

TARTU ÜLIKOOL

LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Ökoloogia- ja Maateaduste Instituut

geoloogia osakond

Sigrid Soomer

# EL6 enstatiitkondriitide geokeemia ja mineralogia - Pilistvere meteoriid

bakalaureusetöö geoloogia erialal

Juhendaja: Kalle Kirsimäe

Tartu 2013

## Sisukord

Sissejuhatus.....	3
Kondriitmeteoriidid ja enstatiitkondriidid .....	4
Enstatiitkondriitide süstemaatika.....	7
EL6 Meteoriidid .....	7
Pilistvere sündmus ja meteoriidi senine uuritus.....	8
Pilistvere Aukamäe meteoriiit .....	8
Uuritus .....	9
Pilistvere meteoriidi kirjeldus ja uurimismeetodid .....	9
Tulemused ja arutelu.....	11
Silikaadid.....	12
Ehedad metallid ja intermetallilised ühendid .....	14
Sulfiidid .....	17
Sinoiit ja šreibersiit .....	26
Sulamiskoorik.....	28
Kokkuvõte ja järeldused .....	30
Tänuavaldused.....	31
Geochemistry and mineralogy of EL6 enstatite chondrites - Pilistvere meteorite.....	32
Viidatud kirjandus .....	34

## Sissejuhatus

Valdav enamus planeetidevahelises ruumis tiirlevast meteoorsest materjalist esindab Päikesesüsteemi väga varajasel arenguetapil, ligikaudu 4.5-4.7 miljardit aastat tagasi, kondenseerunud primitiivse planetaarse algainese (planetesimaalide) jäänuseid. Asteroidide-meteoroidide koostis on alates nende tekkimistest püsinud praktiliselt muutumatuna ning seega on Maale langenud ja atmosfääri sisenemisel ning kokkupõrkel maapinnaga säilinud meteoorkehad – meteoriidid - oluliseks infoallikaks Päikesesüsteemi tekketingimuste uurimiseks (Trieloff ja Palme, 2006).

Meteoriidid liigitatakse keemilis-mineraalse koostise ja struktuuri järgi kivimeteoriitideks, raudmeteoriitideks ja segameteoriitideks. Nimetatud rühmad jagunevad omakorda mitmeteks alarühmadeks ja nii eristatakse kivimeteoriitide rühmas kondriitide ja akondriitide alarühma. Kondriitmeteoriidid, mis moodustavad 82% (Mittlefehldt, 2008) Maale langenud ja leitud meteoriitidest, on arvatavasti kõige primitiivsemaks planetaaraineseks meie Päikesesüsteemis (Trieloff ja Palme, 2006). Kondriitmeteoriitide mineraalse ja geokeemilise koostise järgi on võimalik rekonstrueerida kosmilise nebulaarainese omadusi, Päikesesüsteemi tekketingimusi ja planetaarse ainese moodustumisel toimunud protsesse, mis on salvestunud meteoriitide mineraalsete faaside tasakaalulistest vahekordades ja faaside keemilise koostise iseärasustes. Samuti on kondriitmeteoriidid aluseks Päikesesüsteemi keskmise elementkoostise leidmiseks (Trieloff ja Palme, 2006).

Kondriitmeteoriitidele on iseloomulik sfääriliste klaasjast massist agregaatide ehk kondrite esinemine põhikivimis ning need meteoriidid jaotatakse omakorda kolme klassi: tavalised, süsinik- ja enstatiitkondriidid (Mittlefehldt, 2008). Viimased moodustavad vaid 1,6% kõigist leitud meteoriitidest (Zipfel *et al.*, 2010).

Enstatiitkondriidid on osaliselt diferentseerunud ja tugevalt redutseerunud ning seetõttu ebahariliku keemilis-mineraalse koostisega taevakehad. Need on arvatavasti moodustunud Päikese lähedal kõrgetemperatuurilises planetaarainese ketta vööndis tiireldes ja peegeldavad seega selles piirkonnas valitsenud tingimusi (McSween, 1987).

Enstatiitkondriitide hulka kuulub ka 1863. aastal Kesk Eestis Pilistvere piirkonnas aset leidnud meteoriidisajust leitud meteoriiit, millest leiti neli fragmenti: Aukamäe, Kurla, Saviaugu ja Wahhe (Tiirmaa, 2002). Pilistvere meteoriiit oli ka üks esimesi, mis tõestati kui enstatiitkondriitne meteoorne materjal.

