

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Õppekava: Geoloogia ja keskkonnatehnoloogia

Tiina Harak
Jõhvi magnetiitkvartsiitide füüsikalised omadused
Bakalaureusetöö geoloogias (12EAP)

Juhendaja: Jüri Plado

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

allkiri, kuupäev

Tartu 2022

Jõhvi magnetiitkvartsiitide füüsikalised omadused

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on kirjeldada Jõhvi magnetiitkvartsiitide füüsikalisi ja magnetilisi omadusi ning hinnata anomaalia põhjustavate ferromagnetiliste mineraalide iseloomu.

Selgus, et tugeva magnetiseerituse tekitab magnetiit, millel on suur jääkmagnetiseerituse väärtus ning tera suurus 80-1000 nm (pseudo-ühedomeenne). Pürroitiini sisaldus ei avalda magnetiidi taustal märkimisväärt mõju.

Märksõnad: Jõhvi magnetanomaalia, magnetiitkvartsiit, jääkmagnetiseeritus, hüstereesise analüüs, PSD

CERCS: P500- Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia

Physical properties of Jõhvi magnetite quartzites

The aim of this bachelor's thesis is to describe the physical and magnetic properties of Jõhvi magnetite quartzites and to evaluate the nature of ferromagnetic minerals that cause anomalies.

It was found that the magnetization is caused by high magnetic remanence and a grain size of 80-1000 nm (pseudo-single domain). The content of pyrrhotite has no significant effect on the background of magnetite.

Keywords: Jõhvi magnetic anomaly, magnetite quartzite, magnetic remanence, hysteresis analysis, PSD

CERCS: P500- Geophysics, physical oceanography, meteorology

Sisukord	
Sissejuhatus.....	4
Jõhvi plokk.....	5
Materjal ja metoodika.....	7
Tulemused.....	9
Tihedus.....	9
Magnetiline vastuvõtlikkus	9
Jääkmagnetiseeritus ja Koenigsbergeri suhe	9
Magnetilise vastuvõtlikkuse sõltuvus temperatuurist.....	11
Magnetiline hüstereesis.....	14
Diskussioon	17
Kokkuvõte	21
Summary	22
Kasutatud kirjandus	23
Tänuavaldus	25

Sissejuhatus

Käesolevas bakalaureusetöös uuritakse kahe aastal 2019 Jõhvi läänepoolse magnetanomaalia kohale puuritud südamiku füüsikalisi omadusi. Proovid võeti puursüdamike PA-1 (sügavus 770,1 m, X =6587423; Y =699205.9) ja PA-2 (sügavus 770,49 m, X =6587461; Y =699143.3) kristalliinset aluskorda avavast osast, täpsemalt sügavustest vastavalt 298,1-740,39 ja 337,17-562,53 m. Proovid võeti Eesti Geoloogiateenistuse töötajate poolt ja need iseloomustavad maagistunud lõike.

Bakalaureusetöö käigus mõõdeti kiviproovide (i) näivtihedust, (ii) magnetilist vastuvõtlikkust ning selle sõltuvust temperatuurist ja välise magnetvälja tugevusest (hüstereesis) ja (iii) jääkmagnetiseerituse intensiivsust. Mõõtmistulemuste alusel arvutati kivimite kogumagnetiseerituse väärtus ning Koenigsbergeri suhe, leiti Néeli ja Curie temperatuurid ning iseloomustati magnetiidi domeensust. Mõõdetud füüsikalisi omadusi võrreldi Jõhvi materjali varasemate mõõtmistulemustega.

Töö eesmärgiks on iseloomustada Jõhvi magnetanomaaliat põhjustavaid petrofüüsikalisi omadusi, see tähendab vastata küsimusele, milliste mineraalide ja millised magnetilised omadused põhjustavad tugeva magnetanomaalia.

Jõhvi plokk

Euroopa eelkambriumi aegne aluskorra plokk paikneb Ida-Euroopa kraatonil, mis on suures osas kaetud Paleosoiliste settekivimitega, kuid mis avanevad tänu intensiivsele kulutusele Balti kilbi ja Ukraina kilbi alal. 1,96 miljardit aastat tagasi algas alal ookeani riftistumine, tänu millele formeerus Svekofenni murenemiskoorik 1,92-1,87 miljardit aastat tagasi. Riftistumise tagajärjel tekkisid intrusiivid ja vulkaanilised ning settelised kivimid. Läänemere vanimad kivimikompleksid asuvad Bergslagenis, 200 km kaugusel Stockholmist. Alal on tuntud oma arvukate kaevanduste poolest. Seda piirkonda seostatakse ka Uusimaa vööndiga Edela-Soomes ning Jõhvi tsooniga Kirde-Eestis. Bergslagen on Euroopa kõige intensiivsemalt mineraliseerunud piirkond, kus leidub nii Fe($\pm$ Mn) oksiide kui ka Cu-Zn sulfiide (Sunblad et al. 2021).

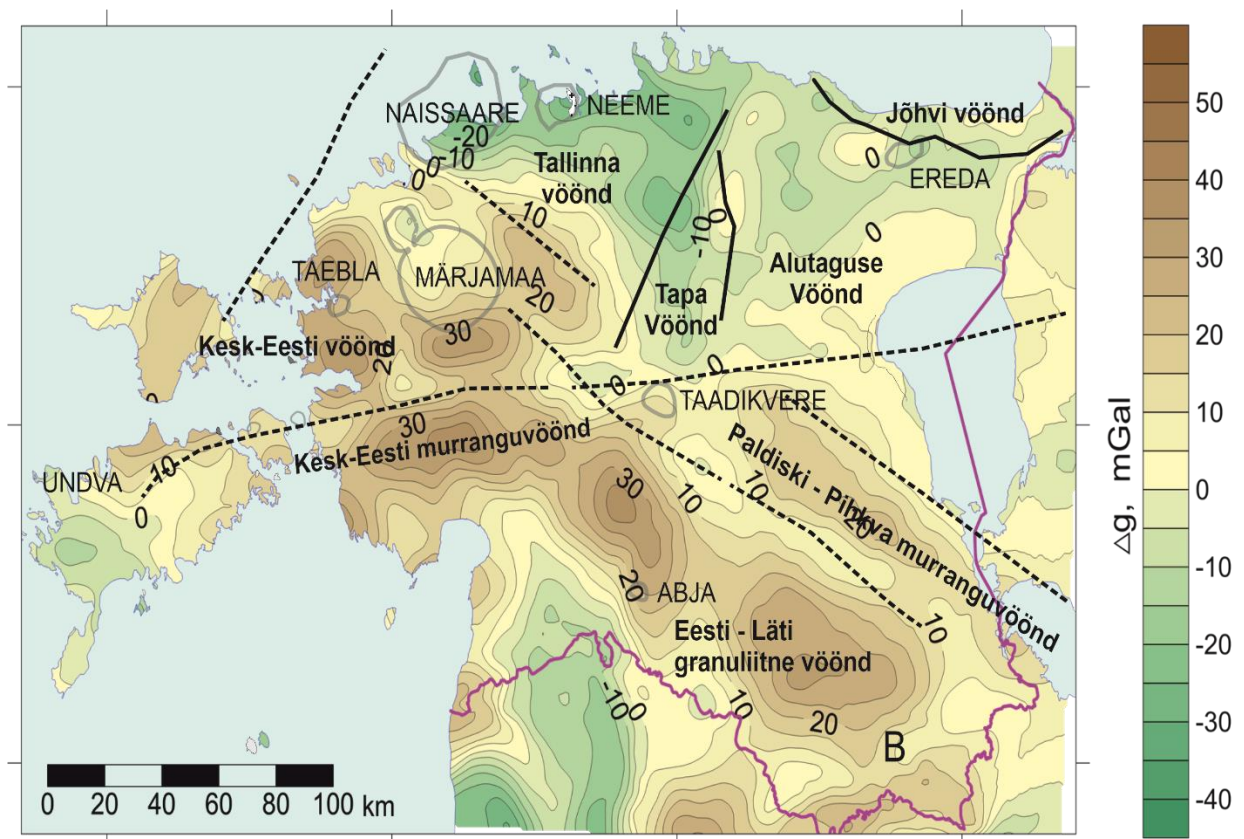
Eesti aluskord koosneb Paleoproterosoikumi vanuselistest magma- ja moondekivimitest, mida katab 100-780 m paksune settekivimite kompleks. Aluskorra ülemine osa on kuni kümnete meetrite paksuses murenenud. Mesoproterosoilise ja Neoproterosoilise intensiivse kulutuse tagajärjel on ala ulatuslikult tasandunud ning lõuna suunas kallutatud (0.10° - 0.20°). Aluskord on jaotatud Põhja-Eesti amfiboliitseks faatsieseks ning Lõuna-Eesti granuliitseks faatsieseks. Neid lahutab Paldiski-Pihkva tektooniline murranguvöönd. Aluskord jagatakse kuueks struktuuritsooniks: Tallinna, Alutaguse, Jõhvi, Lääne-Eesti, Tapa ja Lõuna-Eesti tsoon (Joonis 1; Soesoo et al., 2020).

Kirde-Eestis (Alutaguse ja Tapa tsoon) leidub moondunud settekivimeid, mis on väikese magnetiseeritusega ning mille sarnaseid leidub ka Svekofenni Botnia basseini Fennoskandia kilbi alal. Kirde-Eestis Jõhvi tsoonis on aluskorras raua oksiidide maagikehad, mille isotoopkoostis on sarnane Bergslanegi ala rauamaagile (Sunblad et al. 2021).

1935-1937 a viidi läbi sõjaline topograafiline uuring kaardistamiseks Jõhvi piirkonna magnetanomaaliaid, kus leiti kuni 20 000 mT suurune anomaalia, mille põhjustajaks arvati olevat rauamaagi keha ($6 \times 10^9 \text{ m}^3$). (Rundqvist et al. 1993, Linari 1940). 1935-1937 a puuriti piirkonda 2 auku sügavusega 505,0 m ja 721,5 m (Jõhvi I ja Jõhvi II puuraugud), kust avastati põhilise maakmineraalina magnetiit. 1967-1968 a puuriti anomaalia piirkonda uuesti, kokku tehti 5 puurauku (millest tänaseks on kõik hävinud).

2019 a tehti Jõhvi alal magnetomeetriline kaardistamine, petrofüüsikalised uuringud Jõhvi I ja Jõhvi II puursüdame põhjal ning elektromagnetiline mõõdistamine (FrEM) (Plado et al. 2020). Alal leiti 3 tugevama magnetväljaga piirkonda, 19 290 nT (lääne anomaalia), 15 880 nT (ida anomaalia) ja 8080 nT (põhja anomaalia). Uuringutega leiti, et magnetiitkvartsiitides on jääkmagnetiseeritus indutseeritud magnetiseeritusest 10 korda kõrgem, mis viitab magnetiidi väikesele tera suurusele ($<1 \mu\text{m}$).

