanding magnetic petrology, *Journal of Applied Geophysics* 32, 43-53
- Kearey, P., Brooks, M. Hill, I., 1988. *An Introduction to Geophysical Exploration*, Oxfors, England.
- Kontny, A., Friedrich, G., Behr, H. J., de Wall, H., Horn, E. E., Möller, P., Zulauf G., 1997. Formation of ore minerals in metamorphic rocks of the German continental deep drilling site (KTB), *Journal of geophysical research*, 102, 18,323-18,336
- Koppelmaa, H., 2002. *Eesti kristalse aluskorra geoloogiline kaart Mõõtkava 1: 400 000*, Tallinn, Estonia: Eesti Geoloogiakeskus.
- Lanza, R. and Meloni, A., 2006. *The Earth's Magnetism An Introduction for Geologists*, Germany.

Mang, C. and Kontny A., 2013. Origin of two Verwey transitions in different generations of magnetite from the Chesapeake Bay impact structure, USA, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10, 5195-5207

Minyuk, P.S., Tyukova, E.E., Subbotnikova, T.V., Kazansky A.Yu., Fedotov A.P., 2013. Thermal magnetic susceptibility data on natural iron sulfides of northeastern Russia, *Russian Geology and Geophysics*, 54, 464–474

Pirrus, E., 1981. *Settekivimid ja tektoonika*, Tallinn, Estonia

Puura, V., Amantov, A., Tikhomirov, S., Laitakari, I., 1996. Latest events affecting the Precambrian basement, Gulf of Finland and surrounding areas, *Geological Survey of Finland, Special Paper*, 21, 115-125

Puura, V. and Kala, E. 1978. *Kirde-Eesti plakantiklinalid. Baltikumi ja Valgevene lokaalsed struktuurid*. Vilnius, Lithuania

Puura, V. and Vaher, R., 1963. *Aruanne polümetalsete maakide otsingutööde tulemustest Uljaste ja Sinimäe alal (Kirde-Eesti) 1961.-1962.* A. Tallinn, Estonia: Eesti Geoloogiakeskus

Reinwald, J. 1935. Strörungen im Brennschiefergebiet Estlands. *Tehnika Ajakiri*, 9, 161–165.

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

Suuroja, K., Mardim, T., Morgen, E., All, T., Kõiv, M., Otsmaa, M., Niin, M., 2007. Baaskaardi Kiviõli (6443) lehe geoloogilise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine, Tallinn, Estonia: Eesti Geoloogiakeskus.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Annamaria Krull

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
Sonda-Uljaste magnetanomaalia geofüüsikalised ja petrofüüsikalised uuringud,
mille juhendaja on Jüri Plado,
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 litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Annamaria Krull

01.07.2020