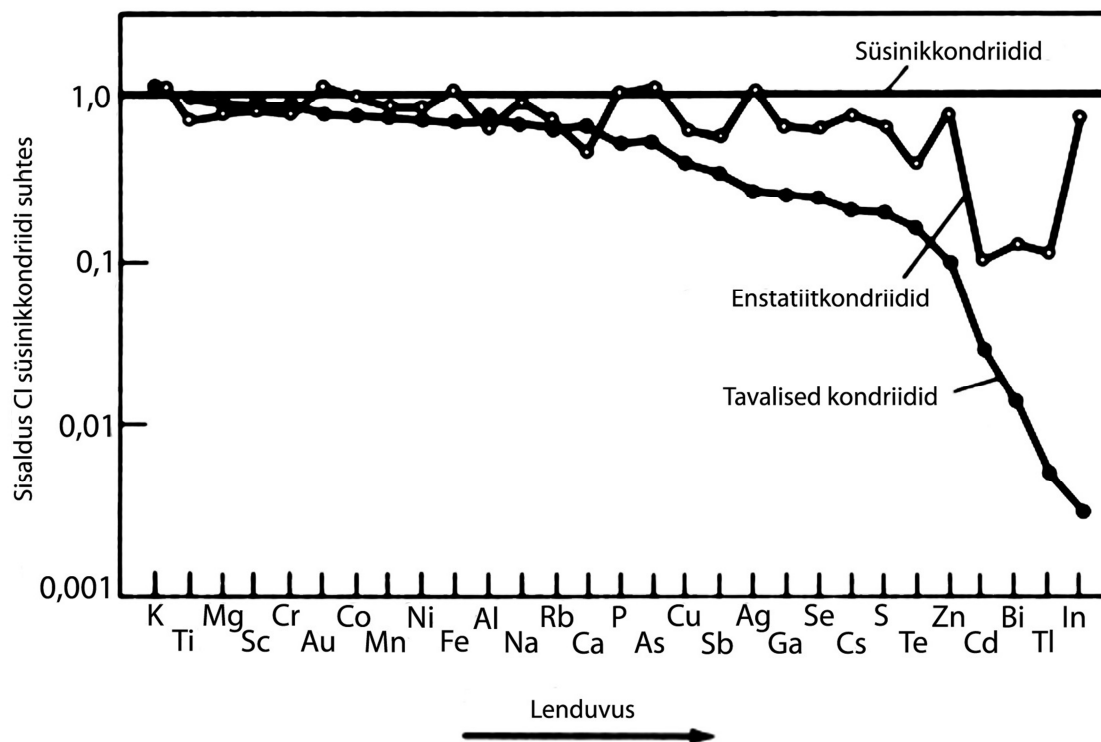
Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on esiteks, saada ülevaade enstatiitkondriitide omadustest ja positsioonist meteoriitide süstemaatikas ning teiseks, Pilistvere meteoriidisajust pärineva Aukamäe EL6 tüüpi moondunud enstatiitkondriidi detailne keemiline ja mineraloogiline iseloomustamine ja kolmandaks, meteoroidi moondetingimuste täpsustamine meteoriidis kristalliseerunud faaside koostise ja tekstuuride alusel.

## **Kondriitmeteoriidid ja enstatiitkondriidid**

Erinevate isotoopmeetoditega on kondriitmeteoriitide vanuseks mõõdetud 4,5 miljonit aastat (Trieloff ja Palme, 2006). Raskesti lenduvate komponentide sisaldus kondriitides on väga sarnane spektraalsete meetoditega mõõdetud Päikese keskmisele koostisele, välja arvatud liitiumi ja boori sisaldused, mis on kondriitides võrreldes Päikesega kõrgemad. Sellest järeldatakse, et kondriidid peegeldavad algset nebulaarainese raskesti lenduvate elementide koostist, millest moodustunud Päike ise on termotuumareaktsioonide tõttu Li ja B suhtes vaesustunud (McSween, 1987).

Enstatiitkondriidid on oma koostiselt redutseerunud, mis tähendab, et need on formeerunud kõrgetel temperatuuridel ja seda tüüpi meteoriidid on vaesustunud kergemate elementide suhtes (Joonis 1, McSween, 1987).

Enstatiitkondriitide redutseeritus tuleneb niivõrd kõrgete temperatuuritingimuste tõttu oluliselt madalamast hapniku fugitiivsusest. Seetõttu enstatiitkondriitides puuduvad või on väga madala sisaldusega oksiidid ja enstatiitkondriitides sisalduv raud moodustab enamasti intermetallilise või sulfiidse faasi (McSween, 1987). Mineraalidest sisaldab selline meteoriiit rauavaba enstatiiti, kamsiiti, troiliiti ning mõningaid haruldasi mineraale nagu alabandiit ((Mn,Fe)S), niningeriit((Mg,Fe)S), oldhamiit(CaS), osborniit(TiN) (Wenk ja Bulakh, 2011).



Joonis 1. Süsinikkondriidi suhtes normaliseeritud tavaliste ja enstatiitkondriitide koostis (McSween, 1987 järgi).