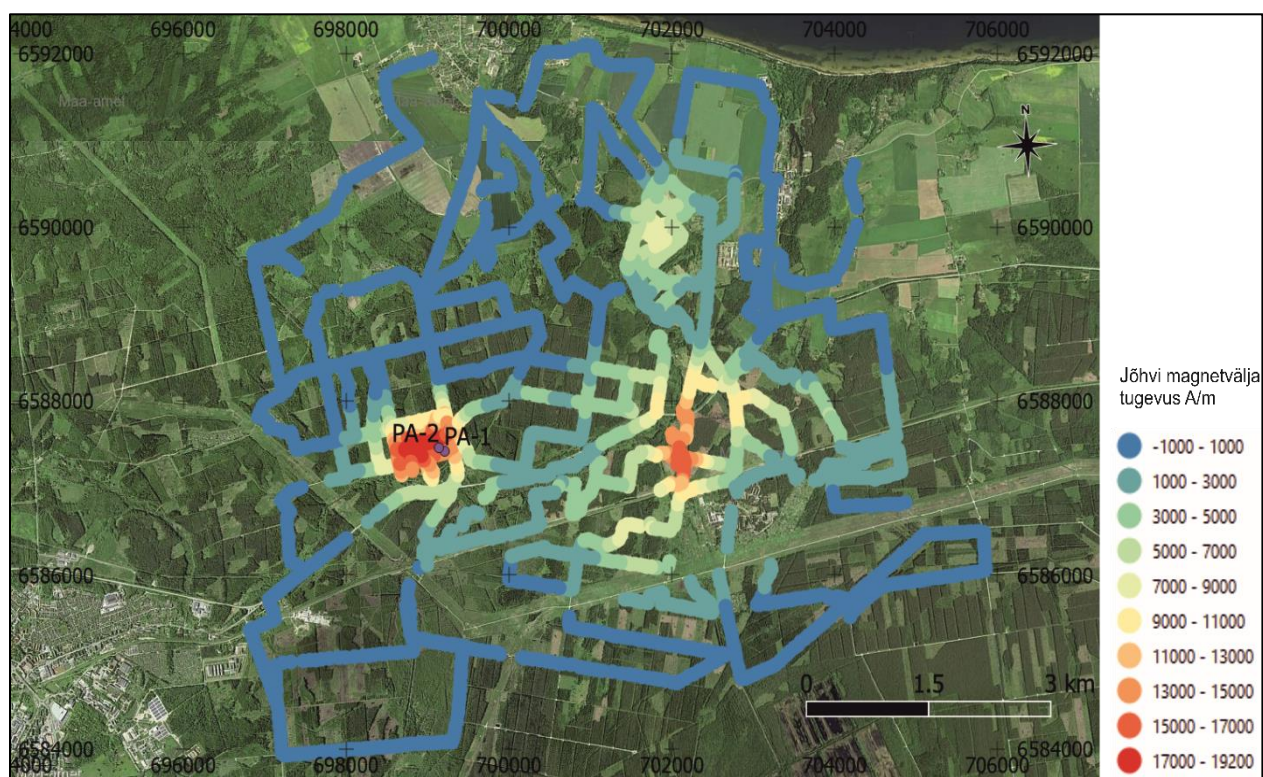
Nirgi et al. (2022) kirjeldavad 2019 a puuritud Jõhvi puuraukude kristalliinsete kivimite koosseisu. Moondekivimitest esinevad seal magnetiit-gneiss, granaat-gneiss, biotiit-päevakivi alumogneiss, granaat-biotiit-plagioklass-gneiss ja biotiit-päevakivi gneiss. Üleminekuliseks kivimitüübiks tardkivimitelt moondekivimitele on migmatiit. Mineralisatsiooni kannavad magnetiit, magnetiit-sulfiid ja sulfiid. PA-1s oli magnetiiti kokku 181,94 m, magnetiit-sulfiidi 26,48 m ja sulfiidi 22 m. PA-2s oli magnetiiti kokku 197,77 m, magnetiit-sulfiidi 59,47 m ja sulfiidi 16,81 m. Mineralisatsiooniga kaasnenud kivimiteks olid magnetiit-gneiss, granaat-biotiit-päevakivi-gneiss, granaat-amfibool-gneiss, pürokseen-gneiss, biotiit-amfibool-gneiss, granaat-pürokseen-gneiss ja migmatiit.



Joonis 1. Eesti gravimeetriliste anomaaliade kaart Eesti Geoloogiakeskuse andmetel. Kaardile on kantud aluskorra peamised struktuursed vööndid (Dmitrijeva *et al.* 2018).

Materjal ja metoodika

Töö käigus mõõdeti puursüdamikust PA-1 11 proovi ja puursüdamikust PA-2 27 proovi füüsikalisi omadusi (Joonis 2). Proovide sügavused pärinevad aruandest Nirgi *et al.* (2022). Töö autor ega juhendaja proovide võtmisel ei osalenud. Füüsikaliste omaduste mõõtmised toimusid Tartu Ülikooli geoloogia osakonna ning Helsinki Ülikooli paleomagnetismi ja petrofüüsika laboratooriumites. Proovid kujutasid enesest kivimtükke, mida oli eelnevalt tarvis töödelda selleks, et nad mahuksid jääkmagnetiseerituse mõõtmistel kasutatavatesse kuubikujulistesse proovitopsidesse serva pikkusega 1,8 cm. Samadest proovidest olid eelnevalt röntgenstruktuuranalüüsi eesmärgil tehtud pulbrid, mida kasutati temperatuuri ja magnetilise vastuvõtlikkuse omavahelise sõltuvuse ning magnetilise hüstereesi uuringutel. Töös kasutatud kivimtüüpide määramine on leitud Nirgi *et al.* (2022) aruandest.



Joonis 2. Jõhvi magnetvälja tugevus (A/m) ja puuraukude asukohad (PA-1 ja PA-2).

Füüsikalised omadused mõõdeti võrdlemaks saadud tulemusi eelnevalt Jõhvi piirkonnas tehtud petrofüüsikaliste uuringutega, saadud tulemuste kõrvutamiseks mineraloogilise informatsiooniga (Nirgi *et al.* 2022) ning saamaks infot magnetiseerituse põhjuslikkusest.

Tiheduse mõõtmiseks kaaluti ära kuiva proovi mass (m_a ; g) ning veega küllastunud proovi mass (m_w ; g). Vee tiheduse (ρ_w) väärtusena kasutati $0,9978 \text{ g/cm}^3$, mis vastab temperatuurile 22°C . Seejärel arvutati näivtihedus (ρ_n ; g/cm^3):

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

Näivtiheduse abil arvutati proovi ruumala (V , cm^3):

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

Magnetilise vastuvõtlikkuse (x_v ; -) mõõtmiseks kasutati kapameetrit KLY5. Magnetvälja tugevusena (H) kasutati väärtust $39,7899 \text{ Am}^{-1}$ ($B = 50000 \text{ nT}$). Tulemust kasutati indutseeritud magnetiseerituse (J_i ; Am^{-1}) väärtuse arvutamiseks:

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

Jääkmagnetiseerituse (J_{NRM} ; Am^{-1}) väärtus mõõdeti spinner-magnetomeetriga JR-6A. Magnetiline vastuvõtlikkus ja jääkmagnetiseeritus on normaliseeritud ruumala suhtes.

Selle järel arvutati Koenigsbergeri suhe (Q ; -), mis on jääkmagnetiseerituse suhe indutseeritud magnetiseeritusse.

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

Kasutades magnetilise vastuvõtlikkuse kapameetrit KLY5 mõõdeti kümne proovi magnetilise vastuvõtlikkuse sõltuvust temperatuurist. Selleks kasutati ükshaaval eelnevalt pulbristatud proove. Esmalt jahutati proov vedela lämmastiku abil temperatuurile -195°C ning lasti sel soojeneda toatemperatuurile. Seejärel kuumutati proovi 700°C -ni ja jahutati toatemperatuurile. Protsessi vältel mõõdeti perioodiliselt proovi magnetilist vastuvõtlikkust.

Hüstereesise mõõtmised teostas dotsent Tomáš Kohout'i juhendamisel Helsinki Ülikooli üliõpilane Lakshika Palamakumbure J. Mõõtmiseks kasutati vibreeriva prooviga magnetomeetrit (Vibrating Sample Magnetometer, Princeton Measurements Model 3900). Mõõtmistulemustest lahutati dia- ja paramagnetiliste mineraalide signaalid, mistõttu silmus iseloomustab ferromagnetilisi mineraale.

Küllastusmagnetiseeritus (M_s , Am^2/kg) jääkmagnetiseeritus (M_r , Am^2/kg) koertsitiivsus (H_c , mT) ja jääkmagnetiseerituse koertsitiivsus (H_{cr} , mT) mõõdeti Helsinki ülikoolis.

Tulemused

Tihedus

Tabelis 1 on toodud kivimtüüpide keskmised füüsikalised omadused ja nende standardhälbed. Kõige suurem tihedus on magnetiit-gneissidel ($3,27 - 4,89 \text{ g/cm}^3$). Üks magnetiit-gneisi proov (TS-00010) eristub teistest suurema tiheduse tõttu ($4,89 \text{ g/cm}^3$), mida põhjustab suurem granaadi (keskmiselt $3,5-4,3 \text{ g/cm}^3$) (www.minerals.net) ja pürrotiini (keskmiselt $4,65 \text{ g/cm}^3$) sisaldus proovis (Telford *et al.* 1990). Sarnane on ka granaat-gneissi tihedus, olles eelnevast vaid $0,18 \text{ g/cm}^3$ võrra väiksem ($3,43-3,64 \text{ g/cm}^3$). Kõige väiksema tihedusega on graniit ($2,61-2,69 \text{ g/cm}^3$). Joonisel 3 võib välja lugeda väiksemaid tiheduse väärtusi granaat-biotiit-plagioklass-gneissidel, biotiit ja biotiit-päevakivi-gneissidel ning graniitidel.

Tabel 1. Jõhvi puuraukude PA-1 ja PA-2 füüsikalised omadused kivimtüüpide järgi keskmise sisalduse alusel.

