

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

Bakalaureusetöö geoloogias (12 EAP)

**U–Th–Pb keemiline dateerimine Uljaste puursüdamiku monatsiidi, ksenotiimi ja  
uraniniidi põhjal**

**Elerin Kinsiver**

Juhendaja: Peeter Somelar

Tartu 2025

## **U–Th–Pb keemiline dateerimine Uljaste puursüdamiku monatsiidi, ksenotiimi ja uraniniidi põhjal**

Eesti kristalne aluskord jaguneb mitmeks vööndiks ning käesolevas töös keskendutakse Alutaguse vööndile. Selle piirkonna kohta puuduvad isotoopdateeringud, mistõttu ei ole siiani päris selge, kas Alutaguse vööndi kivimid kujunesid Lapimaa-Savo orogeneesi (1,91–1,93 Ga) või Fennia orogeneesi (1,88–1,90 Ga) käigus. Alutaguse kivimites leidub aktsessorseid mineraale, mis sisaldavad suures koguses uraani, tooriumi ja pliid. Nende elementide kontsentratsioonide suhete põhjal on võimalik hinnata kivimikompleksi vanust. Käesolevas töös kasutati dateerimiseks kolme erinevat mineraali: monatsiiti, ksenotiimi ja uraniniiti. Uuritud proov pärineb Uljaste puuraugust F188, 201,2 m sügavuselt, kus põhikivim on vilgugneiss. Andmete kogumiseks kasutati SEM-EDS-meetodit, mille tulemuste põhjal arvatati hinnangulised vanused. Monatsiidi ja ksenotiimi puhul jäid esinduslikud vanused vahemikku 1,7–2,0 Ga. Statistiliselt on kõige esinduslikum vanusevahemik  $1,8\text{--}1,9 \pm 0,08$  Ga, samas kui uraniniidi puhul oli vanuste varieeruvus suurem, kuid statistiliselt kõige esinduslikum oli 1,6–1,8 Ga. Lisaks esines uraniniidil ekstreemselt madala vanusega terasid (0,3–1,1 Ga). Tulemused peegeldavad mineraalide erinevat usaldusväärsust keemilisel dateerimisel: monatsiidi ja ksenotiimi puhul ilmnes üks selge vanusevahemik, kuid uraniniidi puhul mitu erinevat vanusepopulatsiooni. Uljaste kontekstis on monatsiit ja ksenotiim keemilise dateerimise seisukohalt usaldusväärsemad kui uraniniit. Töö eesmärk oli hinnata Uljaste puuraugus monatsiidi, ksenotiimi ja uraniniidi keemilise dateerimise võimalusi. Tulemused näitavad, et keemiliselt saab dateerida monatsiiti, ksenotiimi ja uraniniiti.

**Märksõnad:** keemiline dateerimine, monatsiit, ksenotiim, uraniniit, kristalne aluskord

**CERCS kood:** P420 – petroloogia, mineraloogia, geokeemia

## **U–Th–Pb chemical dating of monazite, xenotime, and uraninite from the Uljaste drill core**

The Estonian crystalline basement is divided into several different zones, and this work focuses on the Alutaguse zone. There are no isotopic dates for this region, so it is still not entirely clear whether the rocks of the Alutaguse zone were formed during the Lapland-Savo orogeny (1.91–1.93 Ga) or the Fennian orogeny (1.88–1.90 Ga). Accessory minerals containing large amounts of uranium, thorium, and lead are found in the Alutaguse rocks. Based on the ratios of these elemental concentrations, it is possible to estimate the age of the rock complex. In this work,

three different minerals—monazite, xenotime, and uraninite—were used for dating. The studied sample comes from the Uljaste borehole F188, at a depth of 201.2 m, where the host rock is mica gneiss. The SEM-EDS method was used to collect data, and the estimated ages were calculated based on the results. For monazite and xenotime, representative ages ranged from 1.7 to 2.0 Ga. Statistically, the most representative age range is 1.8 to  $1.9 \pm 0.08$  Ga. While for uraninite, the age variability was greater, the most statistically representative age range was 1.6 to 1.8 Ga. In addition, uraninite grains with extremely low ages of 0.3 to 1.1 Ga occurred. The results reflect the different reliability of minerals in chemical dating: for monazite and xenotime, one clear age range was revealed, but for uraninite, several different age populations. In the context of Uljaste, monazite and xenotime are more reliable in terms of chemical dating compared to uraninite. The aim of the work was to assess the possibility of chemical dating of monazite, xenotime, and uraninite in the Uljaste borehole. The results show that monazite, xenotime, and uraninite can be chemically dated.

**Keywords:** P420 – Petrology, Mineralogy, Geochemistry

**CERCS code:** Chemical Dating, Monazite, Xenotime, Uraninite, Crystalline Basis

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Teoreetiline taust</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Geoloogiline taust</b> .....	<b>8</b>
<b>3. Materjalid ja meetodid</b> .....	<b>9</b>
3.1. U-Th-Pb keemiline dateerimine .....	10
3.2. SEM analüüs .....	11
<b>4. Tulemused</b> .....	<b>12</b>
4.1. Monatsiit.....	12
4.2. Ksenotiim .....	15
4.3. Uraniniit .....	17
4.4. LA-ICP-MS-i analüüs .....	18
4.5. Arvutatud vanused.....	19
<b>5. Arutelu</b> .....	<b>20</b>
5.1. Probleemid U-Th-Pb keemilise dateerimisega.....	20
5.2. Alutaguse vanused.....	21
<b>Kokkuvõtte</b> .....	<b>23</b>
<b>Summery</b> .....	<b>24</b>
<b>Tänuavaldus</b> .....	<b>25</b>
<b>Kirjanduse loetelu</b> .....	<b>26</b>
<b>Lisad</b> .....	<b>30</b>

## Sissejuhatus

Eesti aluskorra Alutaguse vöönd on pakkunud huvi teadlastele juba viimased 60–70 aastat. Varasemast on teada, et lisaks grafiitgneissidele leidub Alutaguse vööndi moondekivimites suures sisalduses erinevaid sulfiide ning nendega kaasnevaid väärismetalle madalates kontsentratsioonides. Nende sulfiidide ja väärismetallide teket on tavaliselt seostatud hüdrotermaalsete sündmustega. Kuigi Alutaguse vööndit on uuritud juba pikka aega, ei teata tänaseni päris täpselt nende metasetete settimise ja/või moonandumise vanust. Alutaguse kivimites leidub sageli aktsessorseid mineraale, mis sisaldavad uraani, tooriumi ja pliid, nagu näiteks monatsiit, ksenotiim ja apatiit. Need mineraalid on väga tüüpilised ning esinevad erinevates geoloogilistes keskkondades, nagu settekivimites ning erinevates moonde- ja magmakivimites (Allaz *et al.*, 2020).

Kivimite või kivimikomplekside vanuse määramine (nii suhteline kui ka absoluutne) on geoloogias üks olulisemaid ülesandeid. Tänapäevased vanusemäärangud põhinevad valdavalt isotoopsuhetel (näiteks  $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$ ). Kuigi tegemist on väga täpsete ja usaldusväärsete meetoditega, nõuavad need spetsiifilist proovide ettevalmistamist, sealhulgas jahvatamist, lahustamist erinevates hapetes või mõõdetavate mineraalide eraldamist kogukivimiproovidest. Kõik see on aeganõudev ja kulukas ning sageli ei ole võimalik sama proovi enam uuesti analüüsida.

Alternatiiviks on keemiline dateerimine, mis põhineb teadmisel, et U ja Th lagunevad radioaktiivselt Pb-ks. Analüüsi käigus ei mõõdetata isotoopsuhteid, vaid U, Th ja Pb sisaldust ning U/Pb või Th/Pb suhete kaudu arvutatakse hinnangulised vanused. Antud meetod ei nõua proovi lahustamist ega jahvatamist ning sama proovi on võimalik korduvalt mõõta. U-Pb-Th sisalduste mõõtmiseks võib kasutada EDS-i, WDS-i või LA-ICP-MS-i.

Analüüsimiseks eelistatakse mineraale, nagu näiteks monatsiiti, ksenotiimi ja uraniniiti, mis sisaldavad piisavas koguses uraani, tooriumi ja pliid (Bowles, 2015; Suzuki & Adachi, 1991) ning ei sisalda mitteradioaktiivse lagunemise käigus tekkinud Pb-d (*Common lead*) (Allaz *et al.*, 2020; Tu *et al.*, 2019).

Uurimistöös uuriti Uljaste puuraugu F188 intervalli, mis koguti 201,2 m sügavuselt ning mille põhifookus oli erinevatel REE-fosfaatidel (monatsiididel, ksenotiimidel ning uraniniitidel). Uurimistöö eesmärk on hinnata Uljaste (Alutaguse vööndi) monatsiidide, ksenotiimide ja uraniniitide vanuseid, mis võib tulevikus aidata paremini mõista nende kivimite geneesi. Lisaks võrreldakse uurimistöös saadud REE-fosfaatide vanuseid varasemate uraniniitidel põhinevate

hinnangutega (Kont, 2022) ning seostatakse antud tulemused regionaalgeoloogiliste sündmustega.

## 1. Teoreetiline taust

Uraan (U) ja toorium (Th) on mõlemad radioaktiivsed ning lagunevad vaheastmete kaudu pliiks (Pb). U kõige levinum isotoop on  $^{238}\text{U}$ , mis moodustab 99,27% kogu tänapäevasest uraanist ning see laguneb poolestusajaga 4468 Ma, tekitades  $^{206}\text{Pb}$ . Umbes 0,7204% tänapäevasest U-st esineb  $^{235}\text{U}$ -na, mis laguneb  $^{207}\text{Pb}$ -ks poolestusajaga 703,8 Ma. Toorium esineb ainult ühe isotoobina  $^{232}\text{Th}$  ning see laguneb  $^{208}\text{Pb}$ -ks poolestusajaga 14,008 Ma (Bowles, 2015; Condon *et al.*, 2021). Poolestusajad jäävad keskmiselt  $10^9$  a juurde ja lagunemiskonstandid  $10^{-10} \text{ a}^{-1}$ , see annab võimaluse mõõta Maa vanust vahemikus 0,5 Ma – 4,567 Ga. U-Th-Pb dateerimist võimaldab uraani ja plii ning tooriumi ja plii vahekorra arvutamine, kasutades poolestusaegu ja lagunemiskonstante (Allaz *et al.*, 2020).