Kondriitmeteoriitidele nime andvad sfäärilised mineraaltilgad ehk kondrid võivad olla kuni 5 mm diameetriga ja täita kuni 70% meteoriidist. Kondrid on tekkinud kondenseerudes silikaatse kivimainese kiirel jahtumisel. Neid seob kivimise peeneteraline maatriks, mis sisaldab alla millimeetrise läbimõõduga kondenseerunud tilgakesi ja ka purustatud kivimtükke. Tavaliste kivimeteoriitide kondriitide homogeenne struktuur ja selgepiiriliste kondrite esinemine näitab, et need meteoriidid ei ole läbinud diferentseerumisprotsessi (Wenk ja Bulakh, 2011).

Võrreldes teiste kondriitmeteoriitidega on enstatiitkondriitide kondrid oluliselt erinevad. Esiteks, enamustel enstatiitkondriitidest puuduvad makroskoopiliselt eristatavad kondrid, või on need halvasti arenenud. Teiseks, enstatiitkondriidid koosnevad valdavalt mineraal enstatiidist, millest tuleb ka selle meteoriiidi rühma nimi (Mittlefehldt, 2008). Enstatiit on hall kuni rohekas rombiline pürokseen keemilise valemiga  $Mg_2Si_2O_6$ . Maal esineb enstatiit aluselistes ja ultraaluselistes magmakivimites. Enstatiit kristalliseerub magmast temperatuuridel 1554 °C kuni 1543 °C (Wenk ja Bulakh, 2011). Enstatiitkondriidid sisaldavad

lisaks enstatiidile ka Fe-Ni metallifaasi (20-30%), troiliiti (5-15%) ning väga mitmekesiseid kaltsiumi ja mangaani-magneesiumi sulfiide (Rubin *et al.*, 1997).

Universumis on enstatiit supernoovaplahvatuste tolmu koostises ja 1997. aastal tuvastati enstatiiti ka *Haley Bopp*'i komeedi saba moodustava tolmu koostises (Wenk ja Bulakh, 2011). Kuna komeedid koosnevad kosmilisest prügist ja jäädest, on üsna võimalik, et mingi osa kivimilist materjalist on ka enstatiitse koostisega (McSween, 1987).

Väiksema osa enstatiitkondriidist moodustavad kaltsiumi- ja alumiiniumirikad suletised (CAI). CAId on kuni sentimeetrise diameetriga klastid, mida peetakse vanimaks Päikesesüsteemis leiduvaks materjaliks. CAId sisaldavad mineraale, mis termodünaamilise tasakaalu seisukohalt peaksid päikesesüsteemi jahtudes kuumast gaasist esimesena kondenseeruma. CAId on märkimisväärselt vaesustunud kõrgel temperatuuril kergesti lenduvate elementide poolest ja sisaldavad raskulavaid jääkelemente (Ba, Th, Zr, Hf, Nb, Ta, Y ja REEd). Vahel on neisse seotud ka väikseid metallseid tükikesi, mis sisaldavad veelgi varem kondenseerunud elemente (Re, Os, Ir, Pt, W, Mo) (White, 2013).

Enstatiitkondriitide ja teiste kondriitmeteoriitide CAId on sarnase struktuuri ja mineraalse koostisega. Kondriitmeteoriidid ise on oma koostiselt aga üsna erinevad, mis tähendab, et need on formeerunud erinevates keskkondades ja seega ka erinevates protoplanetaarse pilve piirkondades. Siit saab järeldada, et CAId pidid olema formeerunud korraga ja ühtsetes tingimustes ning paisati peale tekkimist udukogu siseselt laiali ja need sattusid kõigi kondriitide tekkepiirkondadesse (Rubin *et al.*, 1997).

Enstatiitkondriitide uurimise tähtsust ilmestab ka fakt, et enstatiitkondriitide ja maakoore isotoopkoostised on paljude elementide osas väga sarnased. See viitab võimalusele, et need on moodustunud samast materjalist. Võrreldavad on hapniku, lämmastiku, molübdeeni, rutheeniumi, osmiumi, radiogeense  $^{53}\text{Cr}$  ja stabiilse  $^{54}\text{Cr}$  ning ka vääriskaaside heeliumi ja neooni isotoopsed koostised. Erinevused esinevad vaid räni ja volframi isotoopkoostistes, mis on seletatav planeedi ja meteoriidi erineva diferentseeritusega (Javoy *et al.*, 2010).

### *Enstatiitkondriitide süstemaatika*

Üldisem ja laiahaardelisem liigitus jagab enstatiitkondriidid kahte rühma: EH (*high iron*) ja EL (*low iron*). EH kondriidid sisaldavad rohkem nikli-raua ühendeid, nende keskmine rauda ja räni suhe on 1,07. Seevastu EL kondriidid sisaldavad vähem nikli-raua ühendeid ja rauda räni suhe on samuti madalam 0,77 (Lodders ja Fegley, 1998).