Kivimi tüüp	N	$\rho_n \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\chi \text{ (SI)}$	J _{NRM} (A/m)	Q (-)
Biotiit- ja biotiit-päevakivi-gneiss	8	2.93 ± 0.40	0.32 ± 0.59	177.38 ± 354.20	6.68 ± 6.57
Biotiit-päevakivi-alumogneiss	3	2.82 ± 0.04	0.25 ± 0.06	131.18 ± 167.19	13.82 ± 18.53
Granaat-biotiit-plagioklass-gneiss	9	2.80 ± 0.07	0.01 ± 0.02	0.99 ± 2.34	1.96 ± 2.99
Granaat-gneiss	2	3.53 ± 0.15	0.55 ± 0.40	12.97 ± 11.27	0.56 ± 0.12
Graniit	4	2.64 ± 0.03	0.01 ± 0.01	0.09 ± 0.17	2.09 ± 1.06
Magnetiit-gneiss	12	3.71 ± 0.42	1.65 ± 0.70	410.50 ± 423.88	6.40 ± 6.62

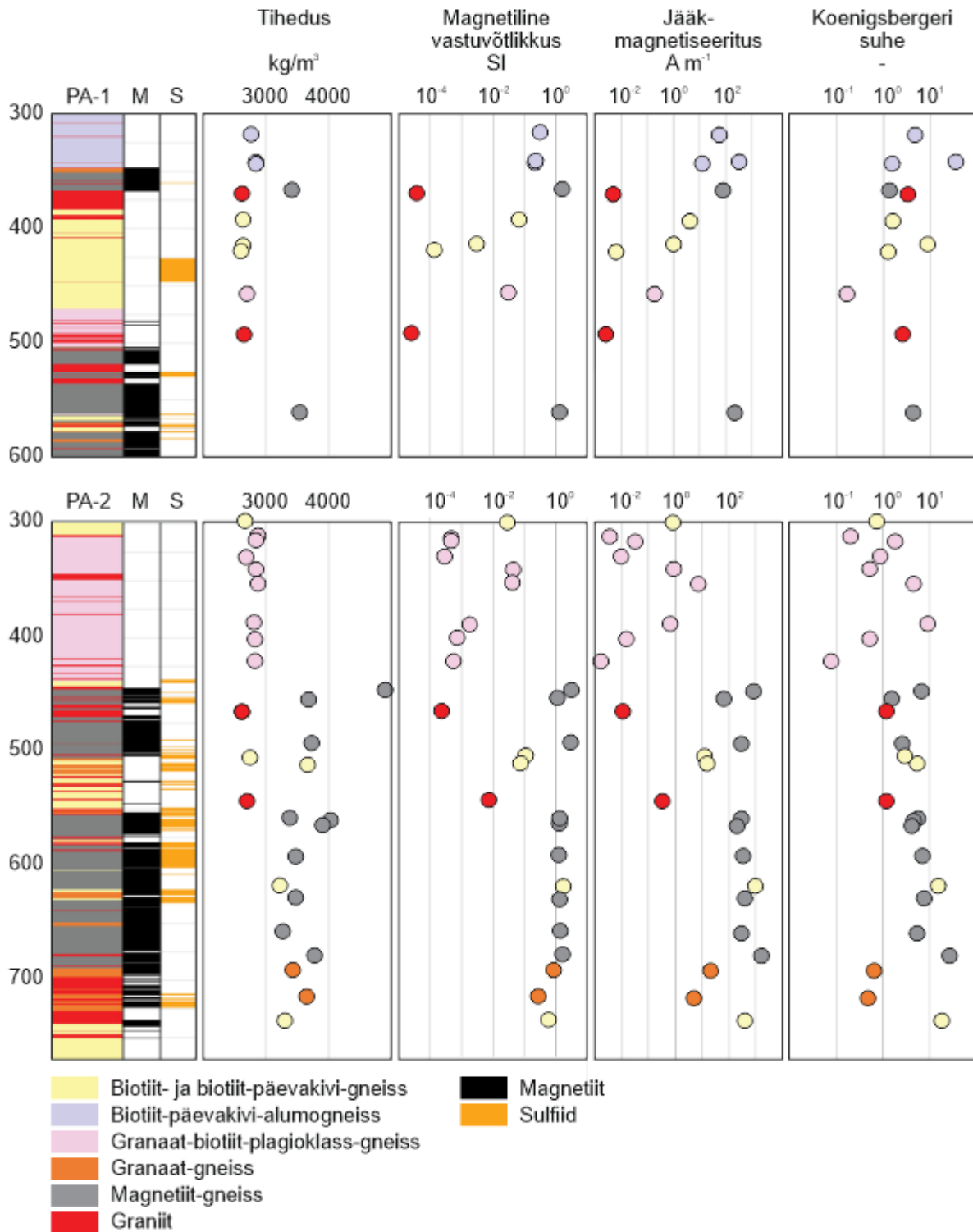
N-proovide arv, $\rho_n \text{ (g/cm}^3\text{)}$ – näivtihedus, $\chi \text{ (SI)}$ – magnetiline vastuvõtlikkus, Q (-) – Koenigsbergeri suhe, J_{NRM} (A/m) - jääkmagnetiseeritus

Magnetiline vastuvõtlikkus

Suurim magnetiline vastuvõtlikkus on magnetiit-gneissidel ($1,097-3,225 \text{ SI}$) ja väikseim graniidil ($0,0002-0,00037 \text{ SI}$). Väga väike magnetiline vastuvõtlikkus on ka granaat-biotiit-plagioklass-gneissidel ($0,00028-0,043 \text{ SI}$). Biotiit ja biotiit-päevakivi-gneiss, biotiit-päevakivi-alumogneiss ja granaat-gneiss olid keskmise magnetilise vastuvõtlikkusega $0,253-0,554 \text{ SI}$ (Tabel 1.). Joonisel 3 on näha magnetilise vastuvõtlikkuse tõusu sulfiidsete ja magnetiiti sisaldavate kivimite esinemise järgselt.

Jääkmagnetiseeritus ja Koenigsbergeri suhe

Ka jääkmagnetiseeritus on suurim magnetiit-gneissidel, olles samas väga varieeruva väärtusvahemikuga ($67,12-1667 \text{ A/m}$). Graniidil on väikseim jääkmagnetiseeritus ($0,0048-0,34 \text{ A/m}$). Suurim Koenigsbergeri suhe ($1,55-35,14 \text{ (-)}$) on biotiit-päevakivi-alumogneissidel, kus esineb kokku kolmel proovil suur väärtuste erinevus. Väikseim Koenigsbergeri suhe ($0,47-0,64 \text{ (-)}$) on granaat-gneissidel. Joonisel 3 näeb eri kivimtüüpide sarnaseid Koenigsbergeri väärtusi, kui välja arvata granaat-biotiit-plagioklass-gneiss ja granaat-gneiss, mille väärtused on väiksemad. Jääkmagnetiseeritus on väiksema väärtusega nii granaat-biotiit-plagioklass-gneissidel kui ka graniitidel.



Joonis 3. Puursüdamiku PA-1 ja PA-2 kiviproovide tihedus, magnetiline vastuvõtlikkus, jääkmagnetiseeritus ja Koenigsbergeri suhe. Välja on toodud magnetiidi ja sulfiidi esinemine puursüdamikus. Andmestik pärineb käesolevast tööst, litoloogiline tulp on joonestatud Nirgi *et al.* (2022) andmestiku alusel.

Magnetilise vastuvõtlikkuse sõltuvus temperatuurist

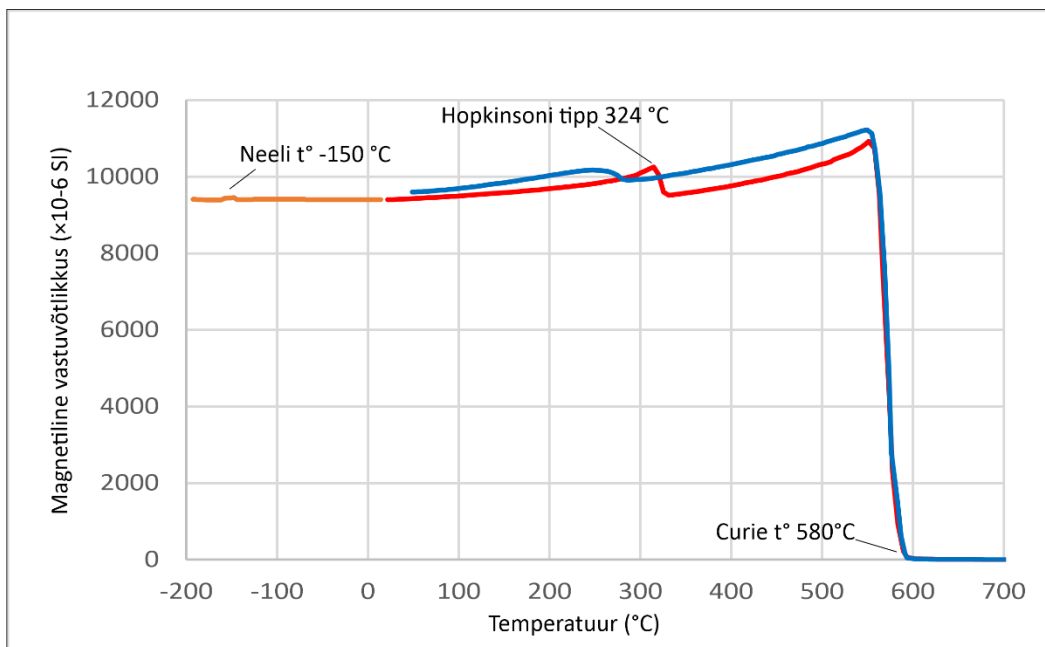
Magnetilise vastuvõtlikkuse sõltuvus temperatuurist näitab magnetiidi ja pürroitiini sisaldust proovides. Kuumutati 10 proovi, kokku kolmest eri kivimgrupist (granaat-biotiit-plagioklass-gneiss, magnetiit-gneiss ja biotiit ja biotiit-päevakivi-gneiss, Tabel 2)

Tabel 2. Ferromagnetiliste mineraalide esinemine Jõhvi puuraukudes PA-1 ja PA-2 (10 proovi) füüsika ja mineraloogia järgi.

Proov	Sügavus (m)	Kivimtüüp	χ_n (SI)	Pürroitiin				
				Magnetii				
				Curie t°	Sisaldus (vol%)	Néeli t°	Curie t°	Sisaldus (vol%)
PA-1								
TS-00035	561,95- 561,99	Granaat-biotiit-plagioklass-gneiss	8106,8	327	7,8	+	584	7,2
PA-2								
TS-00002	313,20- 313,24	Granaat-biotiit-plagioklass-gneiss	10,3	-	0	-	586	0
TS-00006	353,68- 353,72	Granaat-biotiit-plagioklass-gneiss	13	325	2	-	578	Jäljed
TS-00010	447,30- 447,34	Magnetiiit-gneiss	4598,1	329	8,8	+	581	7,5
TS-00016	560,13- 560,17	Magnetiiit-gneiss	25125,8	-	0	+	580	14,9
TS-00019	629,80- 629,82	Magnetiiit-gneiss	33919,2	-	0	+	580	24,7
TS-00024	736,77- 736,81	Biotiit- ja biotiit-päevakivi-gneiss	12410,7	-	0	+	578	7,9
TS-00028	365,86- 365,90	Magnetiiit-gneiss	22030,8	-	0	+	581	15
TS-00036	562,12- 562,16	Granaat-biotiit-plagioklass-gneiss	56814,1	326	1,9	+	579	33,8
TS-00037	565,00- 565,04	Granaat-biotiit-plagioklass-gneiss	9401,1	327	9,3	+	582	7,8

PA – puurauk, χ_n – näiv magnetiline vastuvõtlikkus, XRD – sisaldus XRD järgi, t° - temperatuur.

