

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

Magistritöö geoloogias (30 EAP)  
**Mustanina magnetanomaalia maalt ja õhust**  
Martin Riives

Juhendajad:  
Jüri Plado  
Marko Kohv

Tartu 2025

## **Mustanina magnetanomaalia maalt ja õhust**

Käesolevas magistritöös uuriti Mustanina (idapoolseim Jõhvi anomaaliate reas) magnetanomaaliat, eesmärgiga võrrelda kolmel erineval viisil (riiklik aero, drooni ja maapealne) saadud magnetomeetrist andmestikku ja hinnata drooni-magnetomeetrist ja maapealse mõõdistusega saadud andmete kvaliteeti. Teiseks eesmärgiks oli modelleerida anomaaliat põhjustavat keha ning tulemuste põhjal arutleda keha olemuse üle. Välitöödelt saadud andmed korregeeriti ööpäevaste variatsioonide suhtes ning interpoleeriti QGIS tarkvara abil. Kasutades droonimagnetomeetri andmeid, modelleeriti anomaaliat põhjustavat geoloogilist keha tarkvara *Potent* abil. Tulemused näitasid, et anomaalia amplituud on suurim maapealsete mõõtmiste alusel, samas kui drooniandmed pakkusid paremat ruumilist katvust. Aeromagnetiliste andmete katvus on kõige suurem, kuid anomaalia amplituud kõige väiksem. Modelleerimise ning analoogia tulemusel leiti, et anomaaliat põhjustab tõenäoliselt magnetiit, mille sisaldus magnetiitkvartsiidis peab olema vähemalt 3 %.

Märksõnad: Magnetanomaalia, Mustanina, magnetomeetria, modelleerimine, magnetiitkvartsiit

CERCS kood: P500 geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia

## **Mustanina magnetic anomaly from land and air**

In this master's thesis, the Mustanina magnetic anomaly was investigated with the aim of comparing magnetometric datasets obtained in three different ways and evaluating the quality of data obtained from drone magnetometry and ground-based surveying. Also, using the drone magnetometry dataset, the anomaly-causing body was characterized. Field data were corrected for diurnal variations and interpolated in QGIS. The anomaly-causing body was modeled using the drone magnetometry data in *Potent* software. The results showed that the ground-based data yielded a larger maximum anomaly amplitude, while the drone data offered better spatial coverage. The aeromagnetic data had the widest coverage, but the amplitude of the anomaly is the smallest. As a result of the modeling, it was discussed that the anomaly-causing body might be magnetitite, the content of which in magnetite quartzite must be at least 3 %.

Keywords: Magnetic anomaly, Mustanina, magnetometry, modelling, magnetite quartzite

CERCS code: P500 geophysics, physical oceanography, meteorology

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b> .....	4
<b>1. Eesti geoloogiline ehitus ja geofüüsikalised anomaaliad</b> .....	5
1.1. Viimase aastakümne jooksul uuritud magnetanomaaliad Eestis .....	6
<b>2. Materjalid ja meetodika</b> .....	8
2.1. Uuringuala kirjeldus.....	8
2.2. Töös kasutatud magnetomeetrid ja droon .....	9
2.3. Aeromagnetiline andmestik .....	10
2.4. Magnetomeetiline kaardistamine.....	10
2.5. Andmete töötlemine, interpreteerimine .....	11
2.6. Anomaaliat põhjustava keha sügavuse hinnangud, modelleerimine.....	12
<b>3. Tulemused</b> .....	14
3.1. Baasjaama lugemid .....	14
3.2. Mustanina magnetvälja anomaalia mõõdetuna maalt ja õhust .....	14
3.3. Regionaalne väli.....	19
3.4. Sügavuse hinnangud ja modelleerimistulemused .....	19
<b>4. Arutelu</b> .....	24
4.1. Erinevused kolme andmebaasi vahel .....	24
4.2. Mustanina anomaaliat põhjustava geoloogilise keha olemus. ....	25
<b>Kokkuvõte</b> .....	27
<b>Mustanina magnetic anomaly from land and air</b> .....	28
<b>Tänuavaldused</b> .....	29
<b>Kasutatud kirjandus</b> .....	30

# Sissejuhatus

Geofüüsika on teadus, mis kasutab jõuväljade mõõtmisel põhinevaid tehnikaid, et kaudselt saada informatsiooni maakoore omaduste ja selles toimuvate protsesside kohta. Geofüüsikalised meetodid tulevad eriti kasuks kohtades kus otsene ligipääs on raskendatud. Eelistatakse meetodeid, mis on kiired ja kulutõhusad (Hinze *et al.*, 2013; Sharma, 1986), üheks selliseks meetodiks on magnetomeetria.

Magnetomeetria, tuntud ka kui "magnetiline meetod", on üks vanimaid ja enim kasutatud geofüüsikalisi meetodeid aluskorra uurimiseks. See hõlmab Maa magnetvälja varieeruvuse mõõtmist, mis on põhjustatud aluskorras esinevate kivimite magnetiliste omaduste poolt. Need varieeruvused, mida tuntakse magnetiliste anomaaliatena, annavad olulist teavet geoloogiliste struktuuride ja potentsiaalsete maardlate kohta (Nabighian *et al.*, 2005). Meetod on väärtuslik mitmesugustes rakendustes, alates süvauuringutest kuni pinnalähedaste struktuuride uuringuteni (Hinze *et al.*, 2013). Meetodi teeb veel eriliseks selle lai kasutusala, mis on leidnud kasutust nafta, mineraalide ja gaasi otsingutel, impakstruktuuride kaardistamisel, insener- ja keskkonnauuringutes (Nabighian *et al.*, 2005; Hinze *et al.*, 2013).

Üks silmapaistvamaid magnetanomaaliaid Eestis on Jõhvi magnetanomaalia, mille läänepoolseim osa on seotud magnetiitkvartsiidi mineralisatsiooniga ning mida on ka puurandmetega kinnitatud. Tegemist on tugeva ja selgelt eristuva anomaaliaga, mille maksimaalne intensiivsus maapinnalt mõõdetuna ületab 19 000 nT ning mis on oluliseks näiteks tugevast jääkmagnetiseeritusest tingitud anomaaliate kohta. (Plado *et al.*, 2020)

Käesoleva magistritöö raames teostati magnetomeetrilist kaardistamist maa peal ning õhust drooniga, eesmärgiga võrrelda kolmel erineval viisil (drooniga ja maapealne kaardistus, varasem aerogeofüüsikaline) saadud magnetomeetrilist andmestikku ja hinnata andmete kvaliteeti. Teiseks, modelleerida anomaaliat põhjustavat keha ning tulemuste ja analoogia (Jõhvi magnetanomaalia) põhjal arutleda keha olemuse üle.

# 1. Eesti geoloogiline ehitus ja geofüüsikalised anomaaliad

Eesti kristalse aluskorra võib jagada kaheks : Põhja-Eesti amfiboliidseks ja Lõuna-Eesti granuliitseks kompleksiks (Soesoo *et al.*, 2004; Puura & Flodén, 1996). Geoloogiliste ja geofüüsikaliste uuringute alusel jaguneb aluskord omakorda kuueks petroloogilis-struktuurseks vööndiks (Joonis 1): Tallinna, Tapa, Alutaguse, Lääne-Eesti, Lõuna-Eesti ja Jõhvi vööndiks (Soesoo *et al.*, 2004; Puura *et al.*, 1983). Vööndid erinevad üksteisest kivimilisest koostisest, seda eelkõige metasedimentide või metavulkaniitide osakaalult, aga ka moondeastme ja petrofüüsikaliste omaduste poolest, väljendudes gravitatsiooni- ja magnetvälja iseärasustes (Soesoo *et al.*, 2004; Koppelmaa, 2002).

Tallinna vööndit iseloomustavad nõrgad gravitatsiooni- ja magnetväljad, moodustades nõrkasid joonelisi loode-kagu suunalisi anomaaliaid. Kivimid on varieeruvad, koosnedes metavulkaniitidest ja metasedimentidest, mida esindavad amfiboolgneisid, biotiit-plagioklassgneisid, kvarts-päevakivigneisid, vilgugneisid ning vähesel määral ka magnetiitkvartsiiti ja sulfiid-grafiitgneisse. Tallinna vööndi kivimid on kujunenud amfiboliidifaatsiese tingimustes. (Soesoo *et al.*, 2004; Koppelmaa, 2002)

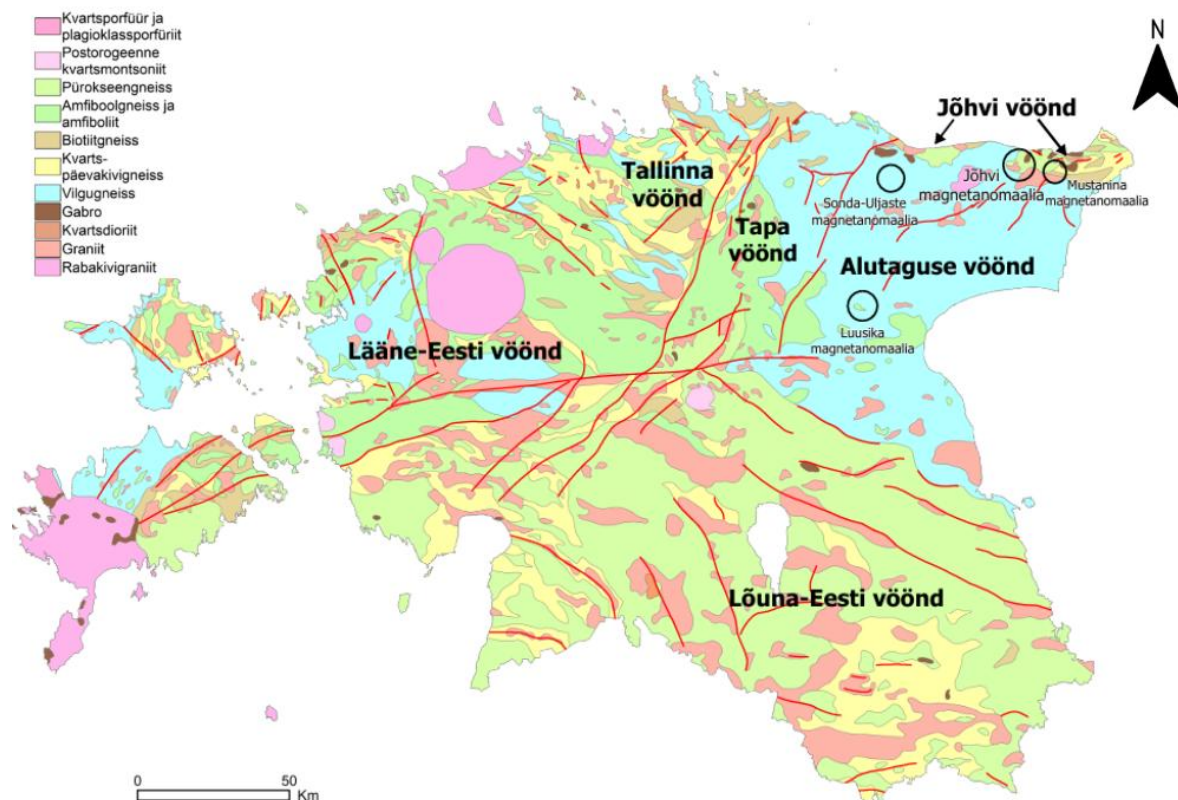
Tapa vööndile on iseloomulik positiivsed gravitatsiooni- ja magnetanomaaliad. Selles esineb amfiboliiti, amfiboolgneisse, mille moondeastmed viitavad amfiboliidi ja granuliidifaatsiesele ning vähem levinud on biotiit-plagioklassgneisid. (Soesoo *et al.*, 2020; Soesoo *et al.*, 2004; Koppelmaa, 2002)

Alutaguse vööndile on omane madal gravitatsiooni- ja magnetväli. Põhilised kivimitüübid on alumiiniumirikkad gneisid koos biotiidi, kordieriidi, granaadi ja sillimaniidiga ning biotiit-plagioklassgneisse. Väiksemal määral ka kvarts-päevakivigneisse. Alutaguse vööndi kivimid on tekkinud amfiboliidifaatsiese tingimustes. (Soesoo *et al.*, 2020; Koppelmaa, 2002)

Lääne-Eesti vööndile, eriti selle idaosale, on omased tugevad joonelised magnetanomaaliad, mis on suunatud valdavalt loode-kagu või kirde-edela suunas. Piirkonnas esinevad ka suured positiivsed gravitatsioonianomaaliad (Koppelmaa, 2002). Lääne-Eesti vöönd koosneb peamiselt metasedimentidest, sealhulgas amfiboliitidest, biotiit-plagioklassgneissidest ja kvarts-päevakivigneissidest, mille moondeastmed ulatuvad amfiboliidi- kuni granuliidifaatsiesteni (Soesoo *et al.*, 2020; Puura & Flodén, 1996; Koppelmaa, 2002).