EH kondriitidest moodustab raud 29-35%, kuid EL kondriitidest 20-29% (Javoy *et al.*, 2010). Haruldastest mineraalidest sisaldavad EH kondriidid niningeriiti (MgS) ja EL kondriidid alabandiiti (MnS) (Lin ja El Goresy, 2002). EH kondriite peetakse ka EL kondriitidest primitiivsemaks (Javoy *et al.*, 2010).

Meteoriitide kivimilise koostise moondeastet mõõdetakse kuueastmelisel skaalal, kus 1 on enim vesilahustest mõjutatud ja 6 on enim metamorfiseerunud. Kolmanda tüüpi meteoriidid on kõige vähem mõjutatud. See arv iseloomustab meteoriidi petrooloogilist tüüpi (Scott, 2011).

Enstatiitkondriitmeteoriitide puhul esimest ja teist petrooloogilist tüüpi ei ole siiani leitud (Mittlefehldt, 2008). Asteroidide vöös on enstatiitsed kehad tuvastatud just sisemises ehk päikesepoolses vööndis ning vastavalt on need kivimid ka talunud kõrgemaid temperatuure ning seepärast pole esindatud ka esimene ja teine petrooloogiline tüüp. Enamlevinud on ka just kuuenda rühma tugevalt moonduvad enstatiitkondriidid. Seda võiks põhjendada päikesetuule intensiivsusega, kuid põhjus võib olla ka meteoriidis leiduvate radioaktiivsete elementide lagunemisel tekkinud sisesoojuses (McSween, 1987).

Enstatiitkondriidid on maapinnal äärmiselt ebastabiilsed, kuna suur osa neid moodustavatest mineraalidest on murenemisel ja hüdratiseerumisel väga reaktiivsed nagu mineraal oldhamiit (CaS), mis lahustub juba õhuniiskuse käes (Zipfel *et al.*, 2010).

### *EL6 Meteoriidid*

Väiksema rauasisaldusega enstatiitkondriite ehk EL6 kondriite, mis on kõrgetel temperatuuridel moonduvad, on Maale jõudnud vähe. Nii pole ka vaid seda tüüpi kondriitidele keskendunud uurimusi, küll aga on erinevaid võrdlevaid ja koonduurimusi üle mitme rühma.

EL6 kondriidid on enstatiitkondriitide seas ebaharilikud, kuna neis on kondrid halvasti eristatavad. Need on moonde käigus ümberkristalliseerunud või mõnel juhul ka pole enam üldse nähtavad. EL6 kondriitides on monokliinne pürokseen asendunud ortopürokseeniga ja puhast oliviini ei esine. Plagioklass esineb suureteralisena, terasuuruseks üle 50 µm. EL6 kondriitide silikaatsetest mineraalidest on leitud ka märkimisväärne hulk Päikesesüsteemi-eelseid vääriskaase (Huss *et al.*, 2006).

EL6 kondriitide metamorfiseerumise temperatuuriks hinnatakse 600-800 °C, kuid ei ole välistatud ka kõrgemad temperatuurid, kuna paljud enstatiitkondriidid omavad impakti tunnuseid (Huss *et al.*, 2006). Kokkupõrkel teiste meteoroidide/asteroididega võib impakti lööklaine rõhk ulatuda paarisaja tuhande baarini ja vabanev energia põhjustada kõrgtemperatuurilist moonet, sealhulgas koldelist sulamist (McSween, 1987).

## **Pilistvere sündmus ja meteoriidi senine uuritus**

### *Pilistvere Aukamäe meteoriit*

Pilistvere Aukamäe meteoriit on liigitatud EL6 meteoriidiks, mis tähendab, et see on metamorfne vähese rauasisaldusega enstatiitkondriitmeteoriit.

Aukamäe meteoriit EL6 on üks Põltsamaa lähedal Pilistveres (58° 40'N, 25° 44'E) 1863. aastal 8. augustil toimunud meteoorisajust maapinnale jõudnud ja leitud meteoriidi fragmentidest. Langemas nähti kaheksat meteoori, kuid neist on leitud neli. Aukamäe meteoriidi kukkumist pealt näinud talupojad kangutasid kivi maa küljest lahti ja viisid selle parun Richard Victingshoffile, kes kinkis selle Tartu Ülikoolile (Tiirmaa, 2002).

Peale Aukamäe on registreeritud ka Kurla, Wahhe ja Saviaugu meteoriidid. Aukamäe meteoriidi mass oli leidmisel 10,74 kg. Selle rühma meteoriite, kuhu kuulub ka uuritav Aukamäe meteoriit, on maailmas teada vaid alla 30 (Tiirmaa, 2002).