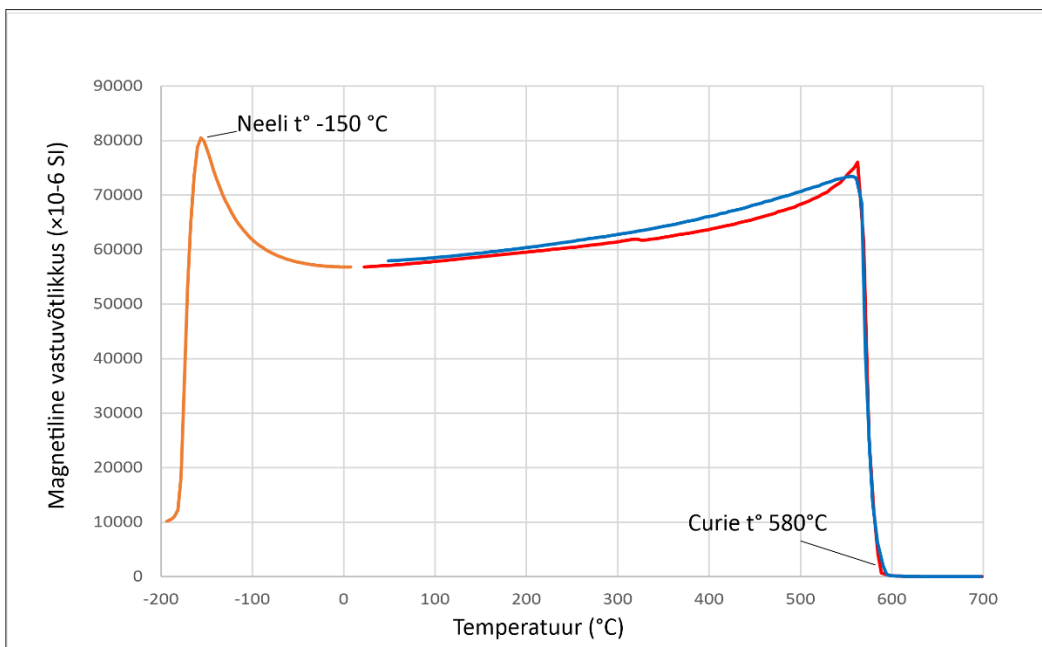
Pürroitiini sisalduse esinemist proovides märkis ära magnetilise vastuvõtlikkuse kasv kuni temperatuurini 314°C (Hopkinsoni tipp, Minyuk *et al.* 2013), peale mida toimub järsk magnetilise vastuvõtlikkuse kahanemine temperatuurini 327°C, mis on antud proovi Curie temperatuur (Joonis., Dirteen *et al.* 2008).



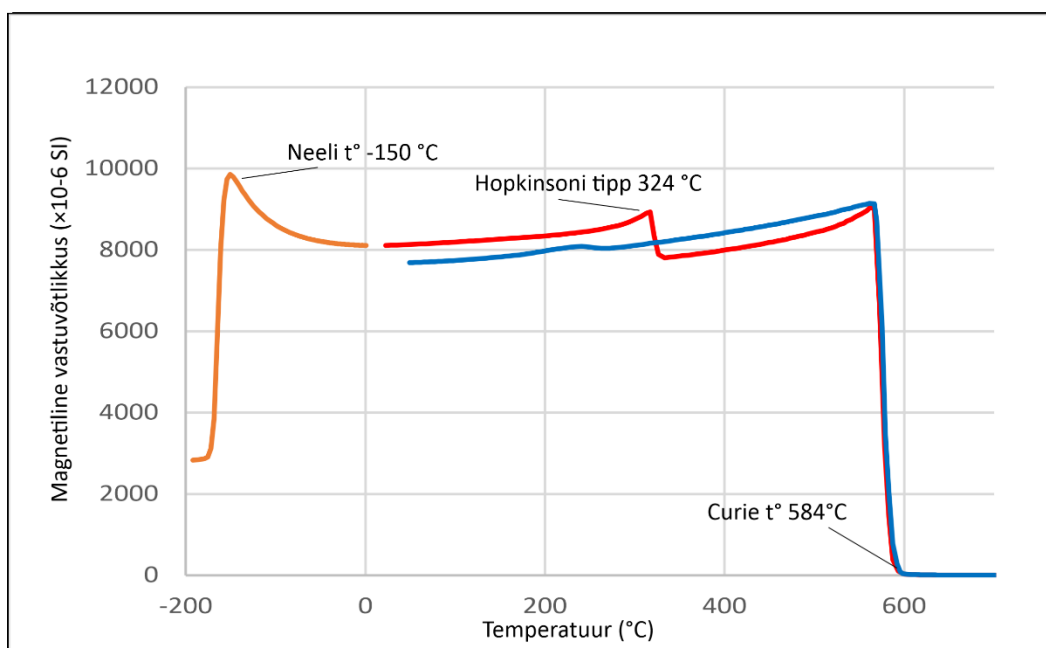
Joonis 4. Jõhvi PA-2 proov TS-00037. Kollane värv markerib soojenemist, punane kuumutamist ja sinine jahtumist. Graafikul on näha magnetilise vastuvõtlikkuse tõusu kuni temperatuurini 314°C (Hopkinsoni tipp) ning seejärel järsku langust temperatuurini 327°C (pürroitiini Curie temperatuur), peale mida hakkab vastuvõtlikkus jälle tõusma. Magnetiidi Curie temperatuur on 580°C.

Proov TS-00002 ja TS-00006 ei sisaldanud magnetiiti olulisel määral (Lisa 1), mida näitab ka Néeli temperatuuri (Arblaster, J. 2013) puudumine -150° juures. Ülejäänud 8 proovi (TS-00035, TS-00010, TS-00016, TS-00019, TS00024, TS00028, TS00036, TS00037) näitasid soojenemisel Néeli temperatuuri esinemist (Joonis 5).

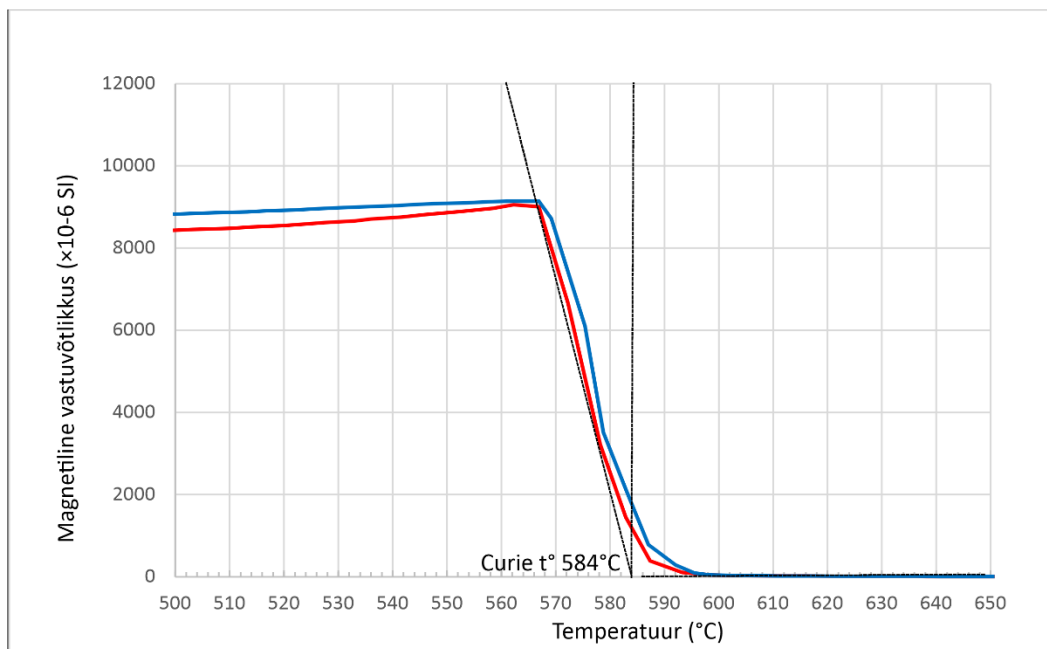
Kõigis proovides leidis magnetiiti, mida näitab kuumutamisel magnetilise vastuvõtlikkuse tipu järel magnetilise vastuvõtlikkuse järsk langus vahemikus 578°C-586°C, mis vastab magnetiidi Curie temperatuurile.



Joonis 5. Jõhvi PA-2 proov TS-00036. Kollane värv markeerib külmutamist, punane soojenemist ja sinine jahtumist. Néeli temperatuuri esinemine -150°C juures. Graafikul on näha magnetilise vastuvõtlikkuse järsk tõus kuni -150°C ni ning seejärel järsk langus. Magnetiidi Curie temperatuur on 580°C .



Joonis 6. Jõhvi PA-1 proov TS-00035. Kollane värv markeerib külmutamist, punane soojenemist ja sinine jahtumist. Joonisel märgib magnetiidi esinemist Curie temperatuur 584°C . Graafikul on näha magnetilise vastuvõtlikkuse tõusu kuni temperatuurini 324°C (Hopkinsoni tipp).



Joonis 7. Jõhvi PA-1 proov TS-00035. Punane värv markeerib soojenemist ja sinine jahtumist. Joonisel märgib magnetiidi esinemist Curie temperatuur 584°C.

Magnetiline hüstereesis

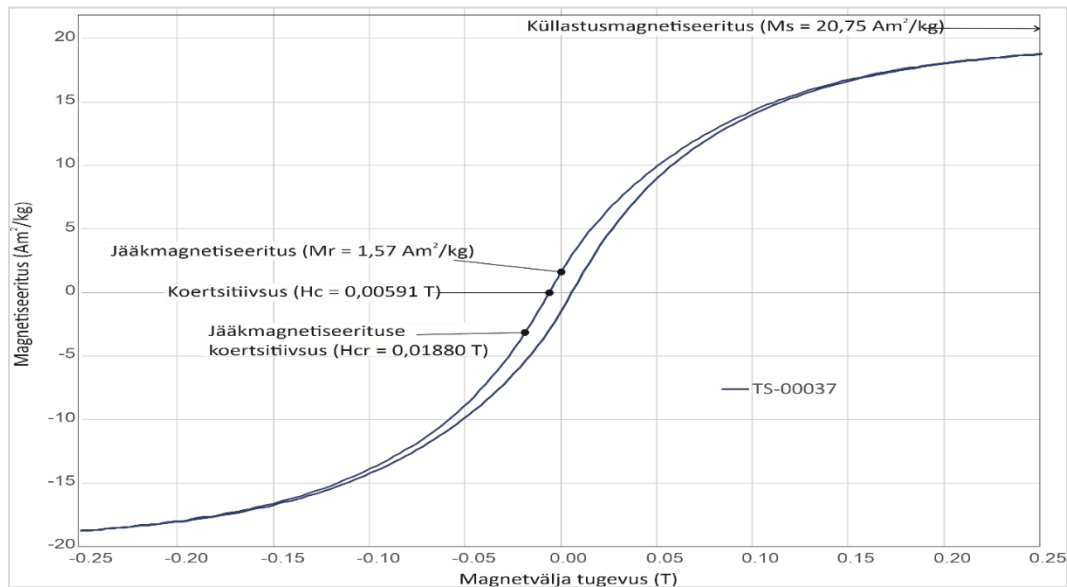
Magnetiline hüstereesis mõõdeti kokku 12-l proovil (Tabel 3). Vaadeldi magnetvälja tugevuse suurendamisel mõju magnetiseeritusele. Magnetvälja suurendati küllastusmagnetiseerituseni (M_s , Joonis 8). Seejärel magnetvälja tugevus vähendati nullini, kuid kivimpulber jäi püsivalt magnetiseerituks (M_r). Magnetiseerituse kaotamiseks tugevdatakse magnetvälja (H_c) eelnevale vastupidises suunas, magnetvälja jätkuval tugevdamisel tekib taaskord magnetiline küllastus. Selleks, et kaotada proovi jääkmagnetiseeritus (H_{cr}) peale magnetvälja eemaldamist, tuleb rakendada tugevamat magnetvälja. H_{cr} väärtus leiti tarkvara poolt. Muutes magnetvälja piisava tugevusega ühes ja teises suunas, saadakse hüstereesise silmus (Evans *et al.* 2003). Joonisel 9 on välja toodud 12 proovi hüstereesise silmused. Graafikute silmuseline kuju iseloomustab ferromagnetilisi mineraale (Evans *et al.* 2003). Silmuste kitsas kuju näitab vähest hajutatud energia olemasolu korduval magnetvälja suurendamisel ja vähendamisel (väike M_r ja H_{cr}). Küllastusmagnetiseeritus on suurem proovides, mis sisaldavad rohkelt magnetiiti (Joonis 9, TS-00036, 33,8 vol% ja TS-00021, 28,4 vol%). Pürroitiini sisaldavad proovid TS-00006 (2,0 vol%), TS-00010 (8,8 vol%), TS-00035 (7,8 vol%), TS-00036 (1,9 vol%) ja TS-00037 (9,3 vol%).