Keemiliseks dateerimiseks kasutatakse mineraale, kus Pb tekib uraani ja tooriumi radioaktiivse lagunemise käigus ja mis ei sisalda algselt Pb-d. Selle põhjal saab eeldada, et kogu plii tekkis U ja Th lagunemise tulemusel Kirjanduse põhjal on teada, et keemiliseks dateerimiseks on kasutatud mitmeid mineraale, nagu monatsiiti ((Ce,La,Nd,Th)PO<sub>4</sub>), tsirkooni (ZrSiO<sub>4</sub>), ksenotiimi (YPO<sub>4</sub>) (Suzuki & Adachi, 1991), uraniniiti (UO<sub>2</sub>) (Bowles, 2015), titaniiti (CaTiSiO<sub>5</sub>), baddeleiti (ZrO<sub>2</sub>), kaltsiiti (CaCO<sub>3</sub>), kassiteriiti (SnO<sub>2</sub>) ja hematiti (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Condon *et al.*, 2020). Jercinovic ja Williams (2005) kasutasid keemiliseks dateerimiseks toriiti ((Th,U)SiO<sub>4</sub>) ja huttoniiti (ThSiO<sub>4</sub>) (Jercinovic *et al.*, 2012). Hu *et al.* (2013) kasutasid edukalt ka apatiiti (Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F) (Hu *et al.*, 2013). Nendest kõige tavalisemad aktsessoorsed mineraalid on monatsiit, ksenotiim ja apatiit. Need mineraalid on väga tüüpilised erinevates geoloogilistes keskkondades, nagu settekivimites ning erinevates moonde- ja magmakivimites (tüüpiliselt happelistes) (Allaz *et al.*, 2020).

Monatsiit ((Ce,La,Nd,Th)PO<sub>4</sub>, SiO<sub>4</sub>) (Condon *et al.*, 2020) on monokliinse süngooniaga mineraal, mis sisaldab tüüpiliselt kergeid haruldasi muldmetalle (REE) ja seob struktuuri eelistatult pigem Th kui U. Monatsiit ei sisalda tekkeajal endas tüüpiliselt mitteradiogeenset Pb-d (Allaz *et al.*, 2020). Monatsiiti kasutatakse tihti tektooniliste protsesside dateerimiseks, kuna see on stabiilne ka suure rõhu ja temperatuuriga keskkonnas (Barnes *et al.*, 2021).

Ksenotiim (YPO<sub>4</sub>) on haruldane mineraal, mis sisaldab suures koguses raskeid REE-sid ja on tetragonaalse süngooniaga. Erinevalt monatsiidist eelistab ksenotiim struktuuri siduda pigem U-d kui Th-d ega sisalda mitteradiogeenset Pb-d (Allaz *et al.*, 2020). Tegemist on aktsessoorse mineraaliga, mida leidub nii terrigeensetes settekivimites, peliitsetes moondekivimites kui ka graniitides (Liu *et al.*, 2011).

Uraniniit ( $\text{UO}_2$ ) on üks peamisi uraani sisaldavaid mineraale. Koos kofiniidiga kasutatakse seda sageli uraanimaagi dateerimiseks, kuna mineraal sisaldab tavaliselt suures koguses U-d ning ei sisalda või sisaldab väga väikeses koguses mitteradiogeenset Pb-d (Tu *et al.*, 2019).

## 2. Geoloogiline taust

Eesti kristalne aluskord koosneb Paleo- ja Mesoproterosoikumi magma- ning moondekivimitest, mis moodustavad Svekofenni provintsi (Lõuna-Soome) jätku ja on osa Fennoskandia kilbist. Paleoproterosoikumi-aegsete 1,8–1,9 miljardit aastat vanade tard- ja moondekivimite näol on tegemist Svekofenni orogeneesi läbinud saarkaarte subduktsioonitingimustes tekkinud kivimitega, millesse on tunginud 1,5–1,6 miljardi aasta vanused Mesoproterosoikumi intrusioonid (graniitsed plutoonid). Sellele järgnes umbes miljard aastat kestnud kulutusprotsess, mis kestis kuni Ediacara ajastuni, andes aluskorra kristalsetele kivimitele lõunasuunalise kalde (Koppelmaa, 2002). Kristalsetel kivimitel lasub 100–750 meetri paksune Paleosoikumi ja Neoproterosoikumi sette kivimite kiht (Kirs *et al.*, 2009; Koppelmaa, 2002; Soesoo *et al.*, 2020).

Eesti aluskorra kivimid saab jagada kaheks: Põhja-Eesti amfiboliitse faatsiese kivimid (kivimid, mis on sarnased Lõuna-Soome omadega) ja Lõuna-Eesti granuliitse faatsiese kivimid. Neid kahte eraldab Paldiski–Pihkva tektooniline rikkevöönd (Koppelmaa, 2002; Soesoo *et al.*, 2020). Eesti aluskorda jagatakse nende kahe faatsiese geokeemilistele ja petrograafilistele andmetele tuginedes omakorda kuueks vööndiks: Lääne-Eesti, Tallinna, Alutaguse, Jõhvi, Tapa ja Lõuna-Eesti vöönd (Soesoo *et al.*, 2004).

Uljaste puursüdamik asub Alutaguse vööndis. Alutaguse vööndit iseloomustab järkjärguline üleminek amfiboliitsetest granuliitseteks faatsieseks (Bogdanova *et al.*, 2015) tingimustes, kus rõhk on vahemikus 3–6 kbar ja temperatuur on 600–800°C (Hölttä & Klein, 1991; Koistinen, 1996).

Alutaguse vööndi kivimid on tüüpiliselt erineva välimuse ja koostisega alumiiniumirikkad vilgugneissid, sulfiid-grafiitgneissid ja biotiit-plagioklassgneissid (kus domineerivad biotiit, kordieriit, granaat ja sillimaniit). Vilgugneisside puhul on arvatud, *et algselt* on olnud tegemist valdavalt setteliste turbidiitidega, mis on läbinud moonde (Soesoo *et al.*, 2020). Tüüpilised vilgugneissides esinevad aktsessoorsed mineraalid on tsirkoon, apatiit, monatsiit, spinell, turmaliin, hematit ja kalkopüriit. Lisaks vilgugneissidele esineb Alutaguse vööndis

pürokseengneisse, mis on seotud metavulkaniitidega, ning happelisi ja aluselisi intrusioone (Bogdanova *et al.*, 2015; Kirs *et al.*, 2009; Puura *et al.*, 2004; Soesoo *et al.*, 2020).

### 3. Materjalid ja meetodid

Töös kasutatud materjal on kogutud Uljaste F188 puursüdamikust 201,2 m sügavuselt ja see iseloomustab Alutaguse vööndit. Puurauk asub Ida-Virumaal Lüganuse vallas Uljaste külas (joonis 1). F188 puursüdamik on 351,1 m pikk ja asub koordinaatidel X: 6582601, Y: 657272 (ruumiamet, s.a.).



**Joonis 1.** F188 puursüdamiku asukoha reljeefkaart ja asukoht terve Eesti kaardil (X-GIS 2.0 [geoloogia50k], s.a.).

Antud uurimistöös kasutatud proov esindab grafiitgneisside intervalli, millele on iseloomulikud mineraalid nagu kvarts, K-päevakivi, pürrotiin ning vähemal määral biotiit, plagioklass, püriit ja grafiit (Kont, 2022).

### 3.1. U-Th-Pb keemiline dateerimine

Meetod põhineb teadmisel, et looduslik uraan ja toorium sisaldavad radioaktiivseid isotoope (tüüpiliselt  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  ja  $^{232}\text{Th}$ ), is lagunevad pliiks (uraan laguneb  $^{206}\text{Pb}$ -ks ja toorium  $^{208}\text{Pb}$ -ks).

Vanuste arvutamiseks kasutati järgmisi väärtusi ja konstante:

$^{238}\text{U}$  poolestusaeg on  $t_{1/2} = 4,47 \cdot 10^9$  a ja lagunemiskonstant  $9,8285 \cdot 10^{-10}/\text{a}$  ( $\pm 0,11\%$ ).

$^{238}\text{U}$  poolestusaeg on  $t_{1/2} = 7,07 \cdot 10^8$  a ja lagunemiskonstant on  $1,55125 \cdot 10^{-10}/\text{a}$  ( $\pm 0,14\%$ ).

$^{232}\text{Th}$  poolestusaeg on  $t_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$  a ja lagunemiskonstant on  $4,9475 \cdot 10^{-11}/\text{a}$  ( $\pm \sim 1\%$ ).