Pilistvere meteoriidi põhilised mineraalid on orto- ja klinoenstatiit ning diopsiid. Ortoenstatiiti on 50-60% ja selle terasuurus on 0,1-0,6 mm. Klinoenstatiidi terasuurus on kuni 0,2 mm. Metalliline faas esineb kamasiidina, mille terasuurus on alla 0,2 mm ja esineb sageli koos troiliidi ning šreibersiidiga. Harvem leidub kamasiiti ka grafiidisuletistega (Tiirmaa, 2002). Pilistvere enstatiitkondriidi koostis ja tekstuur viitavad redutseerivale

tekkekeskkonnale ning kõrgel temperatuuril toimunud materjali kompaktsoonile ning ilmselt on meteoriid talunud ka šokimetamorfismi tingimusi (Semenenko ja Samoilovich, 1982).

### *Uuritus*

Pilistvere meteoriid, mille tükke on vahetatud üle maailma, on kasutatud paljudes EL6-tüüpi meteoriidide käsitletavates uurimistes. Näiteks Lawrentjeva (1996) uuris neutronaktivatsioonanalüüsiga Pilistvere meteoriidide erinevate suurustega terade keemilist koostist. Terad eraldati suuruse järgi kuueteistkümneks fraktsiooniks. Leiti terade elementkoostised ning ka nendes sisalduvad haruldased elemendid (REE), millede sisaldusi võrreldi CI süsinikkondriidiga.

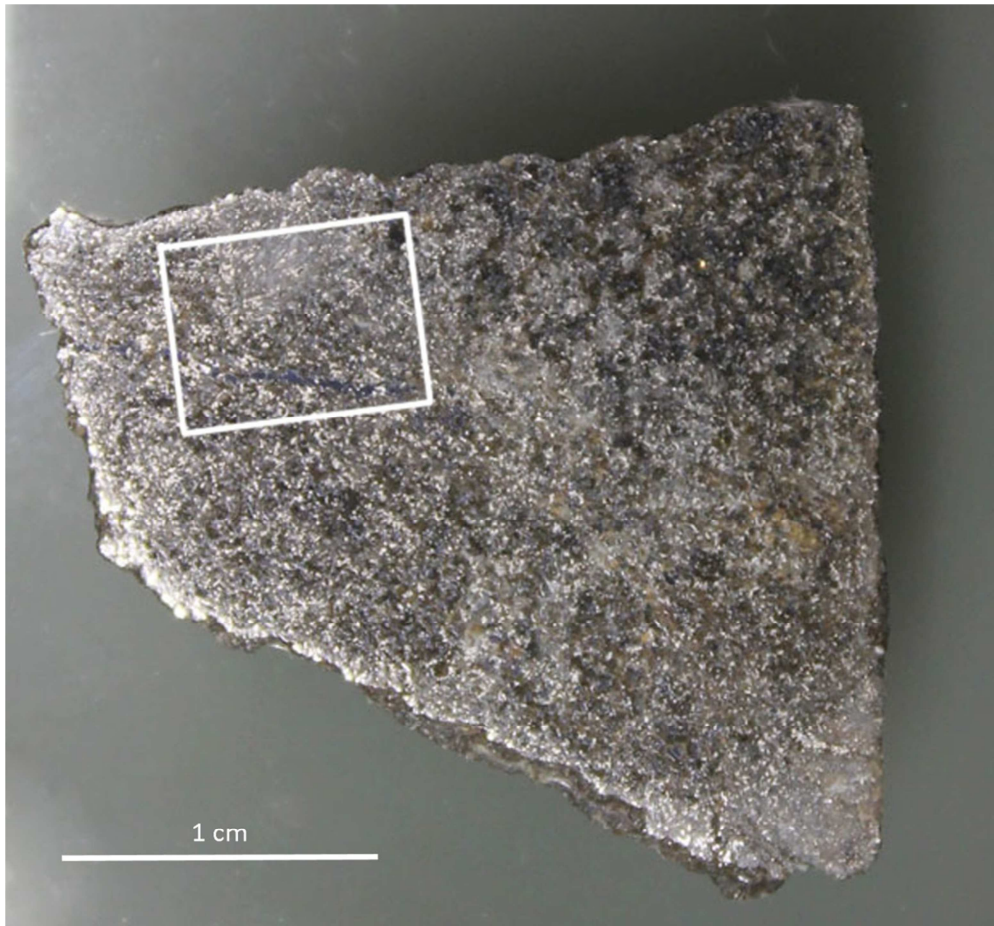
Peters ja Münker (2012) kasutasid Pilistvere meteoriidist nukleosünteesi p-protsessis tekkivate hafniumi isotoopide ( $\text{Hf}^{174}/\text{Hf}^{177}$  isotoopsuhete) heterogeensuse uurimiseks. Hf isotoobid moodustuvad supernoovade plahvatusel käivitavas p-protsessis ja iseloomustavad algset nebulaarainest, millest hakkas moodustuma meie päikesesüsteem.