Lõuna-Eesti vööndi põhjaosa kuulub laiaulatuslikku gravimagnetilisse anomaaliavööndisse, mis ulatub üle Põhja-Läti lõuna poole. Magnetanomaaliad on tugevalt diferentseerunud, joonelised ja peamiselt lääne–ida või loode suunaga (Koppelmaa, 2002). Vööndis domineerivad granuliidifaatsiese moondega vulkaanilised kivimid, amfibool-pürokseengneisid ning kvarts-päevakivigneisid. (Soesoo *et al.*, 2020; Puura & Flodén, 1996; Koppelmaa, 2002)

Jõhvi vööndile on iseloomulik tugev magnetväli, mille anomaaliad on ida-lääne suunalised. Vööndis esineb pürokseengneissi, kvarts-päevakivigneisse, vilgugneissi ning magnetiitkvartsiiti, keskmiste magnetiliste vastuvõtlikuste väärtustega vastavalt 0,0039, 0,00063, 0,0606 ja 0,474 SI. Magnetitiitkvartsiidid on seotud ka tugevate magnetanomaaliatega. Jõhvi vööndi kivimid on üldjuhul tekkinud granuliidifaatsiese metamorfismi tingimustes. (Soesoo *et al.*, 2004, 2020; Koppelmaa, 2002).



**Joonis 1.** Geoloogiline kaart Eesti kristalsest aluskorrast (Koppelmaa, 2002).

1.1. Viimase aastakümne jooksul uuritud magnetanomaaliad Eestis  
 Eesti mastaapsemaks anomaaliaks on Jõhvi magnetanomaalia, mida hiljuti uuris Plado *et al.*(2020). Uuringu käigus selgus, et kolme suure amplituudiga anomaaliatega (läänanomaalia 19

290 nT, idaanomaalia 15 880 nT ning põhjaanomaalia 8080 nT) peamiseks põhjustajaks on subvertikaalse suunaga tugev jääkmagnetiseeritus. Petrofüüsikalistel mõõtmistel saadi Jõhvi 1 puuraugus magnetiitkvartsiitidel keskmiseks magnetiliseks vastuvõtlikuseks 1,076 SI, jääkmagnetiseerituseks (NRM- *natural remanent magnetization*) 597,9 A/m ning Koenigsbergeri suhteks (Q) 13,9. Graniitsetel pegmatiitidel vastavalt  $\chi$  0,024 SI, NRM 9,5 A/m ning Q 4,8. Jõhvi 2 puuraugus magnetiitgneissidel  $\chi$  0,691 SI, NRM 393,1 A/m ning Q 11,0. Graniitsetel pegmatiitidel  $\chi$  0,001 SI, NRM 0,4 A/m ning Q 8,4. Gneissidel saadi  $\chi$  0,14 SI, NRM 55,8 A/m ja Q 9,1. Järeldati, et magnetiitkvartsiitidel on suur subvertikaalne jääkmagnetiseeritus, viidates sellele, et anomaaliat põhjustab pigem magnetiidi väike terasuurus (<1  $\mu\text{m}$ ) mitte selle kogus.

Põhjalikumalt on uuritud veel ka Sonda-Ujaste magnetanomaaliat (Krull, 2021) ja Luusika magnetanomaaliat (Dmitrijeva, 2015). Sonda-Uljaste uuringus uuriti puursüdamikust F188 võetud proovide füüsikalisi ja termomagnetilisi omadusi. Puuraugus esineb graniiti ( $\chi$  0,0186 SI, Jr 205,9 A/m, Q 236), kvartsiiti ( $\chi$  0,0028 SI, Jr 23,5 A/m, Q 171,4), alumogneissi ( $\chi$  0,067 SI, Jr 923,5 A/m, Q 318,5) ja pürokseniiti ( $\chi$  0,0746 SI, Jr 814,7 A/m, Q 250,3). Selgus, et kivimitel on ülisuur Koenigsbergeri suhe, tähendades, et anomaaliate kuju sõltub jääkmagnetiseerituse suunast. Kõrge jääkmagnetiseeritus seostati pürroitiini esinemisega. Luusika piirkonna magnetanomaalia modelleerimisel saadi keha magnetilise vastuvõtlikkuse väärtusteks ( $\chi$ ) 0,02–0,056 SI, millest järeldati, et need vastavad intrusioonidele nagu Taadikvere, Virtsu, Abja ja Sigula, mõõdetud omadustele, viidates nendele kui võimalikule magnetanomaalia allikale.

## 2. Materjalid ja metoodika

### 2.1. Uuringuala kirjeldus

Välitööd toimusid Ida-Viru maakonnas, Narva-Jõesuu linnas, Mustanina ja Sõtke külas. Uuringuala (Joonis 2) valiti Mustanina piirkonnas esineva aeromagnetilise anomaalia (maksimaalse amplituudiga 900 nT) põhjal. Uuringuala (piiritletud koordinaatidega 6585999-6581999, 715399-711399; L-EST 97) keskelt kulgeb Müdiküla-Sirgala tee ning loodes Sillamäe-Viivikonna tee. 6 km põhjapoole jääb Sillamäe linn, 4 km lõunasse Sirgala harjutusväli ning 10 km loodes Jõhvi magnetanomaalia. Lähim puurauk F8 (Erisalu & Arvisto, 1969), mille kohta on olemas andmed ka aluskorra kohta, paikneb Mustanina anomaalia keskmest umbes 3,3 km loodes.



**Joonis 2.** Uuringuala, tähistatud punaste joontega, aeromagnetiliste isojoonte ja Maa-ameti (2025) halltoonides kaardi taustal.

## 2.2. Töös kasutatud magnetomeetrid ja droon

Magistritöö raames kasutati kolme magnetomeetrit, millest maapealsetel mõõdistustel kasutati kahte protonpretsessioon-magnetomeetrit G-856 ja G-857 (Geometrics, Inc.; Joonis 3). Drooniga õhust mõõtmisel kasutati magnetomeetrit MagDrone R3 (Joonis 4), mis on varustatud kahe kolmeteljelise magnetilise küllastatuse anduriga (ferrosondiga) ning sisse ehitatud GPS-ga U Blox PAM-7Q (SENSYS Magnetometers & Survey Solutions, Ltd.). Magnetomeetrit lennutavaks drooniks oli DJI Matrice 300 RTK (DJI, Ltd.; Joonis 5).



**Joonis 3.** Magnetomeeter G-857. (Geometrics, n.d.).



**Joonis 4.** Töös kasutatud magnetomeeter MagDrone R3. (Foto: SENSYS Magnetometers & Survey Solutions; n.d.)



**Joonis 5.** Töös kasutatud droon koos magnetomeetriga MagDrone R3. (Foto: Martin Riives).

### 2.3. Aeromagnetiline andmestik

Aeromagnetiline kaardistamine toimus aastatel 1987-1991 mõõtkavas 1:50000 ja 1:25000, lennati 300 meetri kõrguselt lennuprofiilide vahemaaga 500 meetrit (Melitskaya & Papko, 1992). Töös kasutatud aeromagnetiline andmestik (andmepunktid sammuga 20-30 m) saadi Eesti Geoloogiateenistuse vanemgeoloogilt Mikhail Shtokalenkolt. Saadud andmestikku kasutati interpoleerimisel, selleks et andmestikke omavahel võrrelda.

### 2.4. Magnetomeetriline kaardistamine

Drooniga õhust mõõtmised Mustanina külas toimusid 9. mail ja 1. novembril 2024. Lennud kooskõlastati igakordselt enne välitöid telefoni teel Politsei- ja piirivalveametiga. Lennati ~100 m kõrguselt ning lennuprofiilide vahemaa oli 250 m. Lisaks teostati lennuprofiile läbivaid kontroll-lende, selleks et vaadata kui palju andmed erinevad profiilide ristumiskohtades ja selle järgi hinnata andmete kvaliteeti. Enne välitöid planeeriti juhendaja (Marko Kohv) poolt lennumarsruut kasutades programmi UgCS v5.52. Mõõtmised olid planeeritud ühele päevale, kuid kaardistamise käigus esines piirkonnas GPS-signaali häireid, mis segasid drooni automaatset navigeerimist. Häirete tõttu muutus esialgselt planeeritud marsruudi automaatne läbimine võimatuks. GPS-signaali segamisega seonduvad navigeerimisprobleemid jätkusid 1.

novembril 2024, kuid siis mindi üle drooni käsitsijuhtimisele. Kaardistamisele kulus umbes 8 tundi. Mõõtmistel osalesid Marko Kohv ja töö autor Martin Riives.

Maapealsed magnetvälja mõõtmised viidi läbi 9. mail 2024 ning 3., 4. ja 6., juunil 2024. Kokku kulus umbes 20 tundi. Mõõtmistel osalesid töö autor ja juhendaja Jüri Plado. Juunis toimunud mõõtmistel osalesid ka Tartu Ülikooli geoloogia osakonna magistritudengid Richard Pihel, Krete Roopõld, Joosep Aia, Georg Rahu ja Jane Pelska. Magnetomeetrit (G-857) hoiti mõõtmiste ajal paigal ning mõõtmisi tehti iga ~30 meetri tagant. Magnetomeetritele oli kinnitatud käsi-GPS (Garmin Oregon 600) mõõtmiste automaatseks koordineerimiseks.

Iga välitöö algul paigaldati tööde ajaks fikseeritud positsioonile (6583838, 712366; L-EST 97) baasjaam (G-856) registreerimaks magnetvälja ajalisi variatsioone iga 60 sekundi tagant.

## 2.5. Andmete töötlemine, interpreteerimine

Magnetomeeter MagDrone R3 salvestas mõõteandmed seadme sisemällu, kust need laaditi alla kasutades tarkvara MagDrone DataTool v03.01-01. Andmed saadi CSV formaadis filtreerimata kujul. Andmete filtreerimisel kasutati Tartu Ülikooli geoloogia osakonna kaasprofessori Argo Jõehe poolt loodud algoritmi, mis rakendas andmete keskmistamist viiemeetrise sammu alusel, tagades andmepunktide ühtlase jaotuse. Lisaks rakendati ka filtrit, mis vähendas lühilainelist müra mõõdetud magnetvälja andmetes. Samuti sobitas algoritm andmepunktid ajaliselt kokku baasjaama lugemitega. Filtreeritud droonimagnetomeetri andmestikust eemaldati drooni maandumise ja õhku tõusmise ajal mõõdetud andmepunktid.