Plii hulka, mis on tekkinud  $^{238}\text{U}$  ja  $^{232}\text{Th}$  lagunemisel, saab arvutada järgmise kahe valemi abil (Condon *et al.*, 2020):

$$^{206}\text{Pb} = ^{238}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1) \quad (\text{Valem 1})$$

$$^{208}\text{Pb} = ^{232}\text{Th}(e^{\lambda_{232}t} - 1) \quad (\text{valem 2})$$

Kasutades Pb ja  $^{238}\text{U}$  koguseid (arvutuses kasutatakse aatommasse), saab välja arvutada aja ehk  $t$  (Ma):

$$t = \frac{\ln\left(\frac{\text{Pb}}{^{238}\text{U}} + 1\right)}{\lambda_{\text{U}238}} \quad (\text{Valem 3})$$

Mineraalides, kus  $^{232}\text{Th}$  laguneb Pb-ks, kasutatakse tooriumi puhul järgmist valemit:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{\text{Pb}}{^{232}\text{Th}} + 1\right)}{\lambda_{\text{Th}232}}. \quad (\text{Valem 4})$$

Teades vanust ( $t$ ), saab leida radioaktiivsel lagunemisel tekkinud Pb koguse järgmiselt:

$$\text{Pb} = ^{238}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1) + ^{235}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1) + ^{232}\text{Th}(e^{\lambda_{232}t} - 1). \quad (\text{Valem 5})$$

Kahjuks on antud valem transtsendentne, mis tähendab, et seda ei ole võimalik algebraliselt teisendada kujule  $t = \text{mingi funktsioon}$ . Sellest probleemist möödahiilimiseks on kaks meetodit (Bowles, 2015):

1. Vanuse  $t$  hindamiseks kasutatakse U ja Th koguste põhjal tekkinud Pb hulka. Valemi 5 abil leitud Pb kogust võrreldakse EDS-mõõtmistel saadud Pb kogusega. Kui saadud väärtused ei lange kokku, tuleb vanust vastavalt korrigeerida, suurendades või vähendades  $t$  väärtust väikeste sammude võrra, kuni saavutatakse Pb-sisalduste

kokkulangevus. Vanuse t hinnang võib põhineda uuritava piirkonna geoloogial, varasematel vanusemäärangutel või U ja Th sisaldustel. Th-sisaldust võib ignoreerida juhul, kui tooriumi kogus ei ületa oluliselt uraani kogust, kuna Th poolestusaeg on ligikaudu kolm korda pikem kui U-1 ning seetõttu on radioaktiivsest lagunemisest tekkinud Pb kogus väiksem. Antud meetodit kasutatakse juhul, kui Th/U suhe ei ületa 3,1.

2. Seda meetodit kasutatakse juhul kui Th/U on üle 3,1. Sellisel juhul teisendatakse ühe elemendi kogused selliseks koguseks, mis tekitaks samaväärse koguse Pb. Praktikas teisendatakse väiksem kogus suuremaks. Seega kui Th/U suhe ületab 3,1 on mõistlik teisendada U ekvivalentseks Th-ga. Kui Th/U suhe on väiksem kui 3,1, siis tuleks teisendada Th ekvivalentseks U kogusega (Bowles, 2015).

Bowlesi (2015) järgi annab SEM-keemiline dateerimine täpsemaid tulemusi, kui uuritavate U-d ja Pb-d sisaldavate mineraalide vanused jäävad järgmistesse vahemikesse: uraniniitide puhul 2 Ma kuni 700–1000 Ma ning monatsiidide puhul minimaalselt 50–100 Ma kuni ~3000 Ma. Kontrollitud ja heade mõõtmistingimuste korral soovitatakse monatsiidide vanusevahemikus 200–600 Ma kasutada mõõtmisviga  $\pm 10$ –40 Ma ning vanusevahemikus 2000–3000 Ma mõõtmisviga  $\pm 40$ –80 Ma (Bowles, 2015).

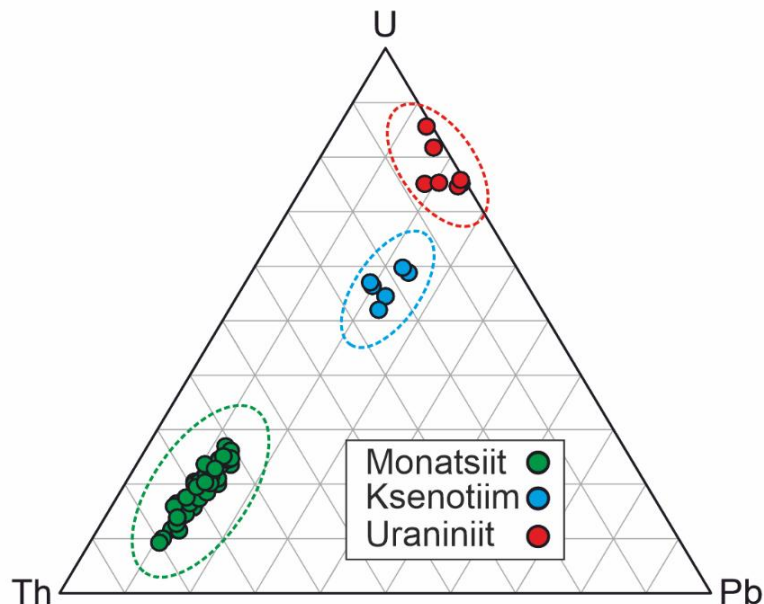
### **3.2. SEM analüüs**

Skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) analüüsiks valiti Kondi magistritöö (2022) põhjal kõrge U- ja Pb-sisaldusega intervall. Kuna proov oli aastate jooksul tugevalt oksüdeerunud, valati  $\sim 7 \times 5$  cm suurune proov EPO-sse ja poleeriti käsitsi, kasutades erineva terasuurusega lihvimispulbreid. Analüüsimiseks kasutati ZEISS EVO 15MA elektronmikroskoopi, mis on varustatud Oxford Ltd. AZtec X-MAX80 energiadiispersiivse (EDS) detektoriga. Proovid kaeti Agar süsi/grafiit-katjaga ja analüüsid viidi läbi kõrgvaakumkeskkonnas.

Vanusehistogrammi optimaalse tulpade arvu leidmiseks kasutati Freedman-Diaconise reeglit, mis aitab minimeerida erinevusi empiiriliste andmete ja tõenäosusjaotuse vahel. Arvutuste tegemiseks kasutati programmi RStudio (*R Core Team. (2025), s.a.*).

## 4. Tulemused

Keemiliseks dateerimiseks kasutati kokku 66 mineraalitera. Nendest 54 monatsiidi (Ce,La,Th)PO<sub>4</sub>REE, 6 uraniniidi (UO<sub>2</sub>) ja 6 ksenotiimi (YPO<sub>4</sub>REE) tera. Analüüsitud terade keemiline koostis on välja toodud lisas 1, lisas 2 ja lisas 3 ning joonistel 4, 5 ja 6.



**Joonis 2.** Th-U-Pb kolmnurkdiaagramm. Näitab, kuidas varieeruvad Th, U ja Pb sisaldused kolmes keemiliseks dateerimiseks kasutatavas mineraalis.

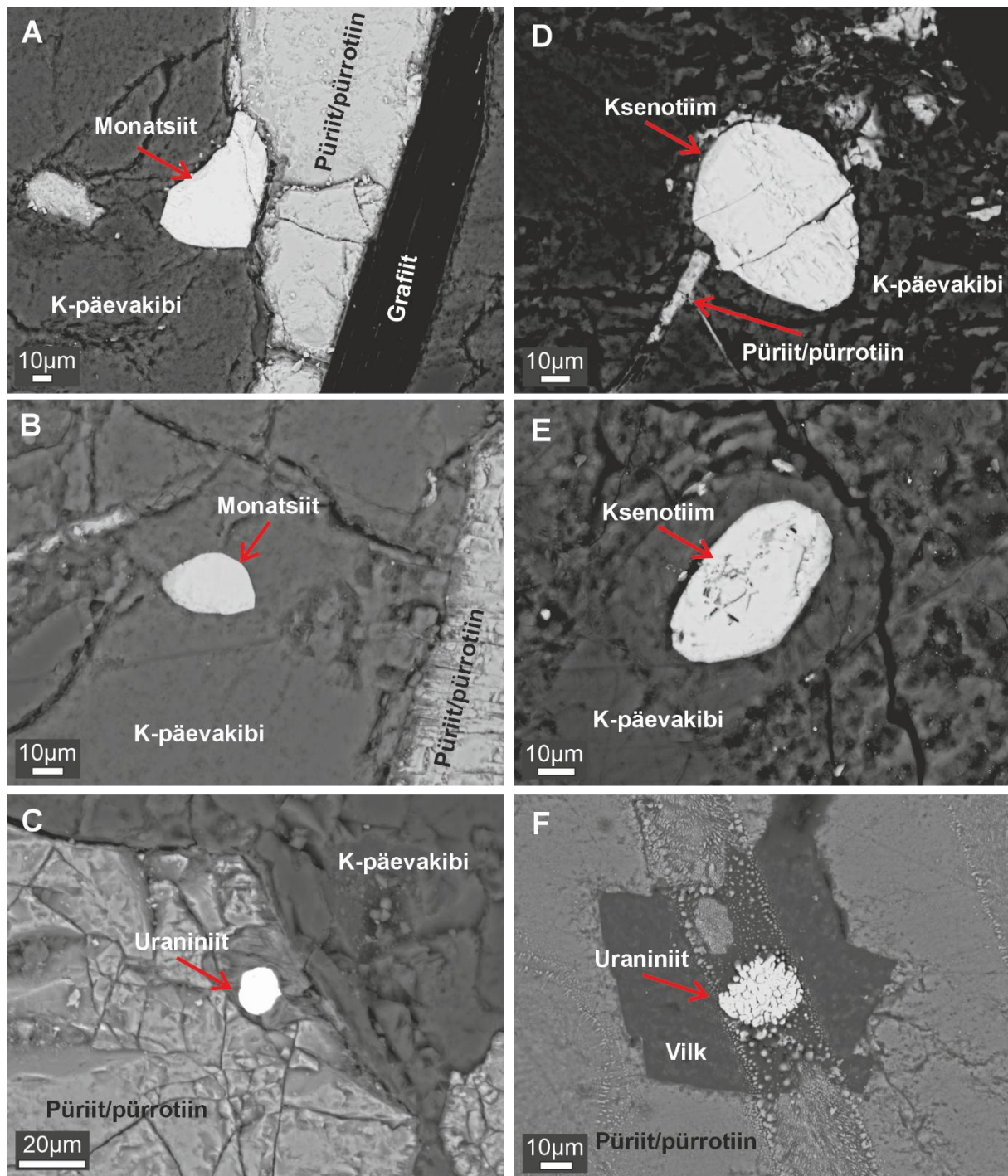
### 4.1. Monatsiit

Esinduslikud monatsiiditerad ja kõrgema sisaldusega elementide elementkaardid on välja toodud joonistel 4A ja 4B. Uuritud proovis olid monatsiiditerad kõige levinumad. Terade suurus jäi vahemikku 10–150 µm, keskmiselt 49 µm (joonised 3A ja 3B). Monatsiididel esines suur kujuline varieeruvus: leidis ümaraid, ovaalseid, korrapäratuid ja selgemate kristallitahkudega teri. Kõige sagedamini paiknes monatsiit püriidi (FeS<sub>2</sub>) ja K-päevakivi sees, harvem grafiidis. Terad paiknesid sageli rühmiti – see tähendab, et oli piirkondi, kus esines korraga rohkem monatsiiditerasid, samas kui leidis piirkondi, kus neid ei tuvastatud üldse.