Skinner ja Luce (1971) on kasutanud Pilistvere meteoriidist uurimustöös, et leida sulfiidide kaltsiumi, magneesiumi, raua ja mangaani suhte järgi selle mineraalitera moodustumise temperatuur.

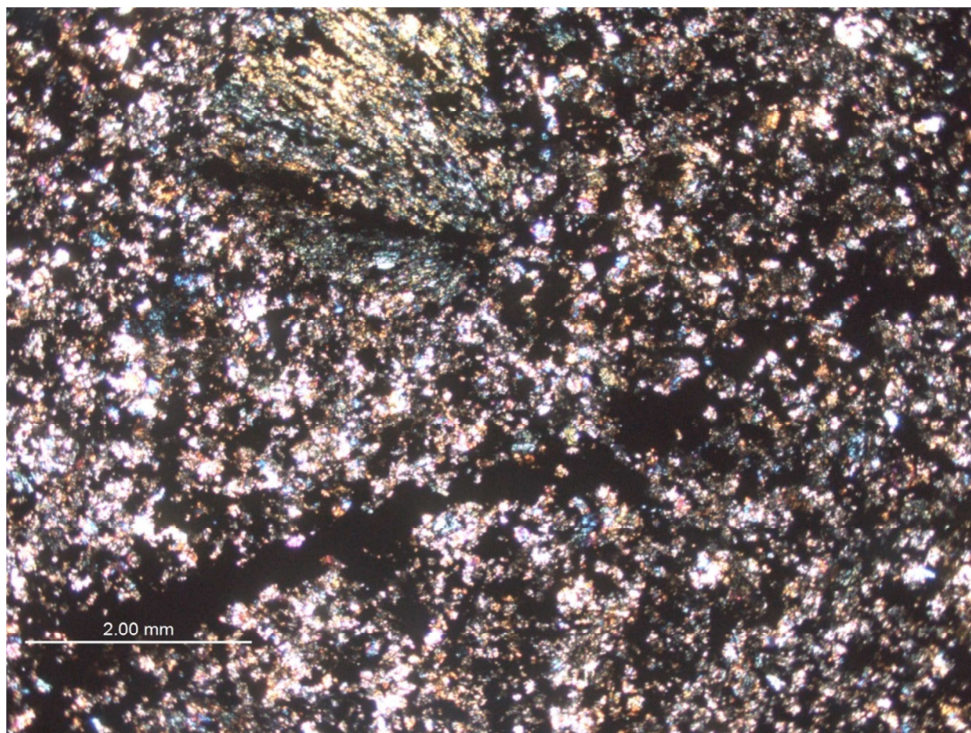
Pilistvere meteoriidide mineraloogilisi ja tekstuurseid omadusi on uuritud Semenenko ja Samoilovich (1982) töös, mis on teadaolevalt senini ainus spetsiaalselt Pilistvere meteoriidile pühendatud uurimus.

## **Pilistvere meteoriidide kirjeldus ja uurimismeetodid**

Käesolevas uurimistöös kasutati Tartu Ülikooli geoloogiamuuseumi kogus säilitatavast Pilistvere meteoriidisajust pärineva Aukamäe kondriitmeteoriidist lõigatud ebakorrapärase kujuga fragmenti mõõtmetega ligikaudu 2,5x2x1 cm. Petrograafiliselt on pala ühtlase teralise struktuuriga (Joonis 2), kuid lõikepinna serval esineb üks radiaalkiireline ümar agregaat (konder) ja ilmselt metallilist faasi sisaldav soon (joonis 3). Teine pool tükist oli kaetud langemisel tekkinud sulamiskoorikuga.



Joonis 2. Pilistvere Aukamäe meteoriidist lõigatud tükk. Kastiga tähistatud ala (kondri ja metallifaasi sisaldav soon) on näidatud joonisel 3.



Joonis 3. Kondri osaliselt säilinud radiaalkiireline fragment ning läbistav metallifaasi soon (pildil tume) Pilistvere meteoriidi palas.

Petrograafilisteks ja mineraloogilisteks uuringuteks valmistati esmalt lihvitud pala, mille uurimise järel valmistati samast palast petrograafiline õhik.