Magnetomeetritest saadud algandmed (droonimagnetomeetri puhul filtreeritud andmestik) korrigeeriti parandades need nii mõõtmiste ajal toimunud magnetvälja ajaliste variatsioonide suhtes ning viies erinevatel päevadel toimunud mõõtmised ühele tasemele. Globaalne väli eemaldati kasutades Rahvusvahelist Geomagnetilist Referentsvälja (*IGRF-International Geomagnetic Interference Field*). Andmed korrigeeris Jüri Plado.

Andmete interpoleerimiseks kasutati tarkvara QGIS v3.40.2. Testiti erinevaid meetodeid (*Multilevel B-spline, Ordinary Kriging, Thin Plate Spline*). Selleks võeti enne korrigeeritud andmetest kontrollpunktid, et neid hiljem võrrelda interpoleerimisest saadud andmetega. Valiti meetod, mille puhul olid erinevused tegelike väärtuste ja interpoleeritud väärtuste vahel kõige väiksemad. Nii drooni kui ka aeromagnetiliste andmete korral tulid kõige usaldusväärsemad tulemused kasutades SAGA *Ordinary Kriging* algoritmi, maapealsel mõõdistamisel saadud andmete korral *Multilevel b-spline* algoritmi.

## 2.6. Anomaaliat põhjustava keha sügavuse hinnangud, modelleerimine

Anomaaliat põhjustava keha piiride ja keskpunkti määramisel kasutati gradient amplituudi meetodit (Sharma, 1986), mille käigus arutati magnetvälja intensiivsuse muutus (droonimagnetomeetri andmete põhjal) ühe meetri kohta piki anomaalia keskosa läbivaid profiile (Joonis 6). Profiilid olid suunatud põhja-lõuna (A-A') ja lääne-ida (B-B') suunas. Arvutatud gradientide väärtused olid seotud koordinaatidega, võimaldades hinnata magnetanomaaliat tekitava geoloogilise keha keskpunkti koordinaate ja piire. Piiripunktide koordinaatidega arutati keha laius S-N ja W-E suunal. Saadud keskpunktidest arutati keskmine ning koos keha laiustega kasutati modelleerimisel ning mõlemat muudeti seni kuni arvatud anomaalia sobituks mõõdetud anomaaliaga.

Anomaaliat põhjustava keha sügavuse arvutamisel kasutati anomaalia poollaiuse meetodit (võttes arvesse erinevaid geomeetrilisi kujundeid) ja tipp-null meetodit (Tabel 1). Arvutamisel kasutati droonimagnetomeetri andmestikku ning piki anomaalia keskosa läbivaid profiile A-A' (pikkusega 4320 m) ja B-B' (pikkusega 4116 m).

Tabel 1. Sügavuste arvutamisel kasutatud valemid.

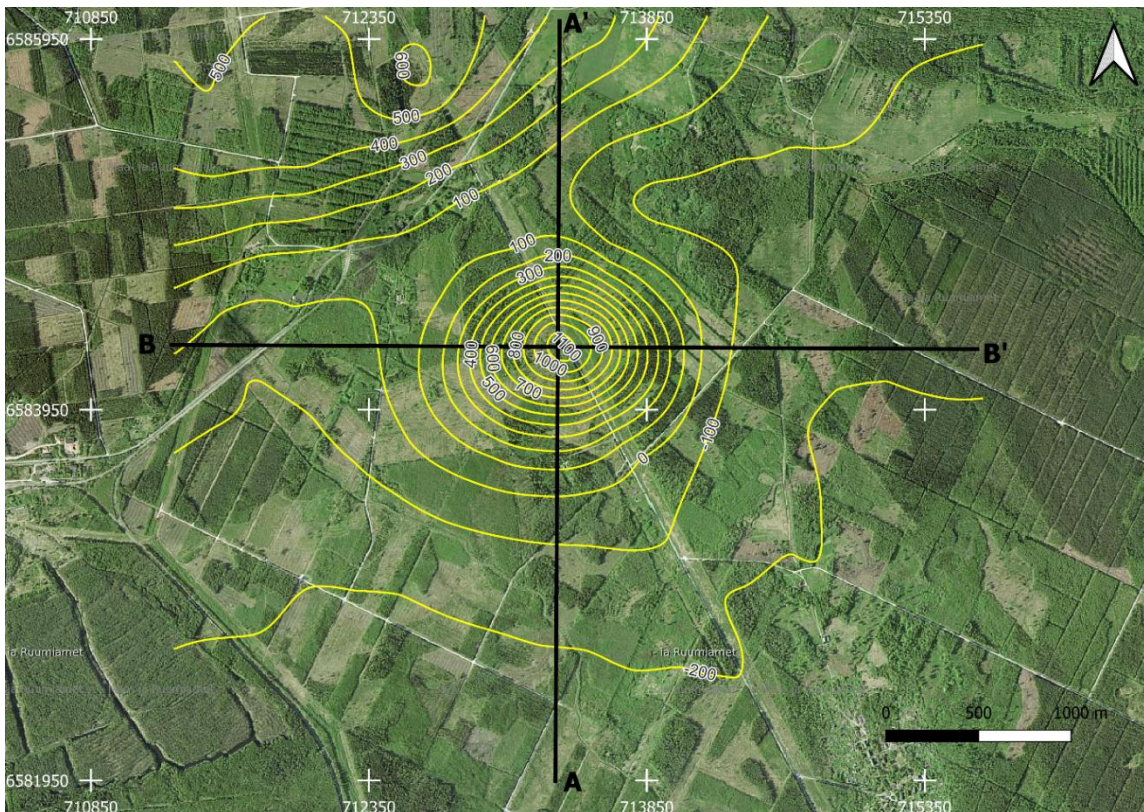
	<b>Keha kuju</b>	<b>Valem</b>
<b>Keha keskpunkti (z) sügavus poollaius meetodiga</b>	Kallutatud elliptiline keha	$z = 0.7x_{1/2}$
	Horisontaalne silinder	$z = x_{1/2}$
	Sfäär	$z = 1.3x_{1/2}$
<b>Keha keskpunkti sügavus tipp-null meetodiga</b>		$z = x_{p0}$

$z$  = keha keskpunkti sügavus;  $x_{1/2}$  = anomaalia laius poole amplituudi juures;  $x_{p0}$  = anomaalia laius selle maksimaalse amplituudi juurest kuni nullini (Sharma, 1986; Telford *et al.*, 1990).

Keha pealispinna sügavuse leidmisel võeti aluseks puuraugus F8 (6585989, 710658; Joonis 2) kirjeldatud kristalse aluskorra väikseim sügavus (250 m; Erisalu & Arvisto, 1969), millele liideti drooni lennukõrgus (~130 m). Saadud sügavust (380 m) kasutati parameetrina modelleerimisel.

Mustanina magnetanomaaliat põhjustava keha modelleerimisel kasutati *Geophysical Software Solutions* poolt loodud tarkvara Potent v4.16.07. Tarkvaraga on võimalik teha 3D mudeleid kasutades lihtsaid geomeetrilisi kujundeid (silinder, ellipsoid, sfäär). Esmalt loodi drooni andmestiku interpoleerimisel saadud rasterkihist ühtlane andmepunktide võrgustik sammuga

25 m. Valiti droonimagnetomeetri andmestik, sest sellega saadi kõige tihedam andmepunktide jaotus üle kogu uuringuala. Seejärel laaditi alla andmestik ning eemaldati regionaalne väli kasutades tööriista *Regional*. Määrati magnetvälja omadused IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) alusel: deklinatsiooninurk  $11^\circ$ , inklinatsiooninurk  $73^\circ$ , magnetvälja tugevus 52589 nT (vastavad 9. maile 2024). Keha kujuks kasutati ellipsikujulise alusega silindrit ning modelleeriti piki profiile A-A' ja B-B' (Joonis 6). Kuna varasemalt ei ole uuritud Mustanina piirkonnas kristalse aluskorra petrofüüsikalisi omadusi, siis tuli modelleerimisel katsetada erinevate Koenigsbergeri suhetega (Q). Koenigsbergeri suhe näitab kui suur osa kivimi kogumagnetiseeritusest on tingitud jääkmagnetiseeritusest (Jr; kivimi tekkeaegne) võrreldes indutseeritud magnetiseeritusega (Ji; ajutine magnetiseeritus Maa praeguses väljas; Sharma, 1986). Iga Koenigsbergeri suhte (0, 1, 5 ja 10) korral muudeti silindri laiust (nii S-N kui W-E suunalist), magnetilist vastuvõtlikust, jääkmagnetiseeritust ja keha pealispinna keskpunkti koordinaate seni kuni arvatatud anomaalia sobituks mõõdetud anomaaliaga. Parameetrid nagu keha pikkus ja pealispinna sügavus olid modelleerimisel fikseeritud.

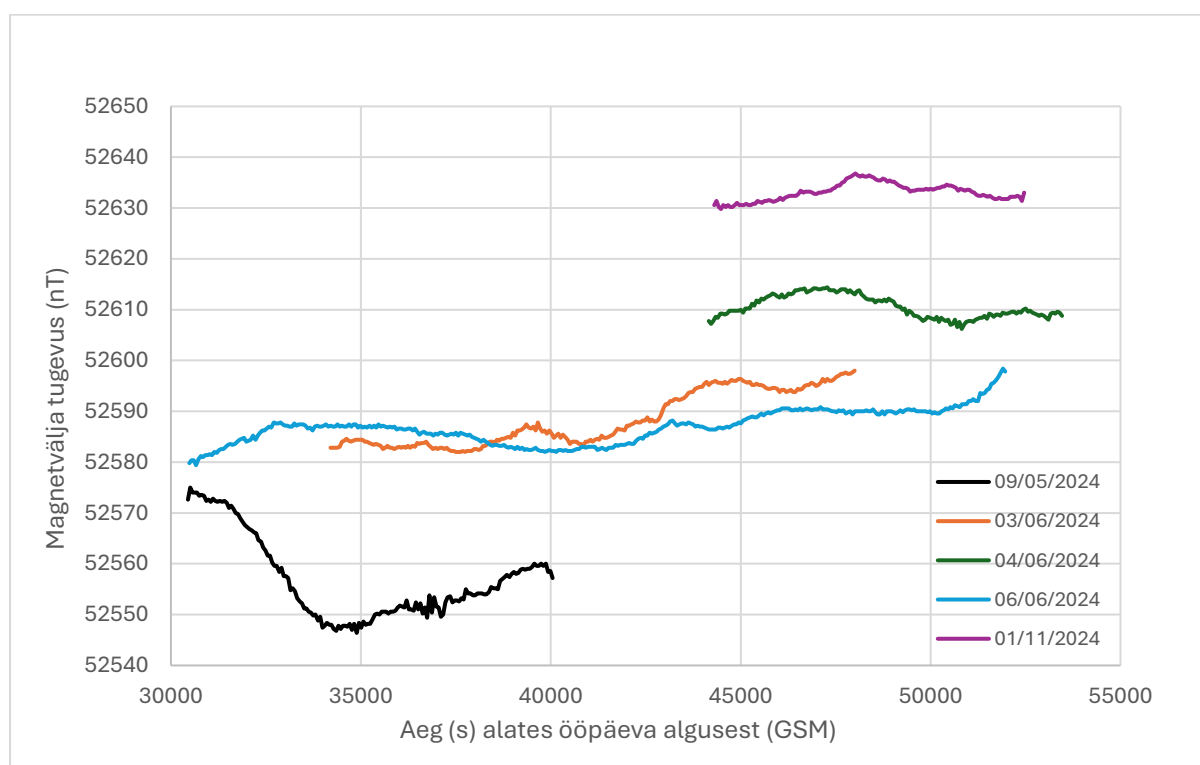


**Joonis 6.** Modelleerimiseks loodud profiilid A-A' ja B-B' isojoonte (droonimagnetomeetri andmete põhjal) ja Maa-ameti (2025) ortofoto taustal.