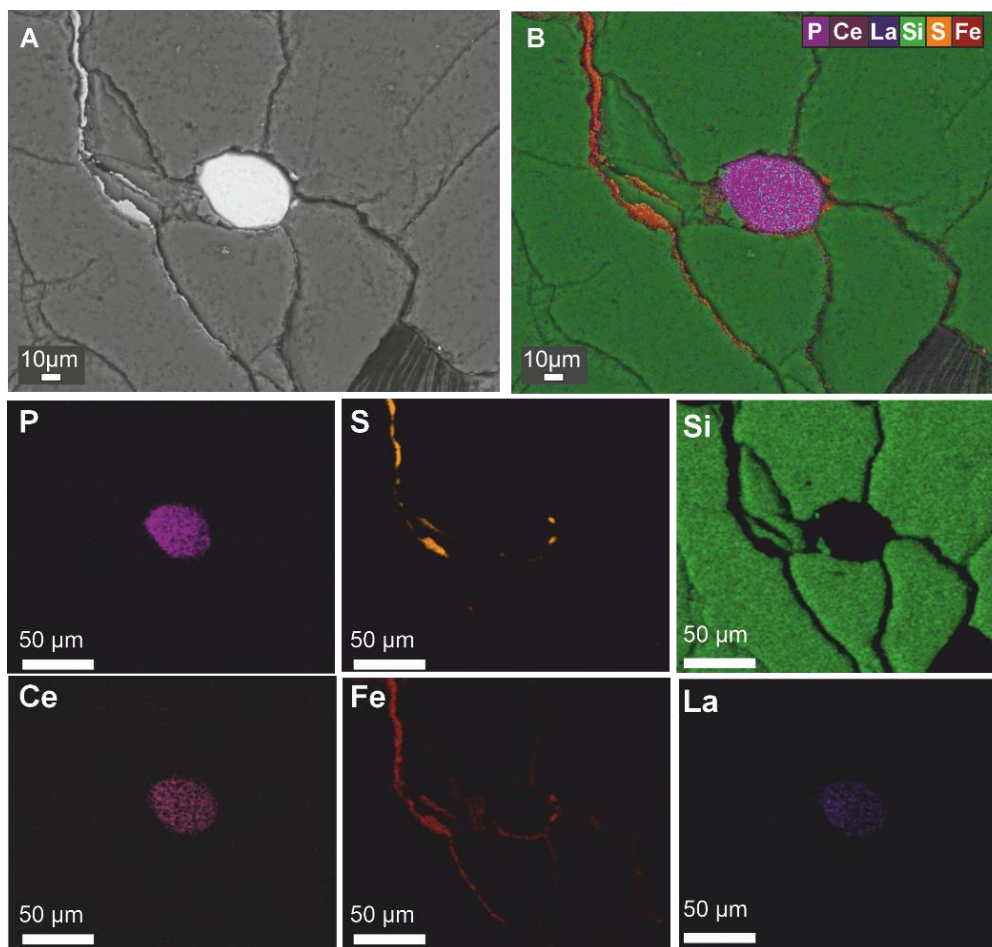
Mõõdetud monatsiidides varieerus fosforisisaldus 8,3–13,3%, keskmiselt 12,8%, lantaanisisaldus 9,9–13,9%, keskmiselt 11,5%, tseeriumisisaldus 20,0–26,7%, keskmiselt 22,6%, neodüümisaldus 8,6–11,0%, keskmiselt 9,9%. Lisaks neile mõõdeti madalates

kogustes Y, Pr, Sm, Gd ja Dy; nende elementide sisaldused jäid alla 3%. Y keskmine sisaldus oli 2,8%, Pr 2,5%, Sm 1,8%, Gd 1,5% ja Dy sisaldus 0,9%.

Monatsiidide tooriumisisaldus oli võrreldes Pb ja U-ga suurim: Th-sisaldus vahemikus 3,3–5,8%, keskmiselt 4,5%; U 0,6–2,0%, keskmiselt 1,3% ning Pb 0,4–1,2%, keskmiselt 0,8%. Th/U suhe jäi vahemikku 2,3–8,6 ja oli keskmiselt 3,7 (lisa 1).



**Joonis 3.** Esinduslikud U-Pb-Th keemilise dateerimise jaoks kasutatud uraniniidi-, ksenotiimi- ja monatsiiditerad. Üldjuhul on uuritud terad ümardunud servadega (C–F), harvem nurgelisemad (A–B). F illustreerib vagu ja uraniniidi kahjustatud pinda pärast LA-ICP-MS analüüsi.



**Joonis 4.** Tagasihajunud elektronide kujutis (A) ja elementide kaart (B). Kvartsi sees (Si) on keskel monatsiiditera (P, Ce ja La), millest vasakult jookseb mööda püriidi/pürrootiini (S ja Fe) soon.

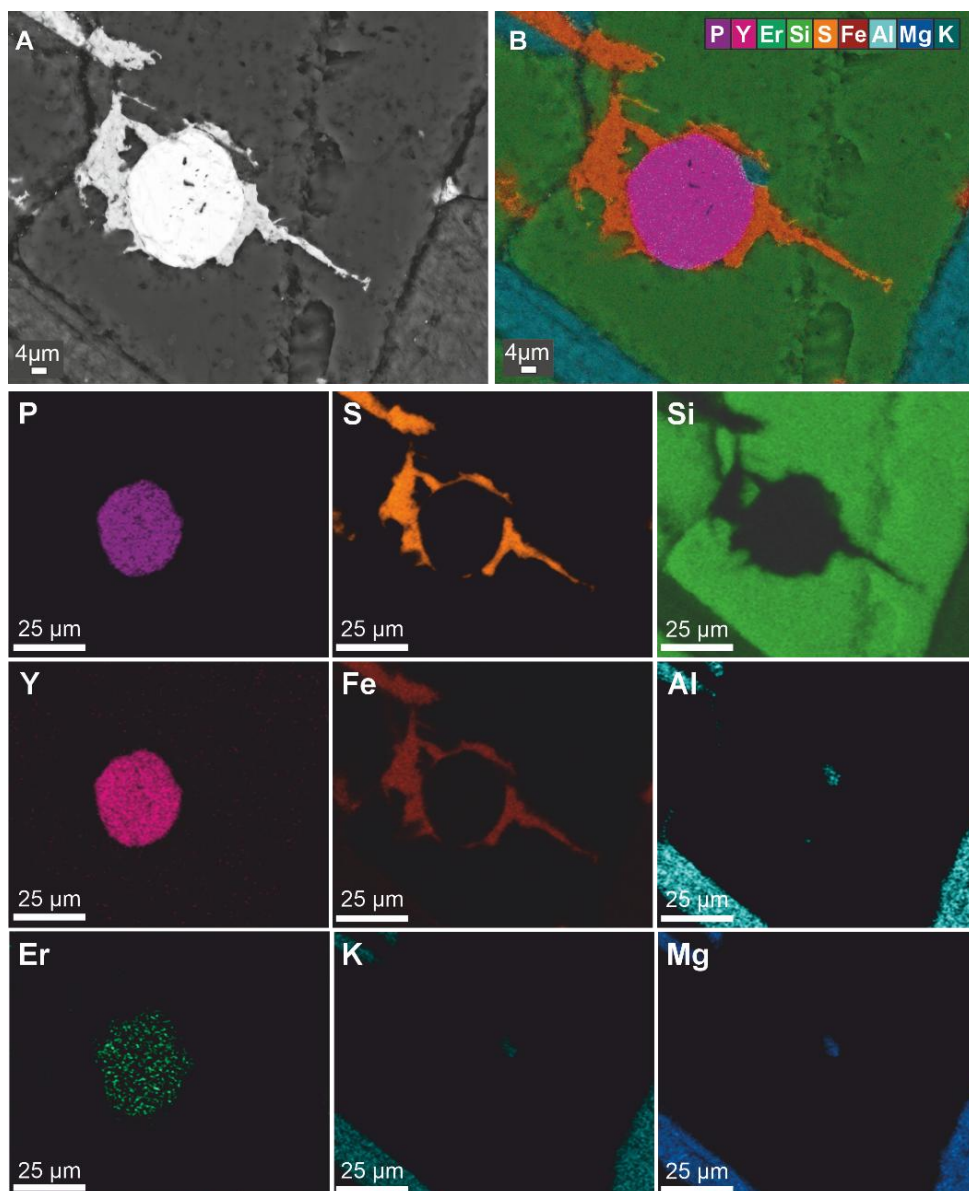
#### 4.2. Ksenotiim

Esinduslikud ksenotiimiteerad ja suurema sisaldusega elementide elementkaardid on välja toodud joonistel 5A ja 5B. Ksenotiimiteeri leiti kõige vähem. Terade suurus jäi vahemikku 10–50 μm ning keskmine suurus oli 27 μm. Teri esines peamiselt ovaalse ja ümara kujuga (joonised 3C ja 3D). Mineraaliterad olid kogu proovis suhteliselt ühtlaselt jaotunud.