Lihvitud pala üldmineraalse koostise identifitseerimiseks kasutati röntgendifraktsioonanalüüsi, millega määrati kivimit moodustavad mineraalid ja nende ligikaudsed hulgalised suhted. Kuna analüüs tehti homogeniseerimata ja peenendamata materjalist (lihvitud pala pinnast), siis ei ole määratud faaside kvantitatiivsed suhted korrektsed. Röntgendifraktsioonanalüüs (XRD) tehti Bruker D8 Advance difraktomeetril kasutades  $\text{CuK}_\alpha$  kiirgust mõõtmisvahemikus 3-90 kraadi  $2\theta$ . Mõõdetud spektrite interpreteerimiseks kasutati programmi Topas 4.0.

Lihvitud pala üldkeemiline koostis määrati röntgenfluoresentsanalüüsil (XRF) spektromeetriga Rigaku Primus II. Keemilise koostise analüüs tehti lihvitud pinnaga palast.

Lihvitud pinna petrograafiline ja mineraal-keemiline analüüs tehti skaneerival elektronmikroskoobil (SEM) Zeiss EVO MA15. Pala uuriti kõrgvaakumis ning kaeti juhtivuse tagamiseks 10 nm paksuse söekihiga. Kujutised võeti tagasihajunud elektronide (*Backscattered Electron – BSE*) režiimis ja mineraalsete faaside identifitseerimine tugines faaside keemilisele koostisele, mis määrati energiadispersiivse (EDS) detektorsüsteemiga Oxford X-Max ja kvantifitseeriti Aztec 1.0 koodiga standardivabal PAP-meetodil. SEM analüüsil iseloomustati peale faaside koostise ka mineraalide vahekordi ja esinemissagedusi ning tekstuure. Uuriti ka erinevate mineraalide murenemisastet, suletisi ja ühe mineraali piires selles sisalduvate elementide suhete muutumist. Täiendavalt kasutati pala (õhiku) petrograafiliseks iseloomustamiseks optilist polarisatsioonimikroskoopi.

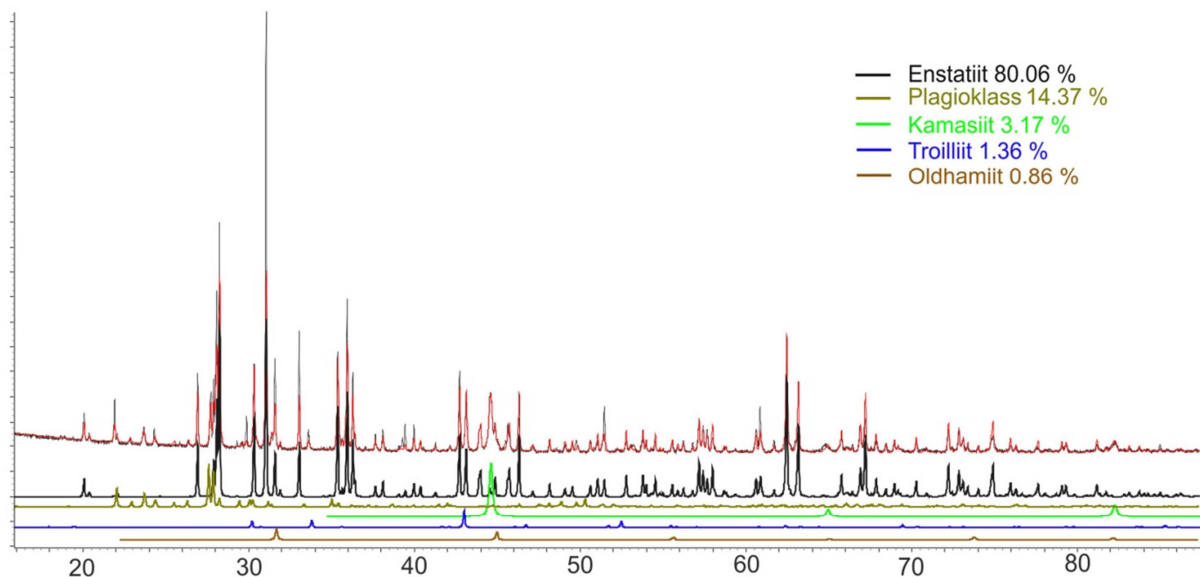
## **Tulemused ja arutelu**

Röntgenfluoresentsanalüüsil määratud meteoriidipala koostises domineerivad hapnik, räni, magneesium ja raud ning vähemal määral väävel, alumiinium ja kaltsium. Märkimisväärselt, kuid alla ühe massiprotsendi on naatriumi, nikli ja kroomi sisaldus (Tabel 1). Määratud koostis vastab eeldatud enstatiitkondriidile, kuna mineraalselt koosnevad need valdavalt enstatiidist  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$ , plagioklassist  $(\text{Ca,Al})\text{SiO}_3$  ja kamsiidist Fe-Ni millega kaasnevad erinevad monosulfiidid (CaS, FeS, MgS, MnS).

Tabel 1. XRF analüüsi tulemused, Pilstvere meteoriidi kvantitatiivne koostis.