### 3. Tulemused

#### 3.1. Baasjaama lugemid

Uuringuperioodi (ligikaudu 6 kuud) vältel tugevnes magnetväli Mustanina anomaalia asukohas (piiritletud koordinaatidega 6585999-6581999 ja 715399-711399; L-EST 97) ületades IGRF mudeli poolt ennustatud +56 nT suurust aastast muutust (Joonis 7). Samas peab arvestama, et vaatlusperiood ei olnud pidev ning lisaks pikaegsetele magnetvälja muutustele esinevad ka lühema perioodiga kõikumised (näiteks on 4. juuni 2024 magnetvälja tugevuse väärtused oluliselt kõrgemad 3. ja 6. juuni 2024 väärtustest). Ööpäevased variatsioonid jäid mõõtmiste perioodil siiski valdavalt 20 nT piiresse olles suurimad 9. mail 2024 (Joonis 3).



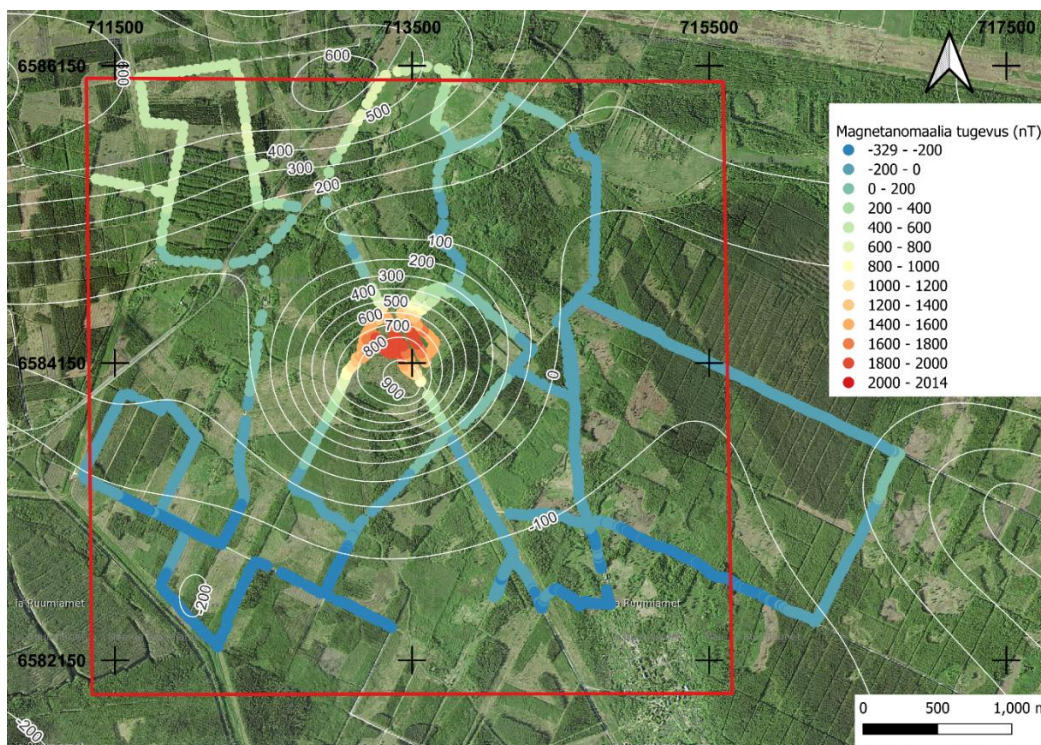
**Joonis 7.** Magnetvälja tugevuse ajalised muutused mõõtmiste ajal baasjaama (asukohaga 6583838, 712366; L-EST 97) andmestiku alusel.

#### 3.2. Mustanina magnetvälja anomaalia mõõdetuna maalt ja õhust

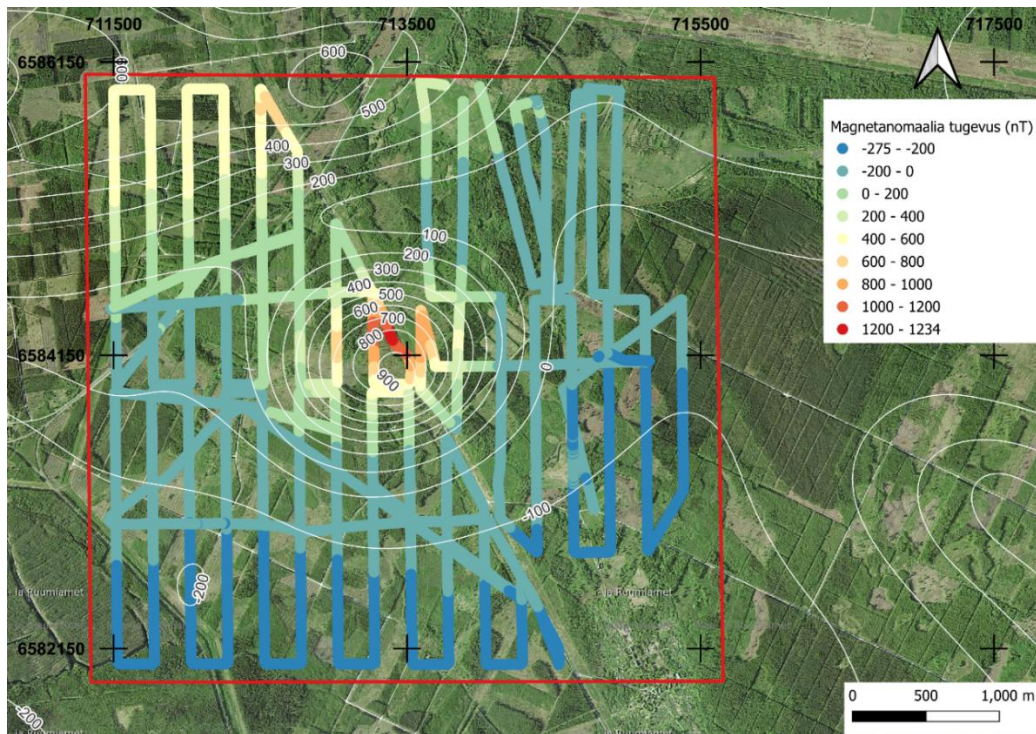
Käesoleva töö üheks eesmärgiks oli võrrelda kolmel erineval viisil saadud andmestikku: varasem aerogeofüüsikaline, drooniga, maapealne kaardistamine ning hinnata andmete kvaliteeti. Andmeid töödeldi ning interpoleeriti ja loodi magnetanomaaliade kaardid (Joonised 8-12).

Maapealse mõõdistusega registreeriti anomaalia väärtustega -329-2014 nT (Joonis 8). Anomaalia on orienteeritud põhja-lõuna suunas ning ovaalse kujuga olles loode-kagu suunas laiem kui põhja-lõuna suunas. Droonimagnetomeetriga registreeriti kõrgeimaks väärtuseks 1234 nT ning miinimumväärtusega -275 nT (Joonis 9). Anomaalia on sümmeetriline ning tema pikitelg on orienteeritud põhja-lõuna suunas. Aeromagnetiliste anomaaliade isojoonte põhjal (Joonis 8) on anomaalia maksimaalseks väärtuseks 900 nT miinimumiga -200 nT. Anomaalia on kergelt orienteeritud loode-kagu suunas ning kujult sümmeetriline.

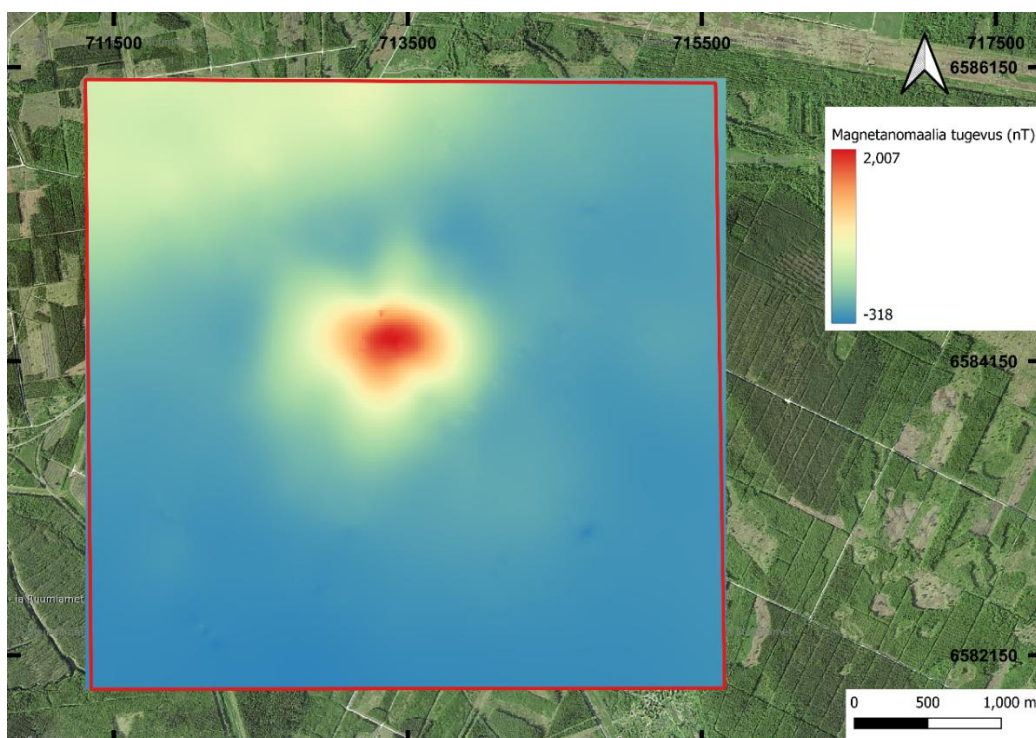
Andmete interpoleerimise eesmärgiks oli viia kolm erinevat andmestikku võrreldavale tihedusele, selleks et neid paremini omavahel võrrelda. Maapealsete andmete interpoleerimisel saadi anomaalia maksimumiks 2007 nT, ning miinimumiks -318 nT (Joonis 10). Anomaalia on ovaalne olles välja venitatud lõuna suunas. Selle lääne-ida suunaline laius on 990 m ning põhja-lõuna suunaliselt 740 m. Drooniandmestikuga saadi maksimumiks 1150 nT ning miinimumiks -285 nT (Joonis 11). Anomaalia on põhja-lõuna suunas laiem (840 m) kui lääne-ida suunas (980 m), kuid kujult üldiselt ümmargune. Aeromagnetiliste andmete puhul jäävad anomaalia intensiivsused vahemikku -200 kuni 970 nT (Joonis 12). Selle põhja-lõuna suunaline laius on 1080 m ning lääne-ida suunas 1370 m, põhjustades ovaalset kuju.