Ksenotiimis oli fosforisisaldus suurem kui monatsiidis, sisaldused jäid vahemikku 13,8–14,9%, keskmiselt 14,5%. Kõige suurema sisaldusega element on Y, mille sisaldus oli 31,8–34,1%, keskmiselt 33%. Kergeid REE-sid, nagu La, Ce ja Pr, ei tuvastatud ning Nd ja Sm summaarne sisaldus oli 0,7–0,9%, keskmiselt 0,8%. Rasketest REE-dest esines kõige vähem Ho-d, mida oli keskmiselt 1,1%, ja suurim oli Dy sisaldus, keskmiselt 4,9%. Lisaks sisaldasid ksenotiimid

veel Yb-d keskmiselt 4,6% ja Er-i keskmiselt 4,2%. Tm-i ja Lu keskmine sisaldus oli mõlemal 0,7%.

Ksenotiimis jäid pliisisaldused vahemikku 0,5–0,8%, keskmiselt 0,7%, ja Th-sisaldused olid monatsiidiga võrreldes madalamad, jäädes vahemikku 0,3–0,9%, keskmiselt 0,6%. Uraanisisaldused varieerusid vahemikus 1,54–3,2%, keskmiselt 2%. Th/U suhe jäi vahemikku 0,1–0,5, olles keskmiselt 0,3 (lisa 2).

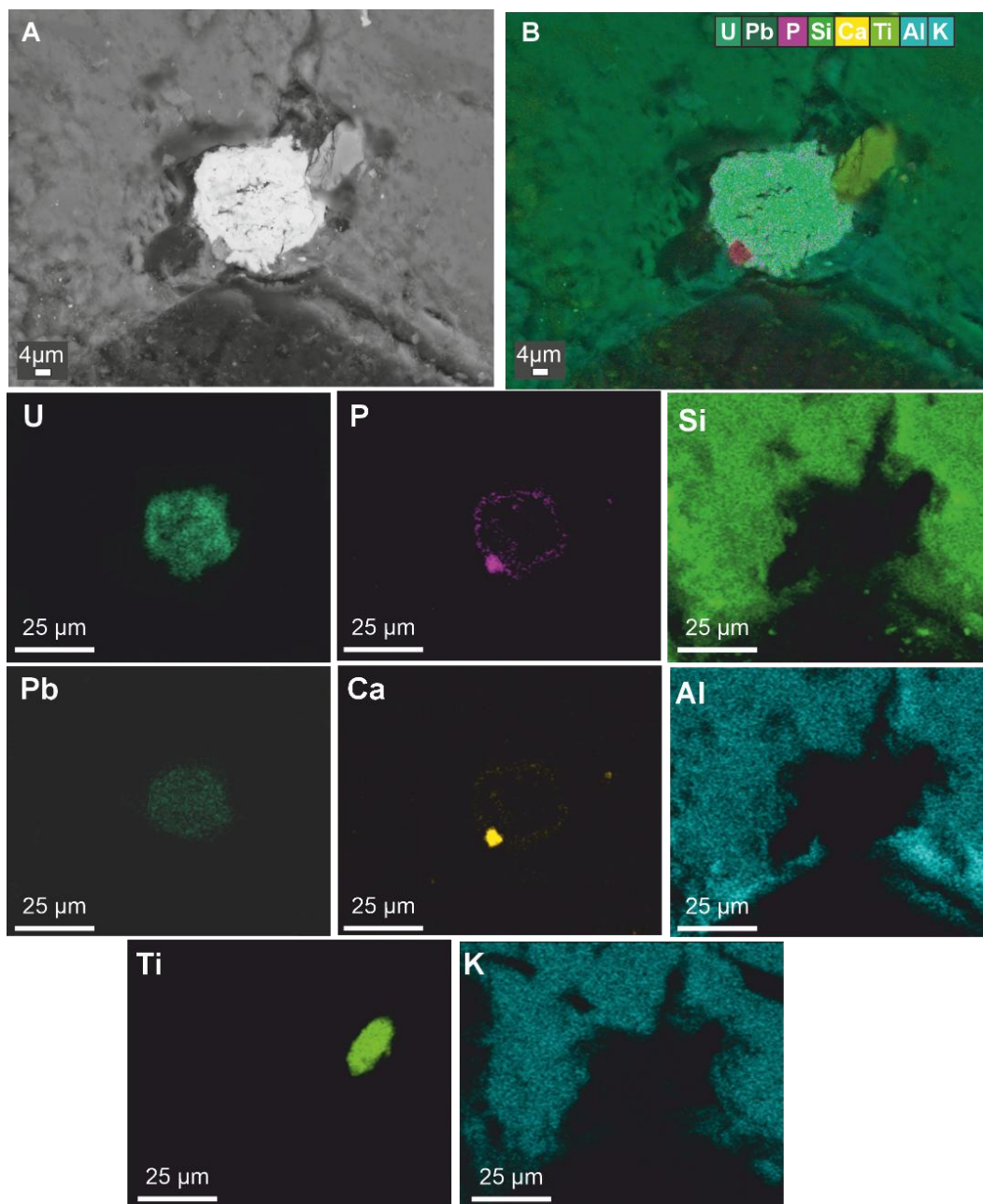


**Joonis 5.** Tagasihajunud elektronide kujutis (A) ja elementide kaart (B). Kvartsi sees (Si) keskel on ksenotiimi tera (P, Y, Er), mis asetseb püriidi/pürroitiini (S ja Fe) soones. All paremal ja vasakul asetseb vilk (K, Al, Mg).

### **4.3. Uraniniit**

Esinduslikud uraniniiditerad ning kõrgema sisaldusega elementide jaotused ja elemendikaardid on välja toodud joonistel 6A ja 6B. Uraniniiditerad olid kõige väiksemad, nende läbimõõdud jäid vahemikku 10–25 µm ning keskmine suurus oli 19 µm. Kõik terad olid ümara kujuga (joonised 3C ja 3F), kuid esines ka terasid, millel ilmnisid reaktsiooniäärised (mineraali serva tekkinud fosfaatne ääris, joonised 6B, 6P ja 6Ca).

Uraniniidis on U-sisaldus kõige suurem võrreldes monatsiidi ja ksenotiimiga. U-sisaldused jäid vahemikku 51,1–69,1%, keskmiselt 58,1%. U kõrval sisaldab mineraal märkimisväärses koguses Pb-d (10,5–19,6%, keskmiselt 15,2%). Seevastu Th-sisaldused on madalad: 0,5–2,8%, keskmiselt ainult 1,1%. Th/U suhe oli kõige väiksem võrreldes teiste mineraalidega, see oli keskmiselt 0,02 ning selle minimaalne ja maksimaalne väärtus olid väga erinevad: 0,007–0,05 (lisa 3).



**Joonis 6.** Tagasihajunud elektronide kujutis (A) ja elementide kaart (B). Vilgu sees (Si, Al ja K) on keskel uraniidi tera (U ja Pb), mille ümber on tekkinud fosfaatne reaktsiooniääris (P ja Ca). Uraniidi tera ülemisel paremal küljel on rutiil (Ti).

#### **4.4. LA-ICP-MS-i analüüs**

Lisaks SEM-EDS-analüüsile katsetati täpsemate U, Th ja Pb sisalduste määramiseks ka LA-ICP-MS-meetodit. Analüüside algfaasis ilmnes aga mitmeid probleeme. Esiteks oli laserseadme kaamera abil väga keeruline või praktiliselt võimatu leida proovist üles väikesed, ligikaudu 10–50 μm suursi terasid. Teiseks, kuigi laser ei hävita proovi täielikult, jätab see

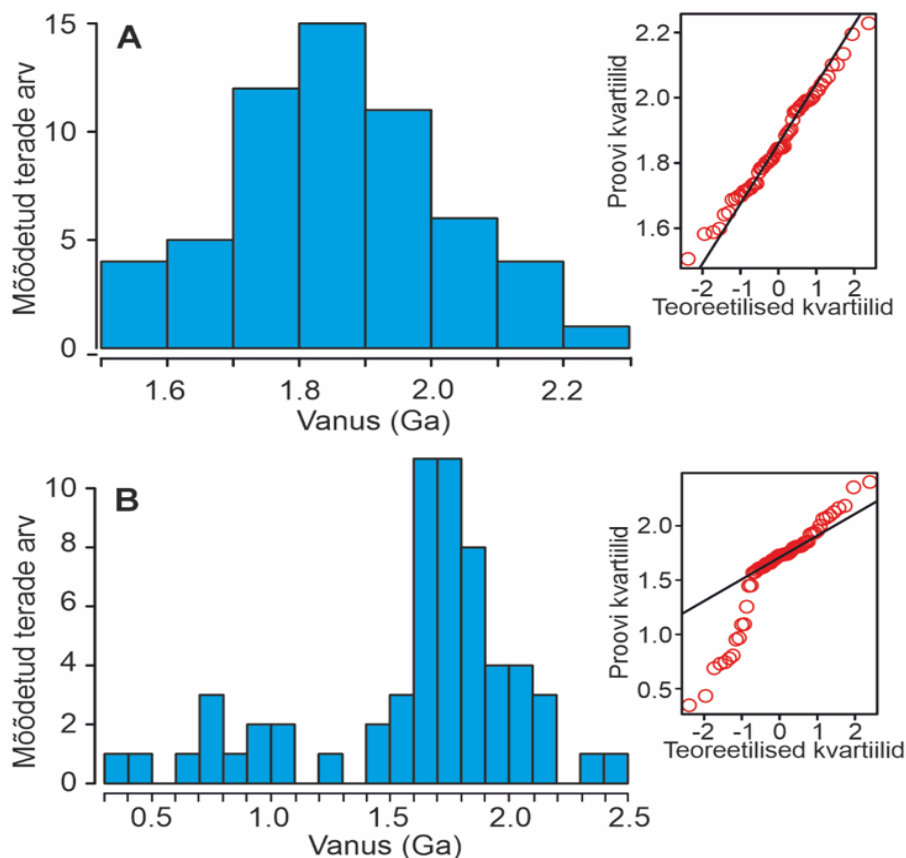
proovi pinnale selge vao ning kahjustab uuritava tera pinda (joonis 3F). Seetõttu käesolevas töös LA-ICP-MS-meetodit ei kasutatud.