Proovides TS-00002 ja TS-00006 puudub hüstereesise alusel ferromagnetiline signaal, mistõttu on silmused pärast paramagnetilise signaali lahutamist nähtavad sirgetena (Joonis 9). Kuigi nendes proovides on kuumutamise andmetel näha pürroitiinile ja magnetiidile vastavad Curie temperatuurid, on sisaldused liiga väikesed, et hüstereesise alusel välja paista.

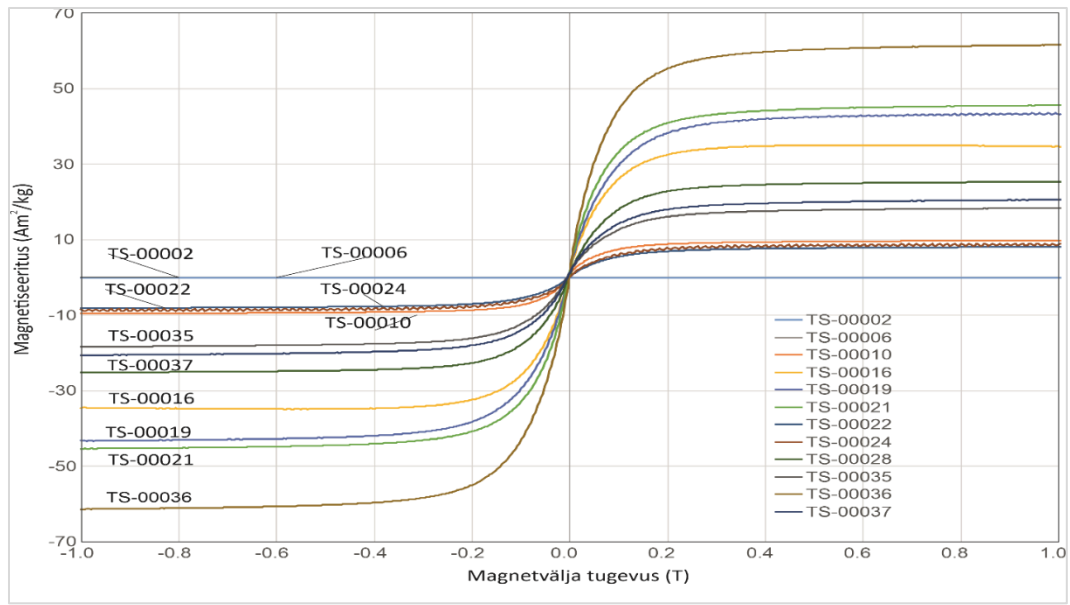
Tabel 3. Magnetilise hüstereesise mõõtmistulemused.

Proov	Ms (Am ² /kg)	Mr (Am ² /kg)	Hc (mT)	Hcr (mT)	Mr/Ms	H _{cr} /H _c	Magnetiidi sisaldus (vol%)	Pürroitiini sisaldus (vol%)
TS-02	0,002	0,0005	14,35	48,35	0,25835	3,369338	0	-
TS-06	0,011	0,005	16,01	30,75	0,454545	1,920675	jäljed	2,0
TS-10	9,71	1,09	6,06	15,27	0,112255	2,519802	7,5	8,8
TS-16	34,3	1,99	3,9	13,19	0,058017	3,382051	14,9	-
TS-19	43,41	2,38	4,19	13,69	0,054826	3,267303	24,7	-
TS-21	45,59	2,47	3,51	12,65	0,054179	3,603989	28,4	-
TS-22	8,24	0,3	2,73	14,93	0,036408	5,468864	4,6	-
TS-24	8,74	0,27	1,79	2,47	0,030892	1,379888	7,9	-
TS-28	25,29	0,99	2,87	11,84	0,039146	4,125436	15	-
TS-35	18,47	1,59	6,8	21,9	0,086086	3,220588	7,2	7,8
TS-36	61,66	2,31	2,36	4,3	0,037464	1,822034	33,8	1,9
TS-37	20,75	1,57	5,91	18,76	0,075663	3,174281	7,8	9,3

Ms – küllastusmagnetiseeritus. Mr – jääkmagnetiseeritus. Hc – koertsitiivsus. Hcr – jääkmagnetiseerituse koertsitiivsus. Magnetiidi ja pürroitiini sisaldus määrati XRD alusel (Nirgi *et al.* 2022).



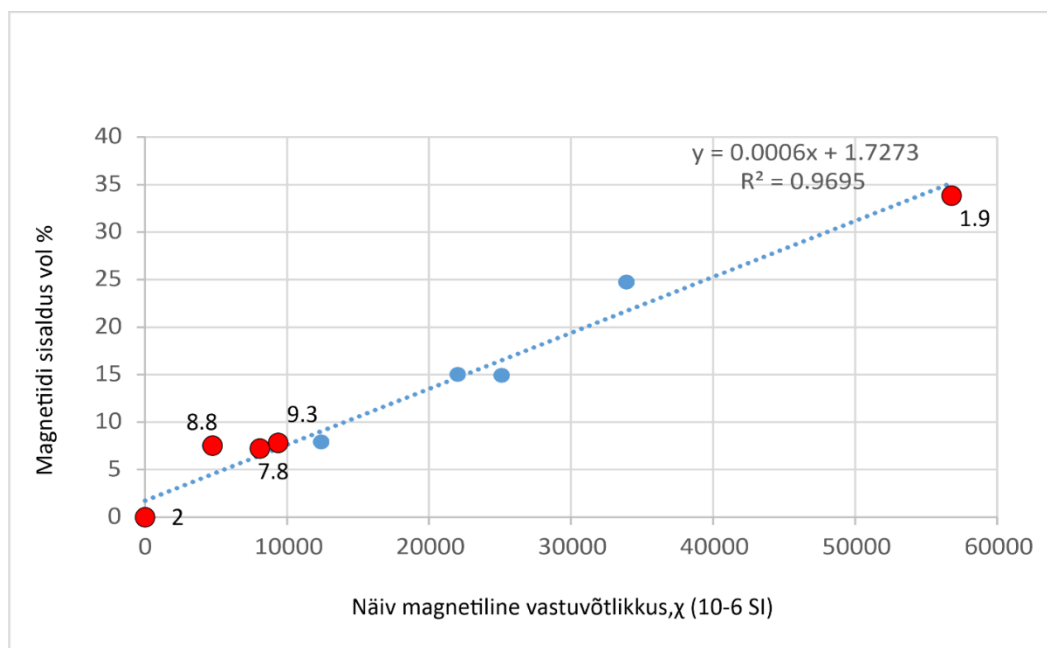
Joonis 8. Jõhvi PA-2 proov TS-00037 magnetiseerituse sõltuvus magnetvälja tugevusest.



Joonis 9. Magnetiseerituse sõltuvus magnetvälja tugevusest. TS – proovi number. TS-00006 on joone TS-00002 all ning seega ei ole joonisel paista.

Diskussioon

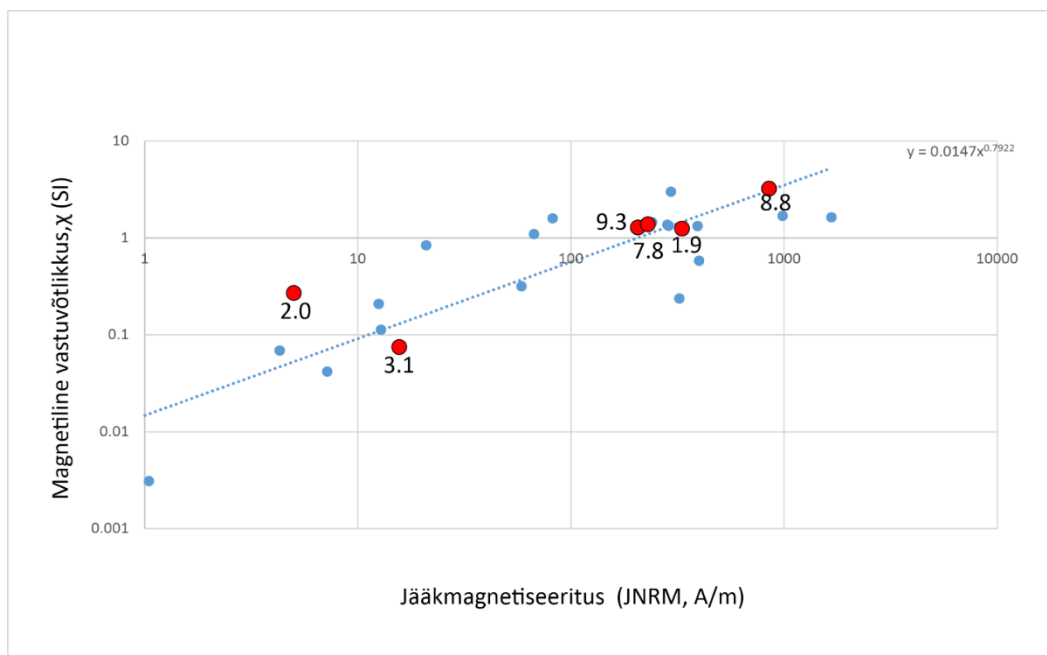
Joonisel 10 on kirjeldatud magnetiidi sisalduse (vol%) ja näiva magnetilise vastuvõtlikkuse χ (10^{-6} SI) seost. Kuumutamisel on kasutatud 10 proovi, millest 5 sisaldasid pürroitiini (TS-00006, TS00010, TS00035, TS00036, TS00037). Kõige suurem magnetiidi sisaldus on proovis TS-00036 (33,8 vol%), kus leidub pürroitiini 1,9 vol%. Kõige väiksem magnetiidi sisaldus on proovis TS-00006 (0 vol%), kus leidub pürroitiini 2 vol%. Magnetilise vastuvõtlikkuse sõltuvus temperatuurist näitab, et valdavaks magnetiseerituse põhjustajaks on magnetiit. Magnetilise vastuvõtlikkuse ja magnetiidi sisalduse vahel eksisteerib lineaarne sõltuvus. Pürroitiini sisaldus ei avalda magnetiidi taustal magnetilisele vastuvõtlikkusele mõju. Magnetilise vastuvõtlikkuse uuringutel erinevate temperatuuride juures tuvastati Curie temperatuuride alusel magnetiidi ja pürroitiini esinemine kõikides proovides, kus magnetiiti esines ka XRD alusel. Lisaks leidis Curie temperatuuride alusel magnetiiti ka proovides TS-00002 ja TS-00006, mida saab seletada petrofüüsikalise meetodi suure tundlikkusega.