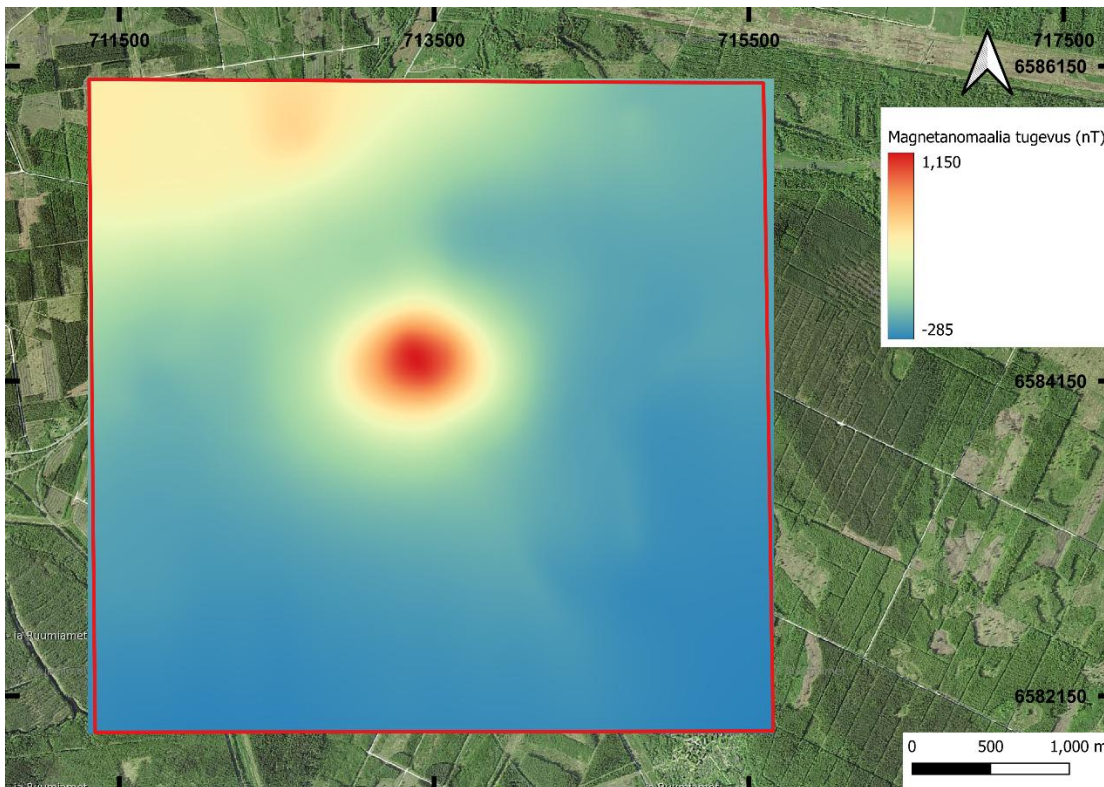
**Joonis 8.** Maapealse mõõdistusega saadud magnetvälja tugevus (värvilised jooned, globaalne väli lahutatud) uuringualas (punane piirjoon) aeromagnetiliste isojoonte ja Maa-ameti (2025) ortofoto taustal.



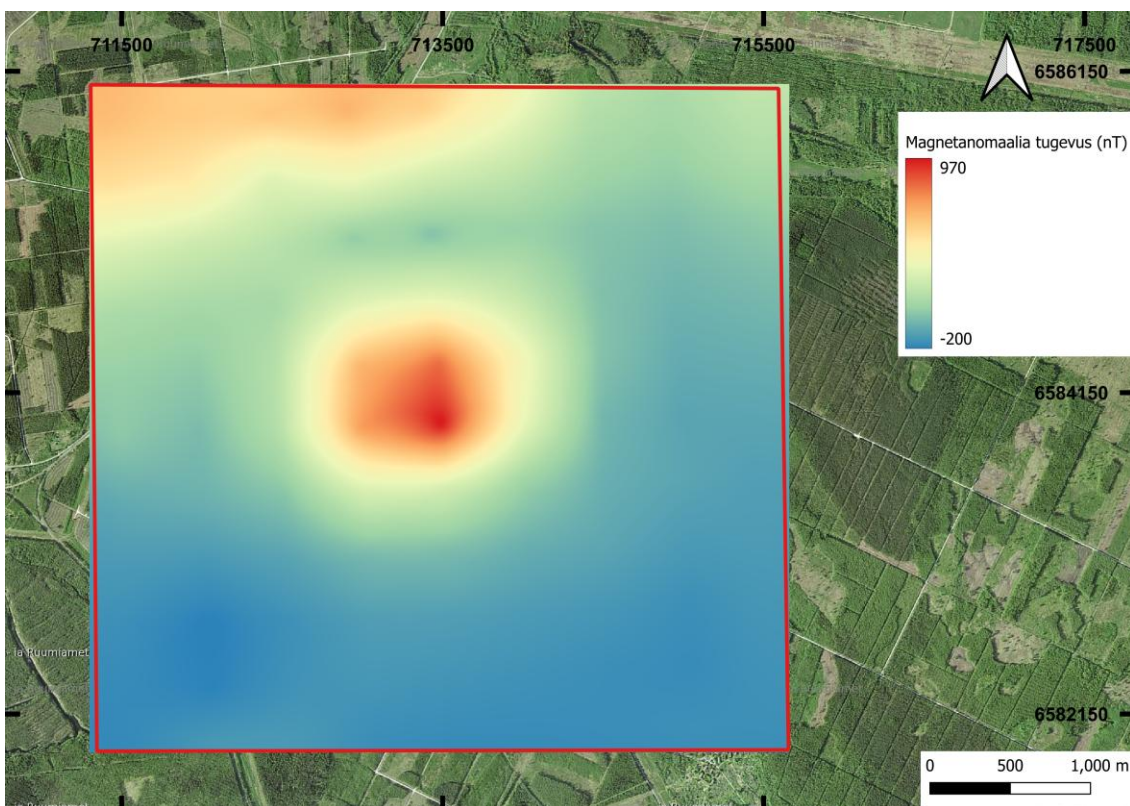
**Joonis 9.** Drooniga saadud magnetvälja tugevus (värvilised jooned, globaalne väli lahutatud) uuringualas (punane piirjoon). (Aluskaart: Maa-amet, 2025)



**Joonis 10.** Uuringuala maapealsete andmete interpoleerimisel saadud magnetanomaalia rasterkaart, 20 m piksel (Aluskaart: Maa-amet, 2025)



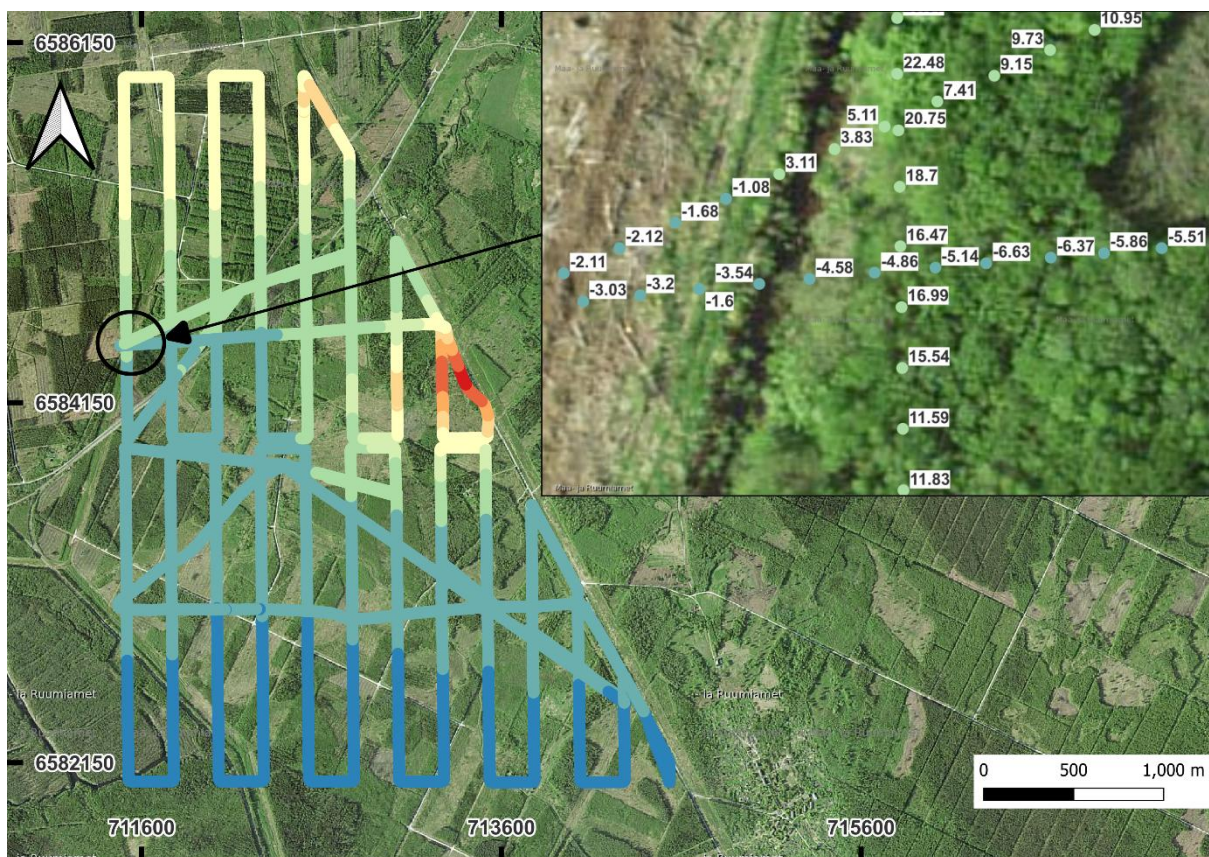
**Joonis 11.** Magnetanomaalia rasterkaart droonimagnetomeetri andmete põhjal, 10 m piksel.  
(Aluskaart: Maa-amet, 2025)



**Joonis 12.** Magnetanomaalia rasterkaart aeromagnetiliste andmete põhjal, 10 m piksel.  
(Aluskaart: Maa-amet, 2025)

Andmete kvaliteedi hindamisel, seda eelkõige droonimagnetomeetri ja maapealsete andmete korral, oli aluseks mõõtepunktide ristumiskohad. Maapealsetel andmetel oli üheks selliseks ristumiskohaks anomaalia keskosas asuv mõõtepunkt (1832 nT) koordinaatidega 6584224, 713421 (L-EST 97). Punktile vahetusläheduses (5-10 m raadiuses) olevad mõõtepunktid on intensiivsustega 1877, 1832, 1832 ja 1836 nT, mis teeb keskmiseks erinevuseks ristumiskohaga ~12 nT.

Droonimagnetomeetri andmete korral vaadeldi lennuprofiilide ja kontroll-lendude profiilide ristumiskohtasid. Märgati kohti, kus profiilid on üsnagi sarnased  $\pm 5$  nT, kuid esines ka probleemsemaid kohti. Ühe näitena võib tuua uuringuala lääneosas paiknevast profiilide ristumiskohast (Joonis 13), kus lennuprofiilidel registreeriti magnetvälja väärtused vahemikus ~12-27 nT, kuid kontroll-lennu profiilil registreeriti väärtused vahemikus -3-(-)6 nT, mis teeb erinevuseks keskmiselt 15-33 nT.



**Joonis 13.** Näide droonimagnetomeetri andmetest profiilide ristumiskohast, kus magnetvälja intensiivsused erinesid. (Aluskaart: Maa-amet, 2025)

### 3.3. Regionaalne väli

Mustanina magnetanomaalia kaardistamise tulemusel registreeriti maapealse mõõdistusega anomaalia miinimumväärtuseks -329 nT ning droonimagnetomeetriga -275 nT (Joonised 8 ja 9). Lisaks tuvastati väiksema amplituudiga anomaalia (kuni 600 nT) uuringuala loodeosas. Sarnane tulemus saadi ka droonimagnetomeetri ja aeromagnetiliste andmete interpoleerimisel saadud kaartidel (Joonised 11 ja 12), viidates regionaalse magnetvälja mõjule uuringualas.