#### 4.5. Arvutatud vanused

Arvutatud vanused jagati kahte rühma: ksenotiimi ja monatsiidi terade vanused (joonis 7A) ning käesolevas töös määratud kuue uraniniiditera vanused koos Kondi (2022) uraniniitide (kokku 48 tera) vanustega (joonis 7B).

Ksenotiimi ja monatsiidi vanuste histogrammil esineb üks selge maksimum, mis viitab normaaljaotusele. Terae vanused jäid vahemikku 1,4–2,3 Ga; kõige esinduslikum oli vanusevahemik 1,7–2,0 Ga. Maksimumvahemik on 1,8 kuni 1,9 Ga (joonis 7A).

Uraniniitide vanuste histogramm viitab pigem mitme erineva vanusega populatsiooni esinemisele (joonis 7B). Uraniniitide vanused jäävad vahemikku 0,3–2,5 Ga. Enamiku terade vanused jäävad vahemikku 1,6–1,9 Ga. Maksimum jääb vahemikku 1,7–1,8 Ga. Samas, erinevalt monatsiidide ja ksenotiimide histogrammist, esineb ka vanuseid vahemikus 0,3–1,1 Ga (joonis 7B).



**Joonis 7.** Histogramm A kujutab monatsiidi ja ksenotiimi põhjal arvutatud vanuseid. Histogramm B näitab käesolevas töös mõõdetud uraniniitide tulemusi, mis on esitatud koos Kondi (2022) andmetega.

## 5. Arutelu

### 5.1. Probleemid U-Th-Pb keemilise dateerimisega

Esiteks tuleks olla kindel, et proovides mõõdetakse ainult radioaktiivse lagunemise käigus tekkinud Pb-d (Bowles, 2015). See tähendab, et U-Th-Pb keemilise dateerimise üheks eelduseks on, et analüüsitud mineraal ei sisaldanud tekkimise hetkel juba Pb-d. Juhul kui uuritav mineraal sisaldab lisaks radioaktiivse lagunemise käigus tekkinud Pb-le muud pliide, on automaatselt U/Pb või Th/Pb vahekord vale ja Pb sisaldus suurem, mis tähendab, et saadud vanused on ülehinnatud (vanemad). Mitteradiogeenne plii („common lead“) on väga tavaline mineraalides, mis sisaldavad U-d, Th-d ja Pb-d. Keemilise dateerimise seisukohalt on see üks suuremaid probleeme. See on ka põhjus, miks eelistatakse mineraale, mis tüüpiliselt ei sisalda mitteradiogeenset pliidi, näiteks monatsiiti, tsirkooni ja baddeleiiti (Chew *et al.*, 2014).

Teiseks võivad vanemad Th ja U sisaldavad (uraniniidi, tsirkooni ja monatsiidi) terad oma radioaktiivse iseloomu tõttu laguneda osaliselt või isegi mõningatel juhtudel muutuda täielikult amorfseks (Pabst, 1952). Selline radioaktiivsest lagunemisest tulenev kristallstruktuuri lagunemine muudab Pb liikuvaks ja põhjustab Pb vähenemist Th ja U suhtes, muutes arvutatud vanused nooremaks (Bowles, 2015). Eelpool mainitu tunnuseks on Pb sisaldavate mineraalide äärste tekkimine ümber uraniniidi, tsirkooni või monatsiidi tera. Või muutub kristalli väliskuju deformeerunuks või häguseks ebakorrapäraseks massiks. Bowles (2015) väitis, et uraniniitide puhul, mille vanus on üle 700–1000 Ma, oli arvutatud vanus 15–20% noorem võrreldes isotoopide põhjal mõõdetud vanusega (Bowles, 2015).

Kolmandaks, hapnikurikkas keskkonnas muutub U liikuvaks, mis mõjutab jällegi U/Pb vahekorda, mõjutades keemilise dateerimise tulemusi. Selle vältimiseks soovitatakse analüüsida teri, mis on silikaatses maatriksis (Timón-Sánchez *et al.*, 2019). Uraniniit on väga tundlik sekundaarsete protsesside, näiteks hüdrotermalsete muutuste suhtes (Tu *et al.*, 2019).

## 5.2. Alutaguse vanused

Eesti kristalne aluskord esindab ühte kõige vähem mõistetud osa Ida-Euroopa platvormist. Kuigi Eesti kristalse aluskorra vööndite vanused on üldjoontes teada, ei ole metamorfismi täpne vanus ega metamorfismi käigus ja sellele järgnenud sündmuste vanused alati selged (Soesoo *et al.*, 2006). Alutaguse vöönd kujutab endast piirkonda, mille kohta puuduvad varasemad isotoopidel põhinevad dateeringud (Kirs *et al.*, 2009). Kuigi täpsed vanused Alutaguse vööndi kohta puuduvad, võib seda pidada üheks vanimaks Eesti aluskorra vööndiks, kui see tekkis Lapi-Savo orogeenis (1,91–1,93 Ga) (Kirs *et al.*, 2009).

Kirs *et al.* (2009) töid lähipiirkonna dateeringutele ja geofüüsikalistele mõõtmistele tuginedes välja, et alutaguse vööndi moondeprotsessid võivad olla seotud Fennia orogeneesi käigus toimunud riftistumisega 1,88–1,9 Ga tagasi (Kirs *et al.*, 2009). Suure tõenäosusega kuulus Alutaguse vöönd sellel ajal veel Tallinna vööndi idaossa. Või on antud kivimid seotud hoopis Lapi-Savo orogeneesi arenguga, mille puhul jääks moonde vanus vahemikku 1,91–1,93 Ga (Kirs *et al.*, 2009). Sarnasele järeldusele jõudsid ka Bogdanova *et al.* (2015), kes lisaks märkisid, et alutaguse metasetted tekkisid settebasseinis, mis võis ulatuda Peterburi lähistelt Laadoga järveni (Bogdanova *et al.*, 2015). Settimine toimus hinnanguliselt 1,90–1,96 Ga tagasi (Lahtinen *et al.*, 2010; Melezhik *et al.*, 2013).

Kondi (2022) magistritöös katsetati U-Pb keemilist dateerimist Uljaste puursüdamiku uraniniitidel. Hinnangulised vanused jäid vahemikku 1,56–1,86 Ga ning kõige esinduslikum vanusevahemik oli 1,7–1,78 Ga. Nende tulemuste alusel järeldati, et saadud vanused korreleeruvad Svekofennia orogeneesi lõppfaasiga ja/või postorogeensete tektooniliste sündmustega.

Käesoleva töö raames analüüsiti uuesti Kondi (2022) töö käigus kogutud uraniniitide U-Pb keemilise dateerimise andmeid ning võrreldi neid monatsiidi ja ksenotiimi tulemustega. Uute tulemuste põhjal jäävad uraniniitide vanused valdavalt vahemikku 1,6 kuni 1,9 Ga ning statistiliselt kõige esinduslikum vahemik on 1,6–1,7 Ga (joonis 7B), mis erineb mõnevõrra Kondi interpretatsioonidest. Seevastu monatsiididel ja ksenotiimidel põhinevad hinnangud jäävad peamiselt vahemikku 1,7 kuni 2 Ga ning statistiliselt kõige esinduslikum vahemik on 1,8–1,9 Ga (joonis 7A).

Bowlesi (2015) järgi soovitatakse monatsiidide puhul vanusevahemikus 2,0–3,0 Ga kasutada mõõtmisviga  $\pm 40$ –80 Ma (Bowles, 2015). Kuna käesolevas töös kasutati SEM-EDS-mõõtmisi, mille täpsus on madalam võrreldes WDS-i või LA-ICP-MS-iga, võib käesolevate tulemuste

mõõtmisveaks hinnata  $\pm 80$  Ma. Saadud tulemused ( $1,8\text{--}1,9 \pm 0,08$  Ga) langevad hästi kokku Kirsi *et al.* (2009) ning Bogdanova *et al.* (2015) pakutud Lapi-Savo orogeneesi vanustega.

Uraniniitidel põhinevad keskmiselt nooremad vanused ( $1,6\text{--}1,8$  Ga) koos vanustega, mis jäävad vahemikku 0,3 kuni 1,1 Ga, viitavad sellele, et uraniniidi kristallid on radioaktiivse lagunemise tõttu osaliselt lagunema hakanud või mõnel juhul isegi muutunud täielikult amorfseks. Fosfaatsete äärise teket (vaata jooniselt 6 P- ja Ca-elementkaarti) ja uraniniidi terade häguseks (amorfseks) muutumist kirjeldab ka Kont (2022). Selline radioaktiivsest lagunemisest tulenev kristallstruktuuri lagunemine muudab Pb liikuvaks ning põhjustab vanusehinnangute näilist noorenemist (Bowles, 2015). Bowles (2015) tõi esile, et üle 700–1000 Ma vanuste uraniniitide arvutatud vanused võivad olla 15–20% nooremad võrreldes isotoopmeetoditega saadud vanustega. Antud võrdluste põhjal võib järeldada, et Uljaste kivimite täpseks keemiliseks dateerimiseks on otstarbekam eelistada monatsiiti ja ksenotiimi uraniniidile.