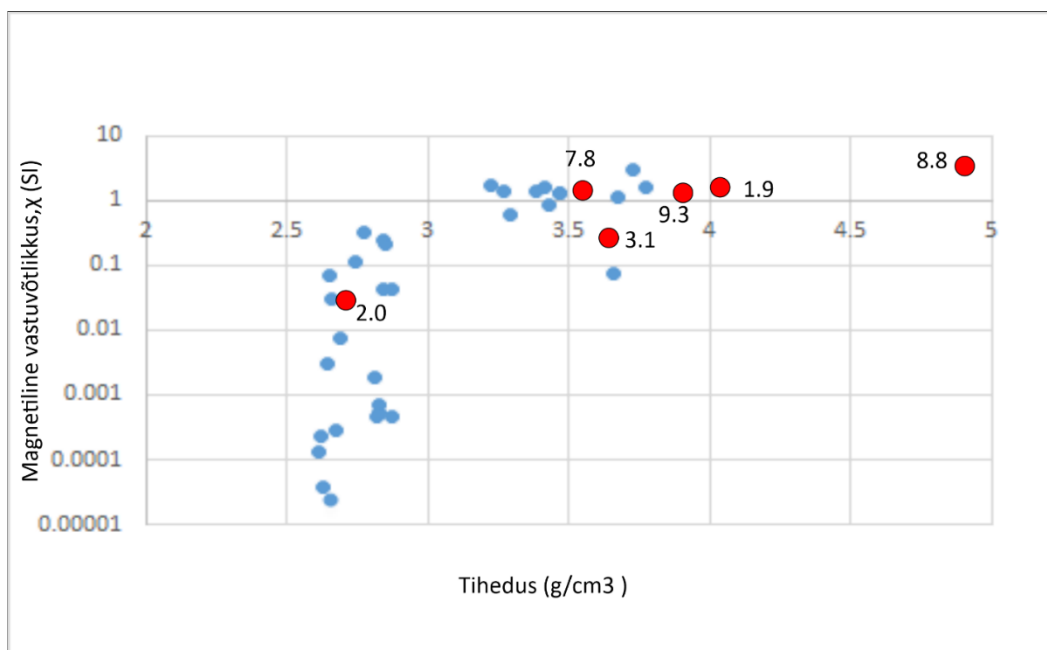
Joonis 10. Näiva magnetilise vastuvõtlikkuse sõltuvus magnetiidi sisaldusest. Punasega on märgitud pürroitiini sisaldavad proovid ning nende pürroitiini sisaldus (vol%).

Jääkmagnetiseerituse väärtus suureneb lineaarselt magnetilise vastuvõtlikkusega (Joonis 11). Pürroitiini sisaldavate kivimite jääkmagnetiseeritus ei eristu magnetiiti sisaldavate kivimite magnetiseeritusest.

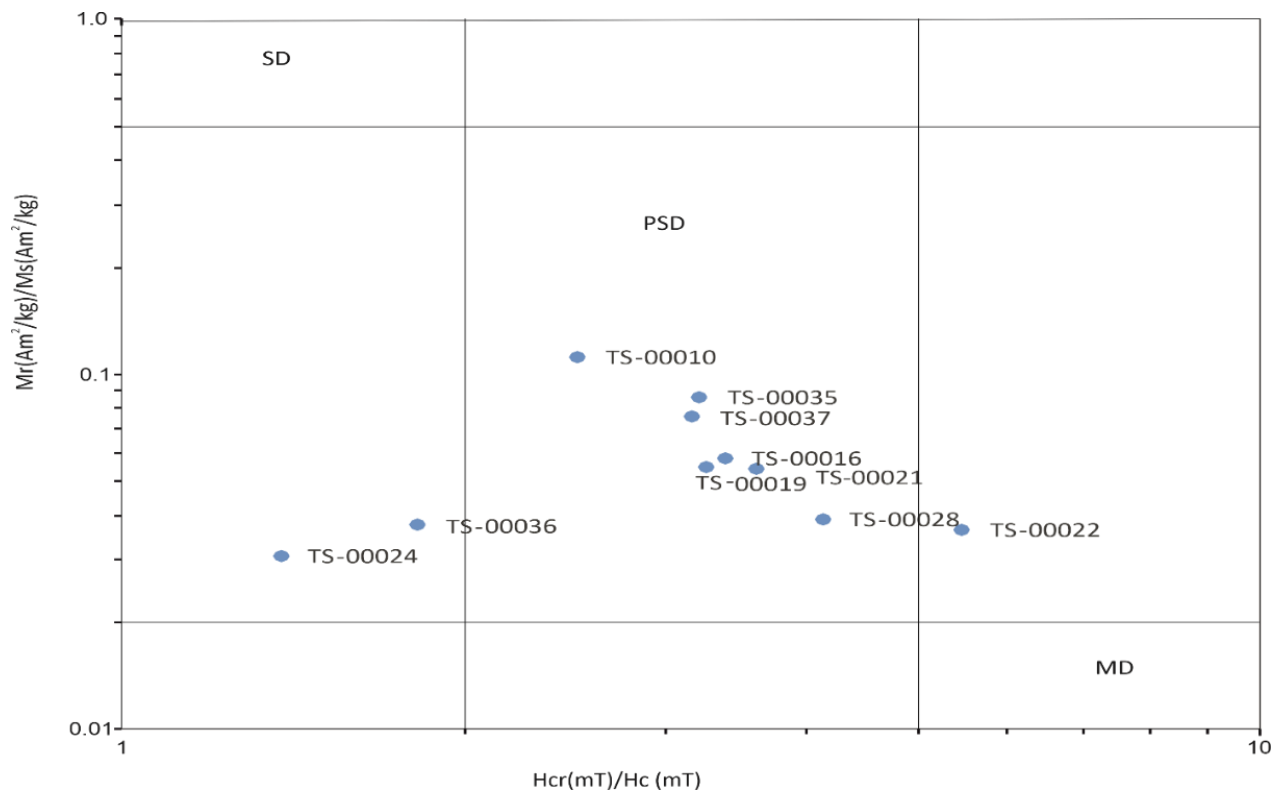
Suure tihedusega kivimites on kõrgem magnetiline vastuvõtlikkus (Joonis 12). Pürroitiini sisaldavad proovid on suurema tihedusega, kui välja arvata proov TS-00006, mille väiksem tihedus tuleb granaadi ja magnetiidi puudumisest ning pürroitiini väikesest sisaldusest (2.0 vol%). Kuna magnetiidi sisaldus ja magnetiline vastuvõtlikkus on omavahel lineaarses seoses, saab väita, et magnetiiti sisaldavad kivimid on suurema tihedusega.



Joonis 11. Jääkmagnetiseerituse (J_{NRM} , A/m) suhe magnetilisse vastuvõtlikkuse (χ_v , SI) .



Joonis 12. Tiheduse ρ (g/cm³) suhe magnetilisse vastuvõtlikkuse (χ_v , SI). Punasega on tähistatud pürroitiini sisaldavad proovid ning nende pürroitiini sisaldus.



Joonis 13. Day diagramm. M_s – küllastusmagnetiseeritus. M_r – jääkmagnetiseeritus. H_c – koertsitiivsus. H_{cr} – jääkmagnetiseerituse koertsitiivsus. SD – ühedomeenne (single domain). PSD – pseudo-üksikdomeenne (pseudo single domain). MD – multidomeenne (multi domain). Diagrammil on esindatud 10 hüstereseesi analüüsi proovi, millel leidsid ferromagnetilised omadused.

Graafikut, mille vertikaalteljel on jääkmagnetiseerituse (M_r ; Am^2/kg) jagatis küllastusmagnetiseeritusega (M_s ; Am^2/kg) ning horisontaalteljel jääkmagnetiseerituse koertsitiivsuse (H_{cr} ; mT) jagatis kogumagnetiseerituse koertsitiivsusega (H_c ; mT), nimetatakse Day diagrammiks (Day et al., 1977). Sellist graafikut kasutatakse, kui magnetiit on kivimi põhimineraal.

Dunlop arendas Day diagrammi, kasutades mitmeid eksperimentaalseid katseid eridomeensete magnetiidi prooviga. Katsete tulemusel muutis ta osakeste suurusvahemikke määramaks tera suuruseid. Ühedomeensetel osakestel on M_r/M_s suhe $\geq 0,5$ (vahemik jäi Dunlopi poolt muutmata) ja see suureneb, kui osakesed on mitme või multidomeensed, $H_{cr}/H_c \leq 2$ (varasemalt 1,5) (Dunlop ja Özdemir, 1997). Multidomeensetel osakestel on M_r/M_s suhe $\leq 0,02$, $H_{cr}/H_c \geq 5,0$ (varasemalt vastavalt 0,05 ja 4,8). M_r/M_s suhe, mis on $>0,02$ ja $<0,5$ ning $H_{cr}/H_c >2$ ja $<5,0$, viitab pseudo-üksikdomeensetele magnetiidi osakestele (Evans, M. ja Heller, F. 2003).

Néel-i teooria järgi (Néel, 1955) säilitab termalselt aktiveeritud SD osake mineraali kristallisatsioonigaegse magnetvälja kuni 4 miljardit aastat, muutudes ebastabiilseks vaid kõrgetel temperatuuridel. 1970ndatel ja 1980ndatel avastati, et suur osa magnetiidi osakesi ei ole uniformsed, vaid on suuremad, mõõtudega 80-1000 nm ($SD < 80 \text{ nm}$, $MD \geq 1 \mu\text{m}$). Selliste osakeste kohta tekkis termin PSD (pseudo-üksikdomeenne). Kuna laboris ei ole olnud võimalik PSD osakeste stabiilsust kindlaks teha, ei saa seda kasutada paleomagnetismi uurimisel (Nagy et al., 2007).

Joonisel 13 on kokku 10ne magnetiidirikka proovi tulemuste Day diagramm (kokku on proove 12, kuid TS-00002 ja TS-00006 on paramagnetilised). Proovid TS-00010, TS-00016, TS-00019, TS-00021, TS-00028, TS-00035, TS-00036 ja TS-00037 asuvad graafiku keskel, mis näitab nende pseudo-üksikdomeensust, ehk osakeste suurust vahemikus 80-1000 nm. TS-00022 asub küll väljaspool PSD määratud alalt, kuid seda saab siiski teiste osakestega ühiseks grupiks nimetada. Jääb selgusetuks, miks proov TS-00024 ja proov TS-00036 diagrammile ei sobitu.