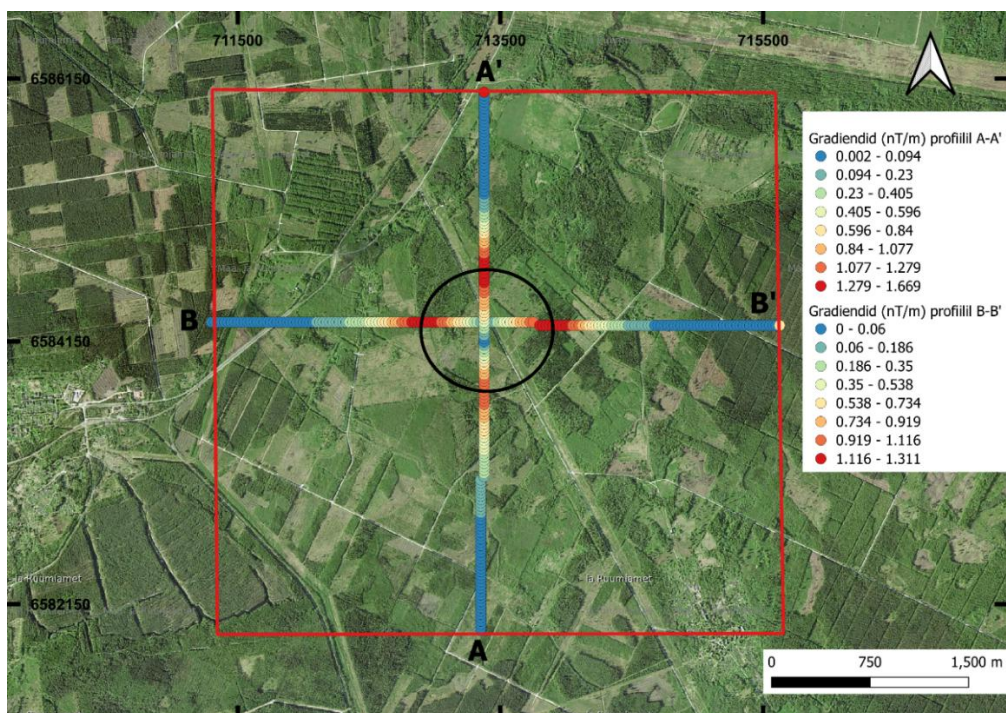
Hinze *et al.* (2013) kohaselt mõjutavad magnetanomaaliaid nii sügavamad ja ulatuslikumad geoloogilised kehad, mis põhjustavad pikalainelisi regionaalseid efekte, kui ka madalamal paiknevad allikad, tekitades lühilainelist müra. Täpsema tõlgenduse ja modelleerimise jaoks lahutati droonimagnetomeetri andmetest regionaalne väli, selleks et analüüsida ainult jääkanomaaliaid.

### 3.4. Sügavuse hinnangud ja modelleerimistulemused

Keha piirid määrati gradient-amplituudi meetodiga, tuvastades piirkonnad, kus gradientide väärtused muutusid järsult (Joonis 14). Sellistes piirkondades tähistavad gradientide maksimaalsed väärtused keha servasid. Gradientide arvutamisel oli aluseks droonimagnetomeetri andmestik.

Profiilil A-A' saadi põhjapool maksimaalseks gradiendiks 1,418 nT/m ning lõunapool 1,2264 nT/m ning vastavalt koordinaatidega 6584696, 713375 ja 6583796, 713375 (L-EST 97). Koordinaatide abil saadi keha põhja-lõunasuunaliseks laiuseks 900 m. Profiilil B-B' saadi läänepool maksimaalseks gradiendiks 1,2704 nT/m ning idapool 1,3108 nT/m ning vastavalt koordinaatidega 6584296, 712925 ja 6584271, 713900 (L-EST 97). Lääne-idasuunaliseks laiuseks saadi 975 m.

Anomaaliaid põhjustava keha pealispinna keskpunktid valiti gradientide väärtuste muutuste vahel olevate väikseimate gradientide väärtuste alusel, mis profiilil A-A' saadi 0,04 nT/m koordinaatidega 6584171, 713375. Profiilil B-B' saadi 0,0004 nT/m koordinaatidega 6584296, 713400 (L-EST 97). Keskpunktidest arvutati keskmine (6584233, 713387) ning kasutati parameetrina modelleerimisel.



**Joonis 14.** Gradientide väärtused profiilidel A-A' ja B-B'. Musta ringina on tähistatud anomaalia piir gradient-amplituudi meetodi põhjal. (Aluskaart: Maa-amet, 2025)

Tabel 2. Droonimagnetomeetri andmete põhjal arvutatud anomaaliat põhjustava geoloogilise keha keskpunkti sügavused.

<b>Anomaalia poollaiuse meetod</b>		
<b>Valem</b>	<b>Sügavus (m; A-A')</b>	<b>Sügavus (m; B-B')</b>
$z = 0.7x_{1/2}$	693	728
$z = x_{1/2}$	990	1040
$z = 1.3x_{1/2}$	1287	1352
Keskmine	990	1040
<b>Tipp-null meetod</b>		
$z = x_{p0}$	1540	1180
Poollaius ja tipp-null meetodi keskmine 1190 m		

Sügavuste arvutamisel leiti jääkanomaalia maksimaalne amplituud, mis profiilil A-A' saadi ~814 nT ning profiilil B-B' ~788 nT. Anomaalia poollaius poole amplituudi juures profiilil A-A' on 990 m ning profiilil B-B' 1040 m (Tabel 2). Kahe profiili põhjal jääb anomaaliat põhjustava keha sügavus vahemikku 1352-693 m. Tipp-null meetodi puhul leiti anomaalia sügavus kahes suunas. Profiili A-A' korral nii põhja- kui ka lõunasuunaline ning keskmiseks saadi 1540 m. Profiilil B-B' ida- ja läänesuunaline, keskmisega 1180 m. Anomaalia poollaius ja tipp-null meetodite keskmiseks saadi 1190 m. Kasutades keha keskmist sügavust (1190 m)

ning eelnevalt kirjeldatud keha pealispinna sügavust (380 m), saadi keha pikkuseks 1620 m, mida kasutati fikseeritud parameetrina modelleerimisel.

Tabel 3. Modelleerimisel saadud anomaaliat põhjustava keha parameetrid erinevate Koenigsbergeri suhete (edaspidi Q) korral.

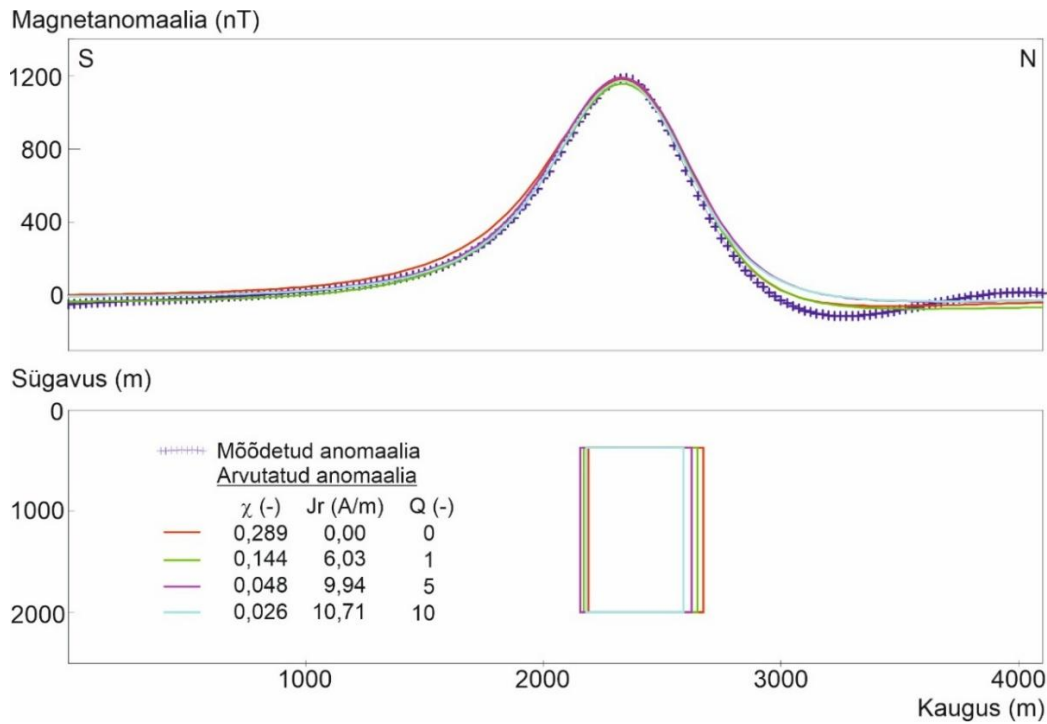
Koenigsbergeri suhe Q (-)	Laius (m)		Keskpunkti koordinaadid		Jääkmagnetiseeritus Jr (A/m)	Magnetiline vastuvõtlikkus $\chi$ (-)
	S-N	W-E	X	Y		
0	485	585	713427	6584377	0,0	0,289
1	480	560	713410	6584355	6,03	0,144
5	470	565	713410	6584335	9,94	0,048
10	410	654	713400	6584330	10,71	0,026

Kuna Mustanina anomaaliat põhjustavat geoloogilist struktuuri ei ole puurauguga avatud siis puudub meil informatsioon kivimite füüsikaliste omaduste kohta. Selleks, et saada aimu anomaaliat põhjustava geoloogilise keha olemuse kohta, fikseeriti ülaltoodud andmestikule baseerudes keha kuju. Modelleerimise käigus muudeti vaid modelleeritud silindri aluse kuju, kuid seda minimaalselt. Esmalt omistati mudelile ainult magnetiline vastuvõtlikkus jättes jääkmagnetiseerituse väärtuse nulliks. Mõõdetud ja arvatud anomaaliate maksimaalse sarnasuse korral saadi vastuvõtlikkuse väärtuseks 0,289 SI (Tabel 3). Seejärel koostati mudelid, mille puhul suurendati jääkmagnetiseerituse väärtust ( $Q = 1$ ;  $Q = 5$  ja  $Q = 10$ ). Jääkmagnetiseerituse suunad olid tarkvara poolt kõikidel mudelitel fikseeritud asimuudiga  $0^\circ$  ning inklinatsiooniga  $90^\circ$ .