## Kokkuvõtte

Uurimistöö keskendus Uljaste puuraugu F188 aktseessorsete mineraalide – monatsiidi, ksenotiimi ja uraniniidi U-Pb-Th keemilisele dateerimisele.

Analüüsi tulemuste põhjal saame öelda, et uraniniitidel põhinevad vanusehinnangud jäävad valdavalt vahemikku 1,6 kuni 1,9 Ga, kusjuures statistiliselt kõige esinduslikum on vahemik 1,6–1,8 Ga. Monatsiidi/ksenotiimi keemilise dateerimise tulemused jäävad peamiselt vahemikku 1,7–2,0 Ga ning kõige esinduslikum vanusevahemik on 1,8 kuni 1,9 Ga. REE fosfaatidel põhinevad tulemused langevad hästi kokku Lapi-Savo orogeneesi arenguga (1,91–1,93 Ga).

Uraniniitide dateerimisel tuleb arvestada radioaktiivse lagunemise mõjuga, mis võib muuta saadud vanused ~15–20% nooremaks. Samuti võivad esineda väga madalad, ekstreemsed vanusehinnangud. Töö tulemuste põhjal võib järeldada, et monatsiididel ja ksenotiimidel põhinevad vanusehinnangud on usaldusväärsemad kui uraniniitidel põhinevad tulemused.

Lisaks uraniniidile, monatsiidile ja ksenotiimile võiks tulevikus uurida ka tsirkooni ning apatiidi keemilist dateerimist. Samuti oleks mõistlik laiendada käesolevas töös uuritud intervalli kogu puursüdamikule ning teistele juba varem dateeritud puuraukudele parema võrdlusmomendi saamiseks.

# **U–Th–Pb chemical dating of monazite, xenotime, and uraninite from the Uljaste drill core**

**Elerin Kinsiver**

## **Summary**

The aim of the research is to estimate the ages of monazites, xenotimes, and uraninites of the Uljaste (Alutaguse zone), which may help to better understand the genesis of these rocks in the future. In addition, the ages of REE phosphates obtained in the research are compared with previous estimates based on uraninites (Kont, 2022) to relate these results to regional geological events.

The study used SEM-EDS to determine the chemistry of the minerals. For chemical dating, the formulas outlined by Bowles were used, which contain the radioactive decay constants and the U/Th ratio. If the U/Th ratio is above 3.1, then Th or U was transferred to fit the Pb content that has formed through radioactive decay; but if the ratio was below 3.1, then the amount of lead was transferred to fit with the age and possibility of Pb produced by radioactive decay.

All minerals had sufficient uranium, thorium, and lead contents to calculate the ages of the rock formations. U/Th contents were above 3.1 only in the case of a few monazites, meaning that mostly only one method was used to calculate the ages. The ages were grouped into monazite/xenotime, the uraninites found in the research, and Kondi uraninites. The ages of monazite/xenotime were 1.7–2.0 Ga and the ages of the uraninites were 1.7–1.8 Ga and 0.3–1.1 Ga.

The work revealed that uraninite grains are not as reliable as xenotime and monazite minerals; the reason for this is that the nature of uraninite does not allow the mineral structure to be preserved most of the time, or the structure does not form correctly. The ages of the Alutaguse zone found in the work strongly overlap with the development of the Lapland-Savo orogeny (1.91–1.93 Ga). Chemical dating was successful in the end, and it can be repeated in the future.

## **Tänuavaldus**

Autor soovib tänada Peeter Paaverit LA-ICP-MS-ga abi eest. Kalle Kirsimäge SEM-EDS-i abi eest.

## Kirjanduse loetelu

- Allaz, J., Jercinovic, M., & Williams, M. (2020). U-Th-Pb TOTAL dating of REE-phosphate by electron microprobe: Review and progress. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 891, 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/891/1/012001>
- Barnes, C. J., Majka, J., Jeanneret, P., Ziemniak, G., Kooijman, E., Kościńska, K., Kielman-Schmitt, M., & Schneider, D. A. (2021). Using Th-U-Pb geochronology to extract crystallization ages of Paleozoic metamorphic monazite contaminated by initial Pb. *Chemical Geology*, 582, 120450. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120450>
- Bogdanova, S., Gorbatshev, R., Skridlaite, G., Soesoo, A., Taran, L., & Kurlovich, D. (2015). Trans-Baltic Palaeoproterozoic correlations towards the reconstruction of supercontinent Columbia/Nuna. *Precambrian Research, Supercontinental Cycles and Geodynamics*, 259, 5–33. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.023>
- Bowles, J. F. W. (2015). Age Dating from Electron Microprobe Analyses of U, Th, and Pb: Geological Advantages and Analytical Difficulties. *Microscopy and Microanalysis: The Official Journal of Microscopy Society of America, Microbeam Analysis Society, Microscopical Society of Canada*, 21(5), 1114–1122. <https://doi.org/10.1017/S1431927615000446>
- Chew, D. M., Petrus, J. A., & Kamber, B. S. (2014). U–Pb LA–ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb. *Chemical Geology*, 363, 185–199. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.006>
- Condon, D. J., Whitehouse, M. J., & Horstwood, M. S. A. (2020). Radiometric Dating (U-Th-Pb). *Encyclopedia of Geology: Volume 1-6, Second Edition* (Kd 6, lk 26–49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00166-1>

- Condon, D. J., Whitehouse, M. J., & Horstwood, M. S. A. (2021). Radiometric Dating (U-Th-Pb). *Encyclopedia of Geology*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00166-1>
- Hu, H., Wang, R., Chen, W., Chen, P., Ling, H., & Liu, G. (2013). Timing of hydrothermal activity associated with the Douzhashan uranium-bearing granite and its significance for uranium mineralization in northeastern Guangxi, China. *Chinese Science Bulletin*, 58(34), 4319–4328. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5986-9>
- Hölttä, P., & Klein, V. (1991). PT-development of granulite facies rocks in southern Estonia. *Geological Survey of Finland. Professional Paper*, (12), 37–47.
- Jercinovic, M. J., Williams, M. L., Allaz, J., & Donovan, J. J. (2012). *Trace analysis in EPMA*. 32, 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/32/1/012012>
- Kirs, J., Puura, V., Soesoo, A., Klein, V., Konsa, M., Koppelmaa, H., Niin, M., & Urtson, K. (2009). The crystalline basement of Estonia: Rock complexes of the Palaeoproterozoic Orosirian and Statherian and Mesoproterozoic Calymmian periods, and regional correlations; pp. 219–228. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 58, 219–228. <https://doi.org/10.3176/earth.2009.4.01>
- Koistinen, T. J. (Toim). (1996). *Explanation to the map of Precambrian basement of the Gulf of Finland and surrounding area 1: 1 million*. Geological Survey of Finland.
- Kont, R. (2022). *Jälgelemendid Uljaste sulfiidse mineralisatsiooni ilmingutes* [Tartu Ülikool]. <http://hdl.handle.net/10062/82221>
- Koppelmaa, H. (2002). *Eesti kristalse aluskorra geoloogiline kaart: Geological map of the crystalline basement of the Estonia* [[Võrguteavik] =]. Eesti Geoloogiakeskus.
- Lahtinen, R., Huhma, H., Kontinen, A., Kohonen, J., & Sorjonen-Ward, P. (2010). New constraints for the source characteristics, deposition and age of the 2.1–1.9 Ga metasedimentary cover at the western margin of the Karelian Province. *Precambrian Research*, 176(1), 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.10.001>

- Liu, Z., Wu, F., Guo, C., Zhao, Z., Yang, J., & Sun, J. (2011). In situ U-Pb dating of xenotime by laser ablation (LA)-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 56(27), 2948–2956. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4657-y>
- Melezhik, V. A., Prave, A. R., Hanski, E. J., Fallick, A. E., Lepland, A., Kump, L. R., & Strauss, H. (2013). Reading the archive of earth's oxygenation: Volume 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia - Drilling Early Earth Project. *Reading the Archive of Earth's Oxygenation—Volume 1*. Frontiers. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29682-6>
- Pabst, A. (1952). The metamict state. *American Mineralogist*, 37(3–4), 137–157.
- Puura, V., All, T., Puura, V., & 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*, 53, 165–189. <https://doi.org/10.3176/geol.2004.3.03>
- R Core Team. (2025) *R A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. - References—Scientific Research Publishing. (s.a.).  
Salvestatud 22. mai 2026  
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3967248>
- ruumiamet, M. (s.a.). *Puursüdamike andmebaas* [Dataset]. Salvestatud 22. mai 2026  
<https://geoportaal.maaamet.ee/est/puursudamike-andmebaas-p382.html>
- Soesoo, A., Košler, J., & Kuldkepp, R. (2006). Age and geochemical constraints for partial melting of granulites in Estonia. *Mineralogy and Petrology*, 86, 277–300. <https://doi.org/10.1007/s00710-005-0110-8>
- 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*. <https://doi.org/10.17076/geo1185>

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*, 53, 149–164. <https://doi.org/10.3176/geol.2004.3.02>

Suzuki, K., & Adachi, M. (1991). Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. *GEOCHEMICAL JOURNAL*, 25(5), 357–376. <https://doi.org/10.2343/geochemj.25.357>

Timón-Sánchez, S. M., López-Moro, F. J., Romer, R. L., Rhede, D., Fernández-Fernández, A., & Moro-Benito, C. (2019). Late-Variscan multistage hydrothermal processes unveiled by chemical ages coupled with compositional and textural uraninite variations in W-Au deposits in the western Spanish Central System Batholith. *Geologica Acta: An International Earth Science Journal*, 17, 1–19.