Nirgi *et al.* (2002) aruandes petrofüüsikalisi omadusi kirjeldades selgub, et suurema tihedusega proovid sisaldavad rohkem raudoksiide ja sulfiide ning magnetilise vastuvõtlikkuse uuringud näitavad magnetiidi ja pürroitiini olemasolu, mis vastab ka antud töös käsitletud petrofüüsikaliste uuringute tulemustele.

Kokkuvõte

Käesolevas bakalaureusetöös käsitletakse kahe Jõhvi puuraugu (PA-1 ja PA-2) füüsikalisi omadusi. Töö käigus mõõdeti kiviproovide näivtihedust, magnetist vastuvõtlikkust, jääkmagnetiseeritust ning magnetväljasõltuvust temperatuurist ja välise välja tugevusest (hüstereesis).

Töö tulemusel selgus, et peamine magnetiseerituse põhjustaja on magnetiit. Pürroitiini magnetiseeritus ei eristu magnetiidist. Erinevalt XRD meetodil saadud magnetiidi sisaldustest leidis petrofüüsikaliste meetodite alusel vähesel määral magnetiiti ka proovides TS-00002 ja TS-00006. Valdavalt olid kõrgema magnetiseerituse väärtusega kivid suurema tihendusega. Proovides on kõrge jääkmagnetiseerituse väärtus, mis ületab indutseeritud magnetiseeritust magnetiitgneisside puhul keskel läbi 6,4 kordselt, mille põhjustajaks on pseudo-ühedomeensete magnetiiditerade esinemine (PSD). Valdav osa Jõhvi magnetanomaaliast on põhjustatud maakide jääkmagnetiseerituse poolt.

Summary

This bachelor's thesis addresses the physical properties of two drill-cores in Jöhvi (PA-1 and PA-2). The aim was to measure petrophysical properties - density, magnetic susceptibility, remanent magnetization and magnetic dependence of temperature and external field strength (hysteresis).

The results prove that the main cause of magnetization is magnetite. The magnetization of pyrrhotite is indistinguishable from that of magnetite. In contrast to the magnetite contents obtained by the XRD method, a small amount of magnetite was also found in samples TS-00002 and TS-00006 by petrophysical methods. Samples with a higher magnetization value had predominantly higher density. The samples have a high remanence magnetization value, which exceeds the induced magnetization in magnetite gneisses by an average of 6.4 times, due to the presence of pseudo-single-domain magnetite grains (PSD). Most of the magnetic anomaly in Jöhvi is caused by the residual magnetization of the ores.

Kasutatud kirjandus

Sundblad, K., Salin, E., Claesson, S., Gyllencreutz, R., & Billström, K. (2021). The Precambrian of Gotland, a key for understanding the Proterozoic evolution in southern Fennoscandia. *Precambrian Research*, 363. <https://doi-org.ezproxy.utlib.ut.ee/10.1016/j.precamres.2021.106321>.

Soesoo, A., Nirgi, S., & Plado, J. (2020). The evolution of the Estonian precambrian basement: geological, geophysocal and geochronological cinstriants. *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.17076/geo1185>, 19.

Dmitrijeva, M., Plado., Oja., 2018. The Luusika potential field anomaly, eastern Estonia: modelling results, *Estonian Journal of Earth Sciences*, 4, 228–237.

Linari, A. A. 1940. Aruane sügavpuurimistest Jõhvi lähedal. Tallinna Tehnikaülikooli Toimetused, Ser. A, No. 15, 27 pp.

Plado, J. Kiik. K. Jokinen, J. Soesoo, A. 2020. Magnetic anomaly of the Jõhvi iron ore, northeastern Estonia, controlled by subvertical remanent magnetization. <https://doi.org/10.3176/earth.2020.13>. 189-191.

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

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. 1990. Applied Geophysics Second Edition, 15

www.minerals.net. Vaadatud 27.05.2022

Rundqvist, D. V. & Mitrofanov, F. P. (eds). 1993. Precambrian geology of the USSR. Developments in Precambrian Geology, 9, 1–527.

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 <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.03.008>. 464-474.

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.

Arblaster, J. (2013) Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59536-2.00005-2>.

Evans, M., Heller, F. (2003). Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics, Inta. Geophys. Ser. 13-20.

Day, R., Fuller, M. & Schmidt, V. 1977: Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional depence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 13, 260–267.

Dunlop, D.J. and Özdemir, Ö. (1997) Rock Magnetism Fundamentals and Frontiers. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>. 320.

Néel, L., Some theoretical aspects of rock-magnetism. *Adv Phys* 4, 191–243 (1955)

Nagy, L., Williams, W., Muxworthy, A.R. Stability of equidimensional pseudo–single-domain magnetite over billion-year timescales. <https://doi.org/10.1073/pnas.1708344114>

Tänuavaldus

Töö autor tänab väga oma juhendajat Jüri Plado põhjaliku tagasiside ja abi eest.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Tiina Harak

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **Jõhvi magnetiitkvartsiitide füüsikalised omadused**,

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'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

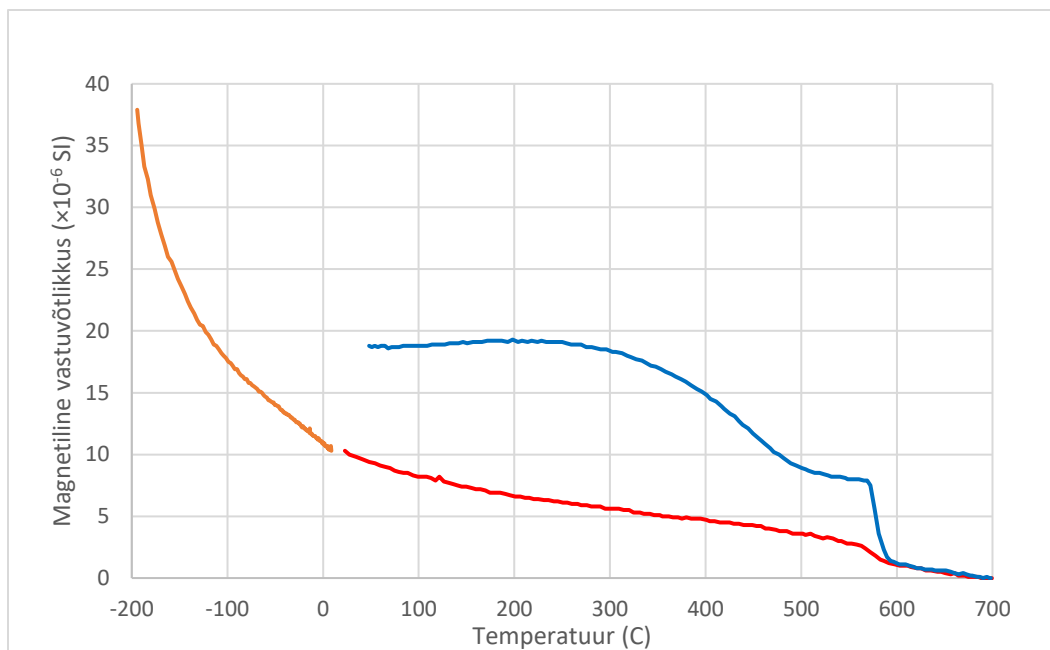
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

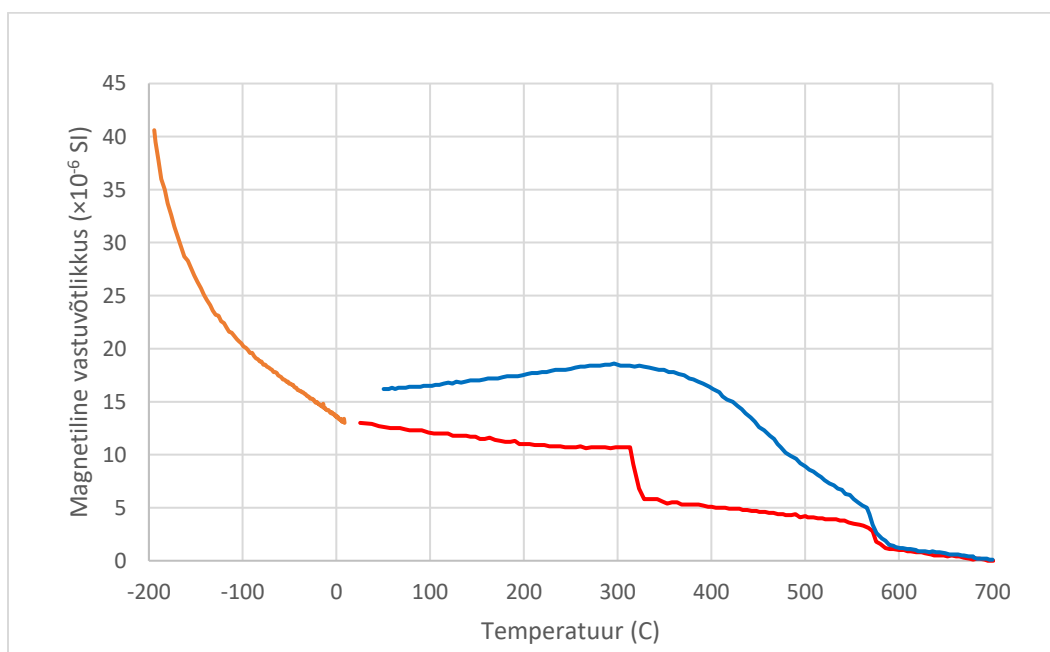
Tiina Harak

27.05.2022

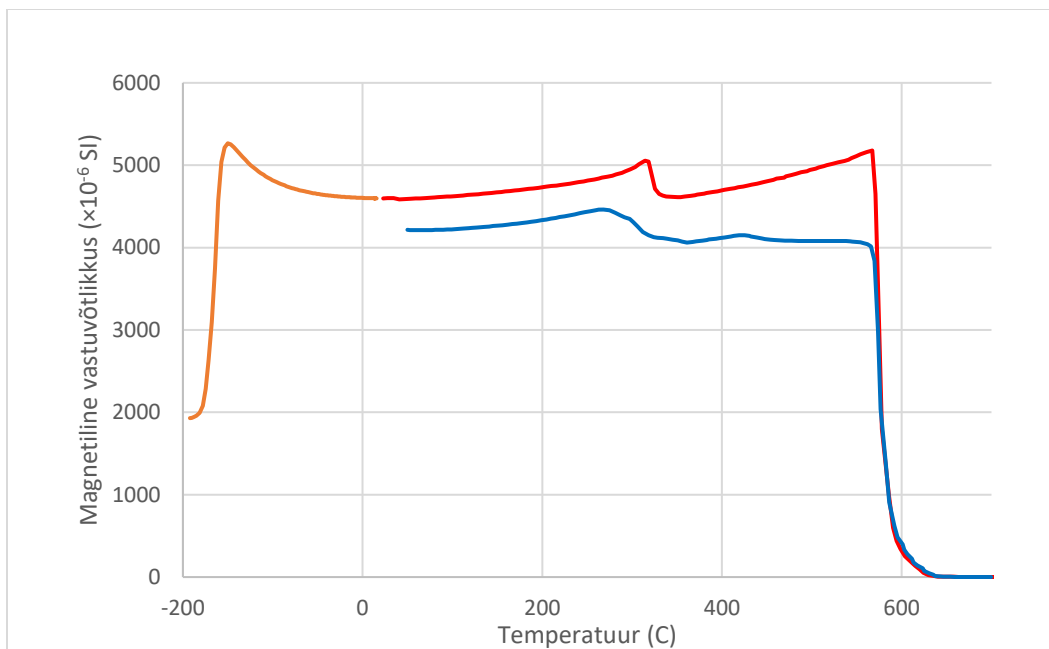
LISA 1. Magnetilise vastuvõtlikkuse sõltuvus temperatuurist