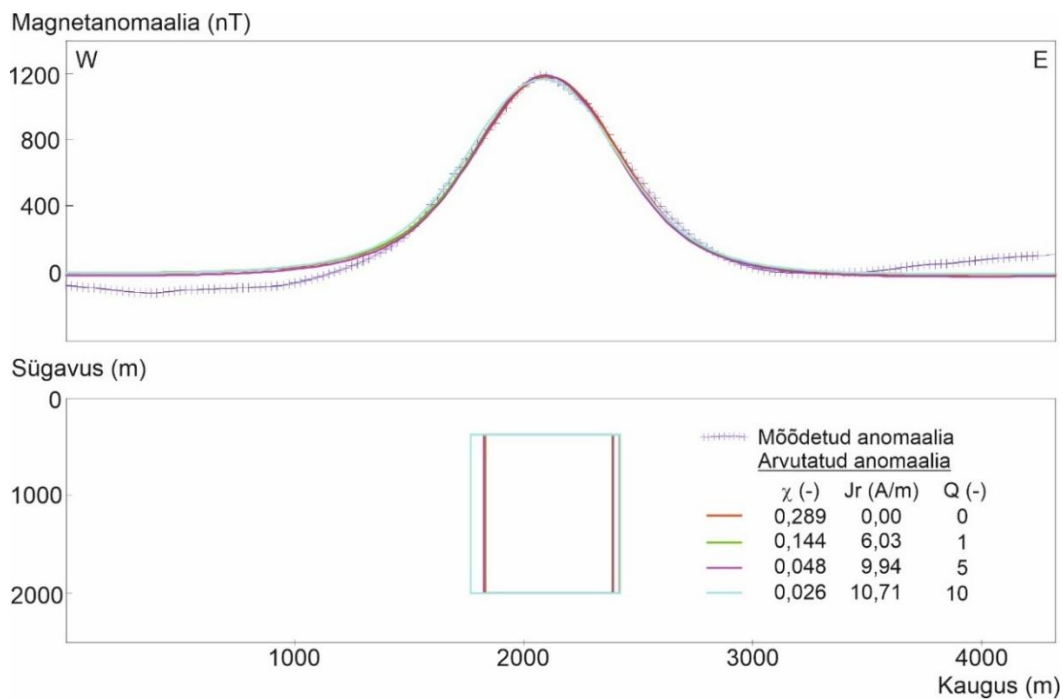
Anomaaliat põhjustava keha pealispinna keskpunktid paiknesid üldjoontes samas asukohas (Joonis 17).  $Q = 10$  korral nihkus keha pealispinna keskpunkt ~55 m lõunapoole võrreldes  $Q = 0$  korral saadud keskpunkti asukohaga. Igas mudelis saavutatud kehade pikkused ja pealispinna sügavused on ühesugused, sest need parameetrid olid modelleerimisel fikseeritud, olles vastavalt 1160 m ja 380 m. Keha S-N suunaline laius jäi vahemikku 410-485 m (Tabel 3) ning W-E suunaline laius 560-654 m. Mida kõrgem oli Q väärtus seda väiksem oli mudeldatud keha S-N suunaline laius (Joonis 15) ja seda suurem oli keha W-E suunaline laius (Joonis 16).

Võttes arvesse, et modelleerimisel kasutati keha kujuks silindrit ning pealtvaates on keha elliptiline, siis kasutati ruumalade arvutamisel elliptilise silindri valemit  $V = \pi \cdot a \cdot b \cdot H$ , kus a on keha W-E suunaline poollaius, b keha S-N suunaline poollaius ning H keha pikkus. Keha

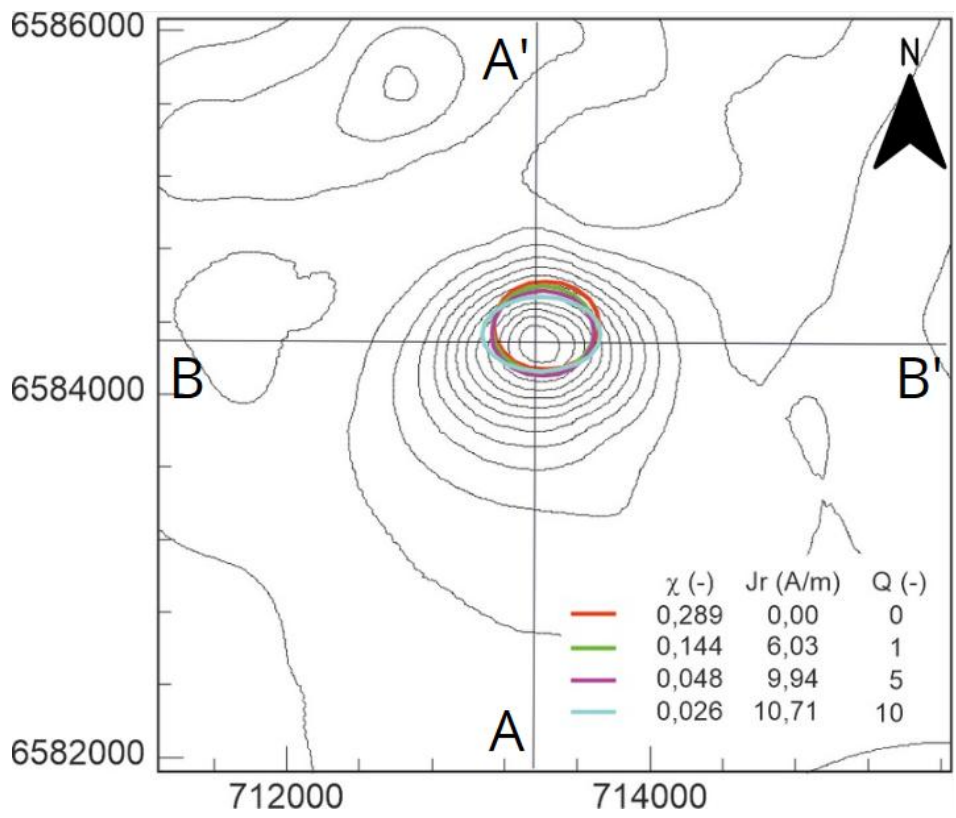
ruumaladeks saadi  $Q = 0$  korral  $0,258 \text{ km}^3$ ,  $Q = 1$  puhul  $0,245 \text{ km}^3$ ,  $Q = 5$  korral  $0,242 \text{ km}^3$  ja  $Q = 10$  korral  $0,244 \text{ km}^3$ .



**Joonis 15.** Profiilil A-A' modelleeritud keha läbilõiked (alumine osa) erinevate Koenigsbergeri suhete korral. Ülemises osas mõõdetud (sinine joon) ja arvutatud anomaalia väärtused.



**Joonis 16.** All: Mustanina magnetanomaaliat põhjustava geoloogilise keha mudelid profiilil B-B'. Ülal: Mõõdetud ja mudelitele vastavad arvutatud magnetanomaaliade kõverad.



**Joonis 17.** Modelleerimisel saadud mudeli asendid erinevate  $Q$  väärtuste korral.

## 4. Arutelu

### 4.1. Erinevused kolme andmebaasi vahel

Käesolevas töös teostati magnetomeetrilist kaardistamist maapinnalt ning õhust eesmärgiga võrrelda kolmel erineval viisil saadud andmestikke ning sealhulgas hinnata droonimagnetomeetrist ja maapealse mõõdistusega saadud andmete kvaliteeti.

Maapealse mõõdistusega saadi anomaalia maksimum ligi 1,6 korda kõrgem võrreldes droonimagnetomeetri andmetega ning umbes 2,2 korda kõrgem võrreldes aeromagnetilise andmestikuga (isojoonte põhjal). Lisaks märgati anomaaliade tippude nihkumist (~220 m) põhja poole nii droonimagnetomeetri kui maapealsete mõõteandmete korral võrreldes aeromagnetiliste isojoontega. Lisaks märgati muutusi anomaaliade suuruses ja kujus. Maapealsete andmetega saadi interpoleerimisel laiuselt väiksem anomaalia ning anomaalia on välja venitatud lõuna suunas. Droonimagnetomeetri interpoleeritud andmete põhjal on anomaalia suurem kui maapealse puhul ning sümmeetrilisem. Laiuselt saadi kõige suurem anomaalia aeromagnetilise andmestikuga.

Käesoleva uuringu tulemused, mis näitavad erinevusi magnetiliste anomaaliade amplituudis, asukohas ja kujus erinevate mõõtmismeetodite vahel, on kooskõlas varasemate uuringutega, mis on käsitletud maapealse ja aeromagnetilise andmestiku võrdlusi. Näiteks Özkaptan *et al.* (2025) uuringus, kus samuti võrreldi maapealset ja aeromagnetilist andmestikku, leiti küll 90%-line kattuvus anomaaliade intensiivsustes, kuid lokaliseeritud piirkondades ulatus erinevus ligikaudu 50%-ni. Põhjuseks toodi aeromagnetilise kaardistamise lennukõrgus (Eesti puhul 300 m), mis võib põhjustada ka madalamat ruumilist lahutusvõimet, ehk väiksemad detailid võivad jääda märkamata või segunevad suuremate struktuuridega. See võib omakorda põhjustada suuremaid anomaaliaid ning keskkoha nihkumist. Samuti on Hinze *et al.* (2013) täheldanud, et anomaalia amplituud väheneb kauguse pöördkuubina, ehk kui kahekordistada sensori kaugust kehast, siis langeb anomaalia amplituud kaheksandiku võrra. Anomaaliade kuju erinevust interpoleeritud rasterkihtides võib põhjendada andmete tiheduse ja jaotusega (Özkaptan *et al.*, 2025). Kuna käesolevas töös olid maapealsed andmed hõredamalt ja ebahütlasemalt jaotunud, põhjustas see anomaalia väljavenitatust lõuna suunas, sest algoritmil on vähem andmeid, mida töödelda. Ka Parshin *et al.* (2018) märgivad, et maapealsed mõõtmised kipuvad olema rohkem hajutatud, muutes andmestiku vähem sobivaks matemaatiliseks töötlemiseks, võrreldes droonimõõtmiste ühtlasema andmestikuga. Lisaks

eelnevale märgati, et käesolevas töös maapealt mõõdetud andmed on kvaliteetsemad (andmete varieeruvus ~12 nT) kui droonimagnetomeetriga saadud andmed (varieeruvus kuni 30 nT). See võib olla tingitud sellest, et droonimagnetomeetreid mõjutavad drooni enda tekitatud elektromagnetilised häired ja mootorite pöörlemine, vähendades magnetomeetrist saadud andmete täpsust võrreldes maapealsete andmetega. Andmete kvaliteeti saaks oluliselt tõsta vähendades lennukõrgust ja drooni kiirust ning samuti kasutada madalpääsfiltrit (ingl *low-pass filter*) müra vähendamiseks (Stele *et al.*, 2023).

Vaatamata sellele, et maapealse mõõdistusega saadi parema kvaliteediga andmestik, on droonimagnetomeetriga mõõdistamine oluliselt kiirem, lihtsam ja odavam. Droonimagnetomeetriga saadud andmestiku kvaliteeti saaks oluliselt parandada, vähendades drooni kiirust, lennukõrgust ning kasutades filtreid müra vähendamiseks. Zheng *et al.* (2021) põhjal saaks ka droonimagnetomeetrist saadud andmestiku kvaliteeti tõsta, suurendades magnetomeetrite sensorite kaugust droonist. Töö kinnitab, et droonil põhinev magnetomeetria on paljulubav meetod laiaulatuslikeks ja ajakriitilisteks uuringuteks, kuid selle kasutamine eeldab head andmete töötlemist droonist põhjustatud müra vähendamiseks.