Tu, J.-R., Xiao, Z.-B., Zhou, H.-Y., An, S.-Q., Li, G.-Z., Cui, Y.-R., Liu, W.-G., & Li, H.-M. (2019). U–Pb dating of single-grain uraninite by isotope dilution thermal ionization mass spectrometry. *Ore Geology Reviews*, 109, 407–412. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.001>

*X-GIS 2.0 [geoloogia50k]*. (s.a.). Salvestatud 22. mai 2026 <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/geoloogia50k>

# Lisad

Lisa 1. Monatsiitide keemiline koostis (%).

	P	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Pb	Th	U	Th/U	Vanus (Ma)
M1	13.04	2.77	10.89	21.33	2.75	10	1.74	1.56	0.83	4.66	1.21	3.85	1945
M2	13.3	3.04	11.71	22.83	2.53	9.91	1.58	1.51	0.66	4.99	1.12	4.46	1588
M3	12.43	1.82	13.89	26.26	2.87	10.39	2.12	1.43	0.5	3.33	0.79	4.22	1737
M4	12.85	2.68	11.95	23.22	2.53	10.41	1.63	1.51	0.67	4.55	1.11	4.10	1688
M5	13.01	3.64	9.98	21.16	2.26	9.58	1.78	1.65	1.17	5.02	1.91	2.63	1973
M6	13	2.72	12.61	23.19	2.24	9.21	1.56	1.42	0.76	3.75	1.2	3.13	1975
M7	13.15	3.12	11.1	22.04	2.45	9.63	1.69	1.78	0.85	4.41	1.71	2.58	1721
M8	12.96	2.74	11.39	22.26	2.67	10.13	1.89	1.66	0.75	4.71	1.16	4.06	1816
M9	13.27	3.21	11.57	22.42	2.33	9.95	1.83	1.39	0.93	4.58	1.69	2.71	1846
M10	13.16	3.02	11.44	22.48	2.57	9.77	1.8	1.45	0.8	4.43	1.43	3.10	1792
M11	13	3.39	11.12	22.55	2.36	9.89	1.77	1.4	1.03	4.73	1.87	2.53	1897
M12	13.19	3.13	11.22	22.33	2.61	10.04	2.04	1.48	0.81	4.64	1.36	3.41	1801
M13	12.98	3.41	10.62	21.53	2.69	9.63	1.96	1.59	0.9	4.66	1.58	2.95	1844
M14	13.07	2.68	12.26	23.67	2.43	9.85	1.51	1.47	0.78	4.31	1.31	3.29	1836
M15	12.76	2.56	11.04	21.84	2.68	10.01	1.99	1.66	0.88	4.99	1.1	4.54	2064
M16	12.72	2.42	11.9	22.57	2.53	9.31	1.68	1.51	0.78	3.6	1.1	3.27	2134
M17	12.62	3.38	10.41	20.97	2.14	9.18	1.72	1.22	0.93	4.78	1.63	2.93	1851
M18	12.99	3.68	10.81	22.25	2.44	10.07	1.8	1.63	0.88	5.08	1.66	3.06	1714
M19	12.97	2.09	12.08	23.32	2.67	10.67	2.05	1.57	0.79	4.94	0.96	5.15	1985
M20	13.14	2.48	11.52	22.52	2.63	9.99	1.89	1.57	0.96	5.83	1.16	5.03	2018
M21	12.91	2.94	11.32	22.15	2.62	10.08	2.05	1.53	0.78	4.78	1.1	4.35	1892
M22	13.18	2.77	11.34	22.08	2.32	9.82	1.49	1.46	0.81	4.75	1.34	3.54	1801
M23	12.86	3.58	10.63	22.03	2.35	10.06	1.44	1.39	0.85	4.88	1.64	2.98	1691
M24	12.97	2.61	11.54	22.58	2.45	10.04	1.79	1.61	0.88	4.83	1.2	4.03	2024
M25	12.83	3.29	10.29	21.09	2.29	9.65	1.82	1.41	0.99	4.77	1.96	2.43	1783
M26	12.7	2.73	10.15	20.04	2.21	8.62	1.43	1.41	0.82	4.27	1.26	3.39	1962
M27	13.06	3.24	10.99	22.27	2.45	9.78	1.82	1.32	0.93	4.91	1.69	2.91	1784
M28	8.34	1.45	13.79	26.72	3.19	10.92	2.55	2.02	0.5	3.3	0.98	3.37	1599
M29	13.15	3.62	11.34	22.59	2.28	9.9	1.67	1.67	0.9	4.65	1.8	2.58	1734
M30	13.11	3.11	11.44	22.03	2.28	9.47	1.84	1.48	0.85	4.03	1.3	3.10	2040
M31	13.01	2.94	11.25	22.74	2.69	10.12	1.91	1.62	0.81	4.73	1.5	3.15	1713
M32	13.17	2.56	12	23.32	2.43	10.54	1.87	1.61	0.75	5.11	0.78	6.55	2003
M33	11.86	2.2	11.39	22.4	2.57	10.02	1.82	1.58	0.87	5.27	0.8	6.59	2228
M34	12.97	2.69	11.1	22.23	2.81	10.2	2.1	1.79	0.8	4.27	1.21	3.53	1956
M35	13.04	3.44	10.83	22.39	2.3	9.95	1.69	1.53	0.89	4.53	2	2.27	1642
M36	12.24	1.78	12.31	24.14	2.66	11.03	2.19	1.8	0.44	3.41	0.73	4.67	1583
M37	12.72	2.45	12.1	23.59	2.78	10.83	2.06	1.73	0.75	4.92	0.83	5.93	1995
M38	12.58	2.35	13.33	23.95	2.63	9.77	1.84	1.51	0.6	3.9	1.13	3.45	1648
M39	13.16	2.71	11.55	22.43	2.4	9.55	1.58	1.32	0.82	4.2	1.14	3.68	2053
M40	13.17	3.54	11.98	22.96	2.46	9.76	1.88	1.43	0.88	4.06	1.75	2.32	1809
M41	13.17	3.18	12.27	23.13	2.32	9.37	1.57	1.33	0.77	4.06	1.33	3.05	1847
M42	13.26	2.74	11.88	23.35	2.52	10.61	1.81	1.57	0.75	4.57	1.37	3.34	1698
M43	13.04	3.7	9.88	21.06	2.57	9.69	1.85	1.81	1.09	4.81	1.94	2.48	1932
M44	12.78	2.88	11.55	22.79	2.9	10.25	2.07	1.56	0.65	4.37	1.07	4.08	1700
M45	12.98	3.72	10.34	21.65	2.49	9.86	1.87	1.49	1.01	5.03	2.03	2.48	1884
M46	12.94	2.66	11.55	22.54	2.49	9.79	1.79	1.55	0.84	4.31	1.3	3.32	1960
M47	12.9	2.25	11.73	22.97	2.44	9.62	1.65	1.46	0.63	4.26	0.79	5.39	1903
M48	13.04	2.03	11.98	23.52	2.52	10.54	1.99	1.51	0.61	4.48	0.57	7.86	1991
M49	12.73	2.73	12.29	23.67	2.29	10.05	1.34	1.38	0.71	4.37	1.23	3.55	1738
M50	13.18	2.93	11.16	21.94	2.3	9.88	1.64	1.71	0.81	4.65	1.51	3.08	1723
M51	12.16	2.35	12.1	22.19	2.41	9.07	1.69	1.41	0.52	3.28	1.18	2.78	1506
M52	12.95	2.93	11.09	22.14	2.63	10.07	2.01	1.81	0.88	4.58	1.62	2.83	1810
M53	13.11	2.8	11.83	23.04	2.37	9.87	1.81	1.41	0.79	4.4	1.33	3.31	1828
M54	12.72	2.13	11.61	22.39	2.52	9.94	2.11	1.73	0.71	5.33	0.62	8.60	1991

**Lisa 2.** Ksenotiimide keemiline koostis (%).

	<b>P</b>	<b>Y</b>	<b>Gd</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Yb</b>	<b>Pb</b>	<b>Th</b>	<b>U</b>	<b>Th/U</b>	<b>Vanus (Ma)</b>
Y1	14.89	34.11	1.86	4.73	0.98	4.12	4.53	0.53	0.66	1.58	0.42	1771
Y2	13.79	31.8	1.51	3.87	1.08	4.01	4.97	0.78	0.27	3.17	0.09	1451
Y3	14.22	32.03	1.73	4.73	1.16	4.14	4.38	0.79	0.95	2.25	0.42	1844
Y4	14.77	34.04	2.14	5.07	1.08	4.17	4.41	0.66	0.66	1.58	0.42	2102
Y5	14.91	33.87	2.23	5.14	1.13	4.47	4.64	0.78	0.55	1.9	0.29	2101
Y6	14.55	32.45	2.57	5.89	1.18	4.11	4.45	0.68	0.74	1.54	0.48	2195

**Lisa 3.** Uranitiide keemiline koostis (%).

	<b>P</b>	<b>Y</b>	<b>Pb</b>	<b>Th</b>	<b>U</b>	<b>Th/U</b>	<b>Vanus (Ma)</b>
U1		0.74	10.86	0.73	69.13	0.01	1007
U2			19.59	0.46	62.92	0.01	1809
U3	1.15		10.54	1.11	52.15	0.02	1255
U4	1.09		13.94	2.81	51.11	0.05	1607
U5			17.12	1.1	53.71	0.02	1920
U6			19.1	0.61	59.56	0.01	1931

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

Mina, **Elerin Kinsiver**,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

**U–Th–Pb keemiline dateerimine Uljaste puursüdamiku monatsiidi, ksenotiimi ja uraniniidi põhjal,**

mille juhendaja on Peeter Somelar

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.

*Elerin Kinsiver*

**25.05.2026**