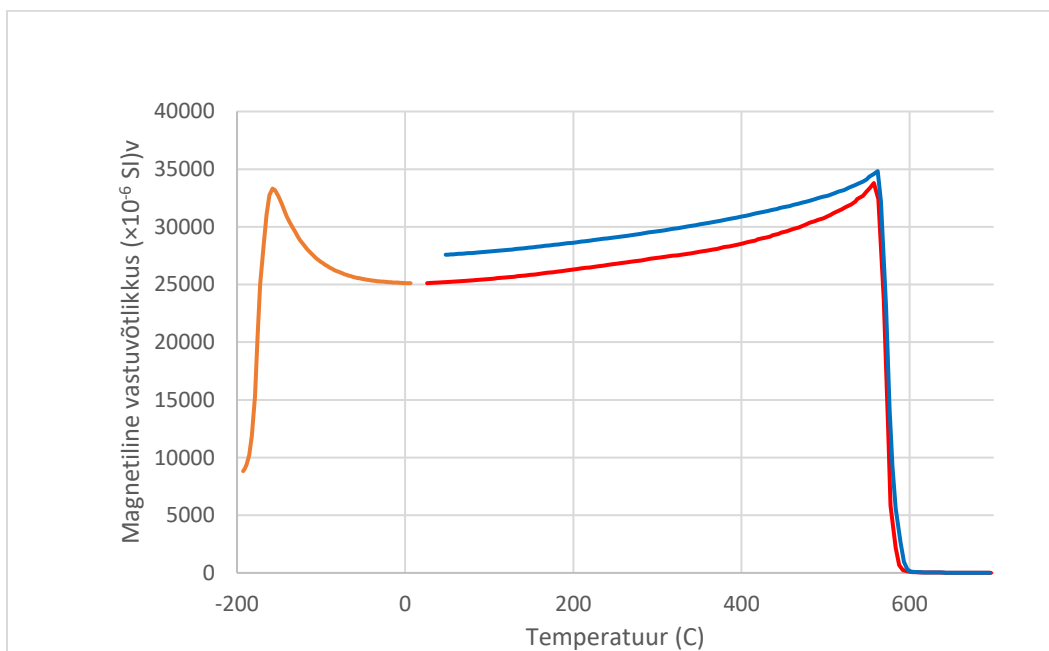
Joonis 14. Jõhvi PA-2 proov TS-00002. Kollane värv markeerib külmutamist, punane soojenemist ja sinine jahtumist.



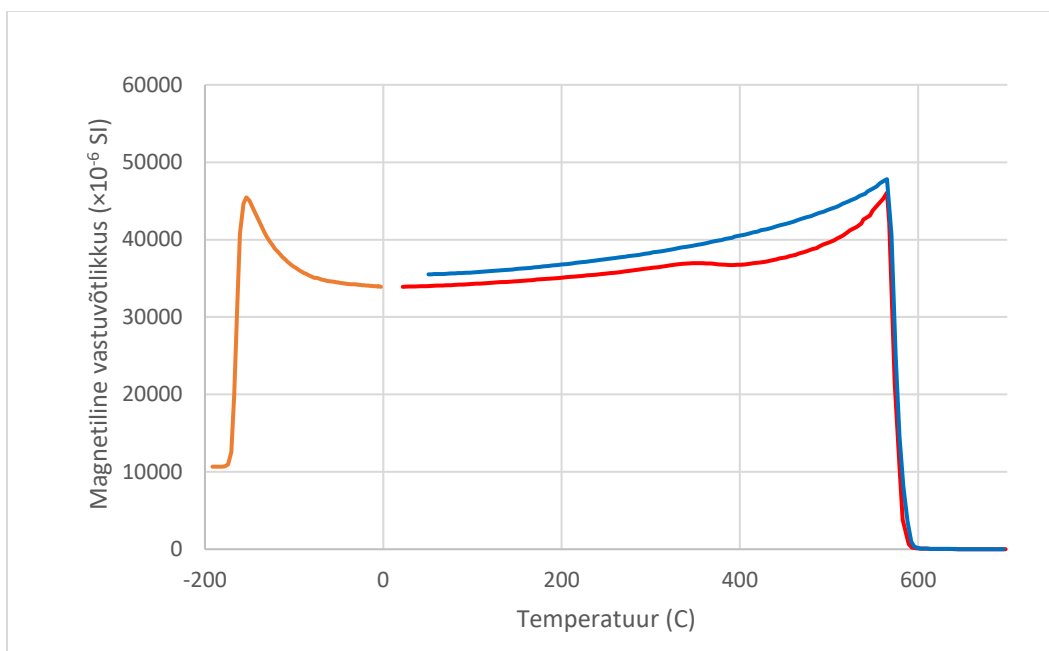
Joonis 15. Jõhvi PA-2 proov TS-00006. Kollane värv markeerib külmutamist, punane soojenemist ja sinine jahtumist.



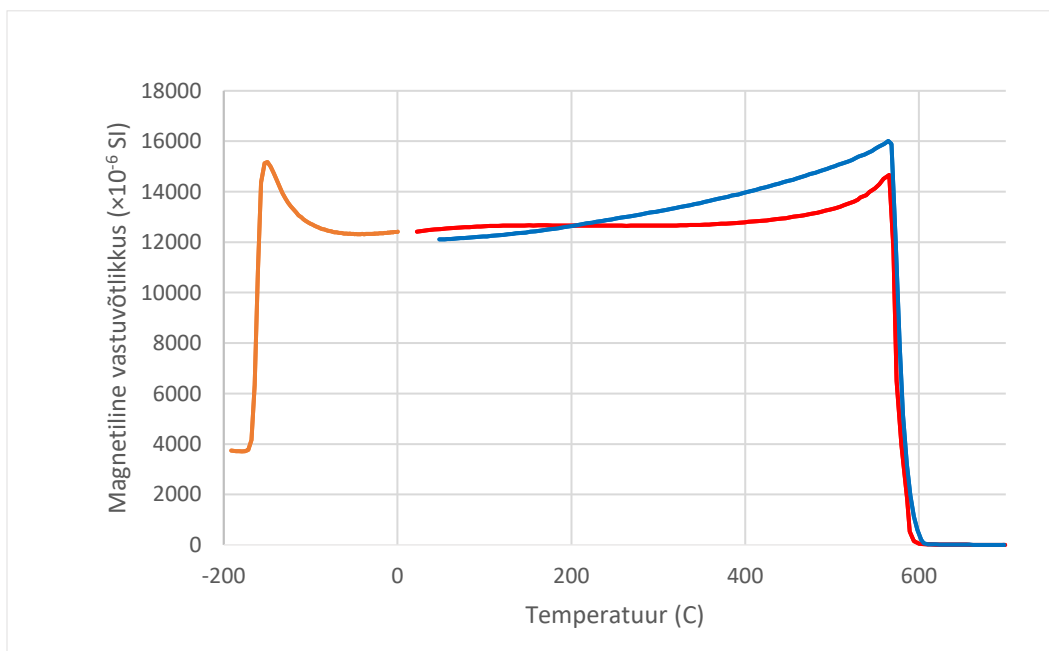
Joonis 16. Jõhvi PA-2 proov TS-00010. Kollane värv markeerib külmutamist, punane soojenemist ja sinine jahtumist.



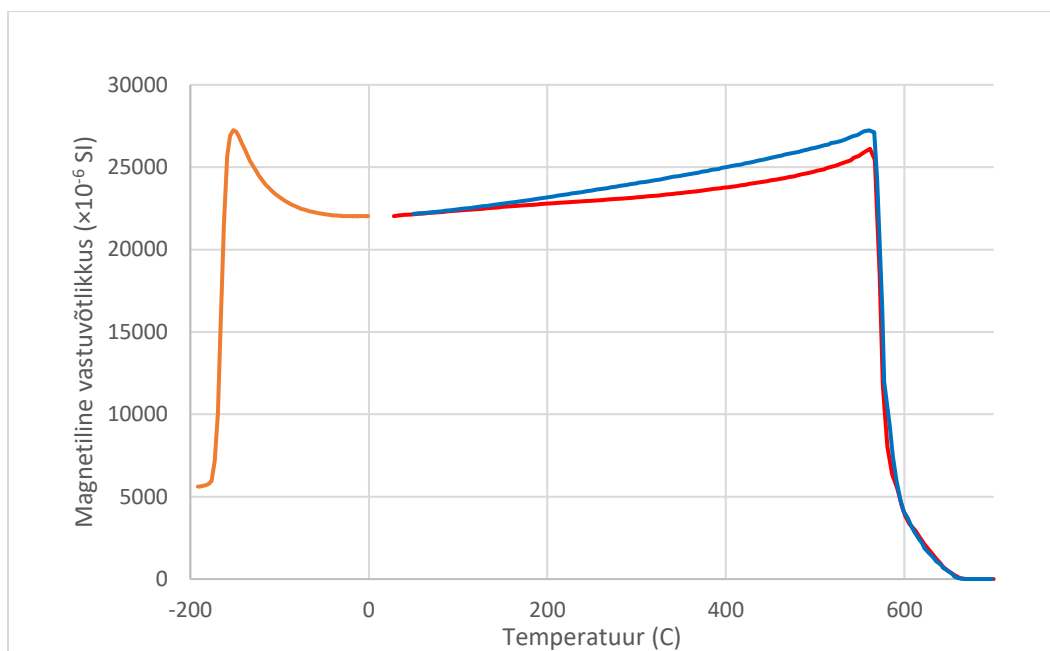
Joonis 17. Jõhvi PA-2 proov TS-00016. Kollane värv markeerib külmutamist, punane soojenemist ja sinine jahtumist.



Joonis 18. Jõhvi PA-2 proov TS-00019. Kollane värv markeerib külmutamist, punane soojenemist ja sinine jahtumist.



Joonis 19. Jõhvi PA-2 proov TS-00024. Kollane värv markeerib külmutamist, punane soojenemist ja sinine jahtumist.



Joonis 20. Jõhvi PA-1 proov TS-00028. Kollane värv markeerib külmutamist, punane soojenemist ja sinine jahtumist.