## 4.2. Mustanina anomaaliat põhjustava geoloogilise keha olemus.

Sügavuste hinnangul paikneb Mustanina magnetanomaaliat põhjustava keha pealispind 380 m sügavusel. Keha vertikaalne ulatus on 1620 m, mis tähendab, et keha ulatub ligikaudu 2000 m sügavuseni. Keha maksimaalseks ruumalaks saadi 0,258 km<sup>3</sup>. Võrreldes Jõhvi läänepoolseima magnetanomaalia mudeliga (Plado *et al.*, 2020), asub Mustanina anomaaliat põhjustava keha pealispind sügavamal kui Jõhvi mudelis kasutatud sügavus 230-255 m. Samuti on ka Mustanina modelleerimisel saadud keha pikem kui Jõhvi korral (kuni 770 m) ning keha on ka sügavamal, mis Jõhvi puhul on 1000 m. Mustanina anomaalia maksimaalne amplituud maapinnalt mõõdetuna (~2000 nT) on aga märgatavalt madalam kui Jõhvi lääneanomaalias (~19 290 nT; Plado *et al.*, 2020). Jõhvi puhul on aga puurandmetega tõestatud magnetiitkvartsiidi mineralisatsioon ning mille tugev jääkmagnetiseeritus on põhiliseks anomaalia põhjustajaks. Kui arvestada, et Mustanina anomaalia asub Jõhvi vööndis ning on osa Jõhvi magnetanomaaliade reast (olles üks idapoolsematest), võib eeldada, et ka Mustanina anomaaliat põhjustab magnetiitkvartsiit. Kuna kivimite magnetiline vastuvõtlikkus ( $\chi$ ) sõltub suuresti ferromagnetiliste mineraalide, eeskätt magnetiidi sisaldusest (Henkel, 1994), siis Mustanina puhul peab magnetiidi sisaldus olema väiksem kui Jõhvi magnetiitkvartsiidis.

Jõhvi läänepoolseima magnetanomaalia mudelis kasutati keha omadusena Koenigsbergeri suhet  $Q = 7,1$  (Plado et al., 2020). Seepärast on põhjendatud, et Mustanina anomaalia puhul on realistlikum edasistel arutlustel arvestada madalama väärtusega Koenigsbergeri suhet 5.  $Q = 5$  juures on Mustanina keha magnetiliseks vastuvõtlikuseks  $\sim 0,05$  SI ning jääkmagnetiseerituseks  $9,94$  A/m. Selline väärtus ( $Q = 5$ ) viitab sellele, keha magnetvälja domineerivaks allikaks on kivimite subvertikaalse suunaga jääkmagnetiseeritus (jääkmagnetiseeritus ületab indutseeritud magnetiseeritust), mida ka Jõhvi puhul täheldati. Antud tulemus ( $Q = 5$  SI,  $J_r = 9,94$  A/m) on väiksem kui Jõhvi 1 puursüdamikus mõõdetud keskmine magnetiline vastuvõtlikus ( $\chi = \sim 1,1$  SI) ja jääkmagnetiseeritus  $597,9$  A/m magnetiitkvartsiidil ning mudeldamisel kasutatud  $\chi = 0,35$  SI ja  $J_r = 99,5$  A/m. Seega saab kinnitust, et Mustanina anomaaliat põhjustaval magnetiitkvartsiidis (eeldatavasti) peab magnetiidi sisaldus olema väiksem Jõhvi omast. Henkel (1994) kohaselt vastab  $Q = 5$  juures saadud magnetiline vastuvõtlikus ( $0,05$  SI) tüüpiliselt paari-kolme-protsendilisele magnetiidisaldusele.

Tulemused näitavad, et Mustanina anomaaliat põhjustab tõenäoliselt magnetiitkvartsiiti sisaldav keha, mille subvertikaalse suunaga jääkmagnetiseeritus on domineerivaks magnetvälja allikaks ning mille magnetiidi sisaldus peab olema vähemalt 3 %. Täpsemate petrofüüsikaliste omaduste määramiseks on vajalik läbi viia puurimist, proovide võtmist ning laboratoorselt magnetiliste omaduste mõõtmist.

## Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärkiteks oli võrrelda kolmel erineval viisil (drooniga ja maapealne kaardistus, varasem aerogeofüüsikaline) saadud magnetomeetrist andmestikku ja hinnata andmete kvaliteeti ning teiseks, modelleerida ning mudeli põhjal iseloomustada Mustanina magnetanomaaliat põhjustavat keha.

Uuring näitas selgeid erinevusi andmetike vahel. Maapealse mõõdistusega saadi kõrgeim anomaalia maksimum ja andmete kvaliteet, kuid andmed olid uuringualas hõredamalt jaoutunud ja seega halvem interpoleerimistulemus. Lisaks kulus maapealsele kaardistamisele rohkem aega kui drooniga kaardistamisele. Droonimagnetomeetri andmestik pakkus tasakaalu uuringuala katvuse, seega ka paremat interpolatsioon, ja anomaalia intensiivsuse vahel. Aeromagnetiline andmestik pakub kõige suuremat ala katvust kuid lennukõrguse tõttu madalamat anomaalia maksimumi, keskkoha nihkumist ning anomaalia ülesuurendamist.

Modelleerimistulemused näitasid, et Mustanina anomaaliat põhjustab tõenäoliselt magnetiitkvartsiiti sisaldav keha, millel on tugev subvertikaalse suunaga jäämagnetiseertius ning mille magnetiidi sisaldus peab olema vähemalt 3 %, et põhjustada anomaaliat Mustanina piirkonnas. Kuigi modelleerimine andis olulist infot keha asendi, ulatuse ja võimaliku olemuse kohta, on täpsemate petrofüüsikaliste omaduste määramiseks vajalik edasine uurimine/puurimine, proovide võtmist ning laboratoorselt magnetiliste omaduste mõõtmist.

# **Mustanina magnetic anomaly from land and air**

Martin Riives

## *Summary*

The purpose of this master's thesis was to compare magnetometric data obtained by three different methods (drone and ground mapping, previous aerogeophysical) and to assess data quality. Secondly, to characterize the body causing the Mustanina magnetic anomaly based on modelling.

The data were collected using magnetometer G-857 on land survey, G-856 as a basestation and MagDrone R3 was fixed on a drone DJI Matrice 300 RTK. Collected data were corrected against diurnal variations and then interpolated in QGIS. For depth estimations, anomaly half-width and peak to zero methods were used. Also gradient-amplitude method was used to calculate the width of the anomaly causing body and to get the coordinates for the centre of the body. Modelling was done in the software Potent.

The study showed clear differences between the datasets. Ground-based measurements yielded the highest anomaly maximum and data quality, but the data were more sparsely distributed in the study area, resulting in a poorer interpolation outcome. Additionally ground mapping took more time than drone mapping. The drone magnetometry dataset offered a balance between study area coverage (and thus better interpolation) and anomaly intensity. Aeromagnetic data provided the greatest area coverage but due to flight altitude, a lower anomaly maximum, a shift of the center of the anomaly and an overestimation of the size of the anomaly.

The modeling results showed that the Mustanina anomaly is likely caused by a body containing magnetite quartzite, which has greater depth and extent than the Jõhvi western anomaly, but significantly weaker magnetic properties. It has a strong subvertical remanent magnetization. Also it was estimated that magnetite quartzite in Mustanina must have at least 3 % of magnetite to cause such anomaly. Although modeling provided important information about the body's position, extent, and possible nature, further investigation/drilling, sampling and laboratory measurement of magnetic properties are necessary for more precise interpretation.

## Tänuavaldused

Töö autor tänab väga oma juhendajaid Marko Kohvi ja Jüri Pladot nende kannatlikkuse ning Argo Jõelete algoritmi jagamise eest. Samuti soovib autor tänada ka Mikhail Shtokalenkot aeromagnetiliste andmete jagamisel ning Georg Rahu, Krete Roopõldu, Richard Pihelat, Jane Pelskat ja Joosep Aiat välitöödel abistamise eest.

## Kasutatud kirjandus

Dmitrijeva, M. (2015). Gravity and magnetic study of the Luusika potential field anomaly. Magistritöö geoloogias, Tartu Ülikool, 47.

Erisalu, E. & Arvisto, E. (1969). Otchet po izucheniyu kristallicheskogo fundamenta Yykhviskoy magnitnoy anomalii i yeshche okrestnosti. (Aruanne aluskorra uuringust Jõhvi magnetanomaalia alal ja selle ümbruses). Geoloogiafond. (Vene keeles)

Geometrics. (n.d.). G-857 Magnetometer. <https://www.geometrics.com/product/g-857/> (Viimati vaadatud 14.05.2025)

Henkel, H. (1994). Standard diagrams of magnetic properties and density—a tool for understanding magnetic petrology. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 43-53.

Hinze, W., J., Von Frese, R., R., B. & Saad, A., H. (2013). Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices and Applications. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511843129>

Koppelmaa, H. (2002). Eesti kristalse aluskorra geoloogiline kaart. Mõõtkava 1:400 000. Seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, 32.

Krull, A. (2021). Sonda-Uljaste magnetanomaalia geofüüsikalised ja petrofüüsikalised uuringud. Bakalaureusetöö geoloogias, Tartu Ülikool, 33.

Melitskaya, V., I. & Papko, A., M. 1992. Otchet o rezul'tatakh aeromagnitnoj s''emki masshtabov 1 : 25 000, 1 : 50 000 na territorii Éstonii i prilegayushchego shelfa, provedennoj partiei nr. 49 v 1987–1991 gg (Aeromagnetiline kaardistamine mõõtkavas 1:25 000, 1:50 000 Eestis ja šelfialadel, mis viidi läbi partei nr 49 poolt 1987-1991. a.). *Geological Survey of Belarus, Minsk*, 75. (Vene keeles)

Nabighian, M., N., Grauch, V., J., S., Hansen, R., O., LaFehr, T., R., Li, Y., Peirce, J., W., Phillips, J., D. & Ruder, M., E. (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70. <https://doi.org/10.1190/1.2133784>

Parshin, A., V., Morozov, V., A., Blinov, A., V., Kosterev, A., N., & Budyak, A., E. (2018). Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multicopter UAV as a promising

replacement for traditional ground survey. *Geo-Spatial Information Science*, 21, 1, 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>

Plado, J., Kiik, K., Jokinen, J. & Soesoo, A. (2020). Magnetic anomaly of the Jõhvi iron ore, northeastern Estonia, controlled by subvertical remanent magnetization. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 69, 4, 189-199. <https://doi.org/10.3176/earth.2020.13>

Puura, V. & Flodén, T. (1996). Subjotnian igneous structures in the Svecofennian domain of the Baltic region. *GFF*, 118, 22–23. <https://doi.org/10.1080/11035899609546289>

Puura, V., Vaher, R., Klein, V., Koppelmaa, H., Niin, M., Vanamb, V. & Kirs J. (1983). Kristallicheskij fundament Éstonii (Kristalne aluskord Eestis). *Nauka, Moscow*, 208. (Vene keeles)

Sensys Magnetometers & Survey Solutions. (n.d.). MagDrone R3 - Reliable Magnetometer for Drones. <https://sensysmagnetometer.com/products/magdrone-r3-magnetometer-for-drone/>. (Viimati vaadatud 17.03.2025)

Sharma, P.,V. (1986). Geophysical Methods in Geology. *Elsevier, Amsterdam*

Soesoo, A., Nirgi, S. & 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*, 2, 18–33.

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

Stele, A., Kaub, L., Linck, R., Schikorra, M., & Fassbinder, J., W., E. (2023). Drone-based magnetometer prospection for archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2023.105818>

Telford, W., M., Geldart, L., P. & Sheriff, R., E. (1990). Applied Geophysics. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>

Özkaptan, M., Özkaptan, T. & Babacan, A., E. (2025). Comparison of ground and aero magnetic data in the Eastern Pontides (Türkiye) and inferences regarding the crustal structure with the support of gravity data. *Journal of African Earth Sciences*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2025.105620>

Zheng, Y., Li, S., Xing, K. & Zhang, X. (2021). Unmanned Aerial Vehicles for Magnetic Surveys: A Review on Platform Selection and Interference Suppression. *Drones*, 5, 3, 93. <https://doi.org/10.3390/drones5030093>

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Martin Riives,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „**Mustanina magnetanomaalia maalt ja õhust**,“ mille juhendajad on Jürid Plado ja Marko Kohv, 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.

*Martin Riives*  
**26.05.2025**