Element	O	Si	Mg	Fe	S	Al	Ca	Na	Ni
Massi %	36,86	23,71	15,98	14,36	3,47	1,89	1,44	0,97	0,5
Element	Cr	Mn	K	Cl	Ti	P	Co	Cu	Zn
Massi %	0,26	0,15	0,14	0,11	0,06	0,06	0,04	0,01	0,01

Kvalitatiivne XRD analüüsi näitab, et uuritud pala koosneb põhiliselt silikaatsest, sulfiidsest ja metallifaasist. Silikaatsetest faasidest on identifitseeritavad ortopürokseen (enstatiit) ning plagioklass. Sulfiidsest faasist on esindatud troilliit, oldhamiit, alabandiit, busekiit, šreibersiit. Metallifaasidena on identifitseeritud taeniit ja kamsiit (Joonis 3).

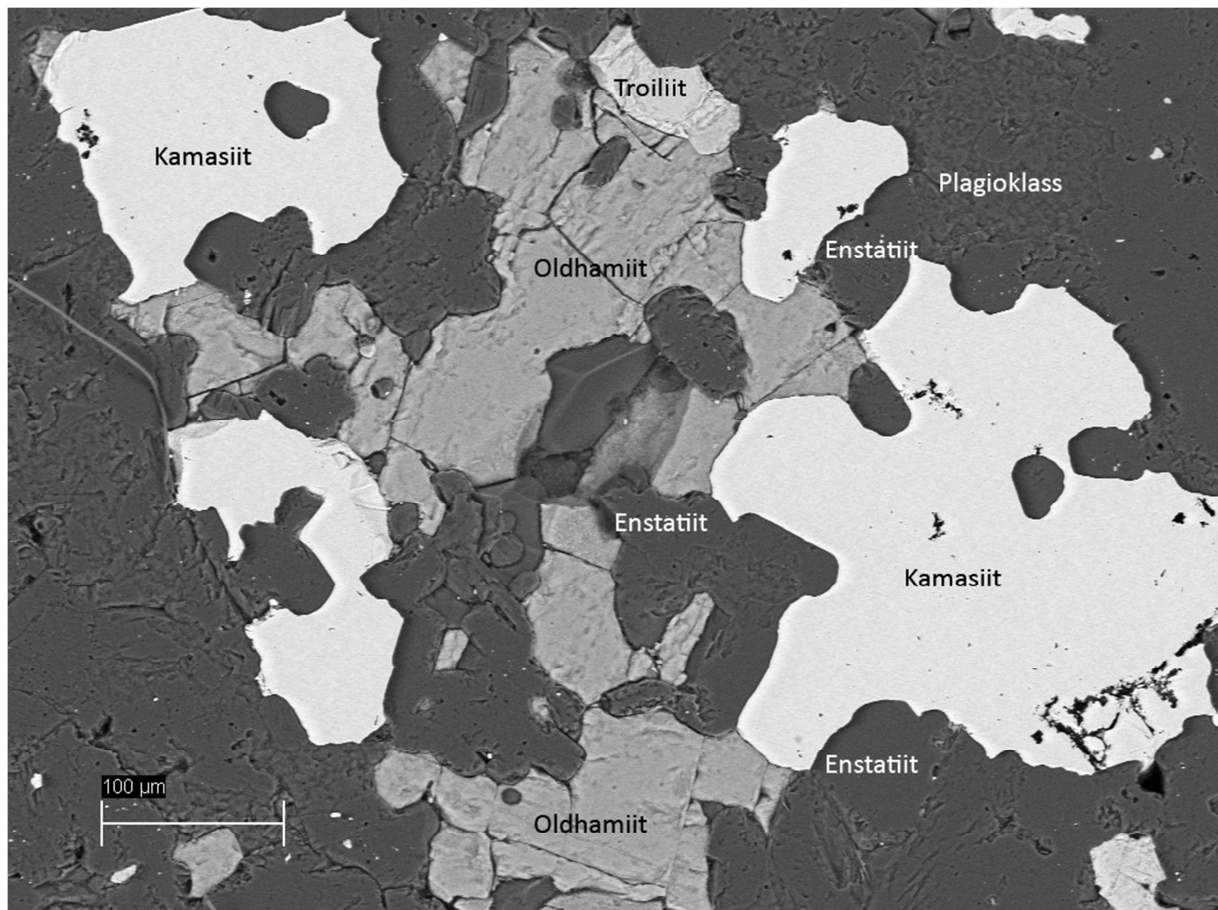


Joonis 3. Uuritud Pilstvere meteoriidi lihvitud pala röntgendifraktogramm. Võrdluseks mõõdetud ja modelleeritud spektrile (vastavalt ülemine punane ja must kõver) on näidatud enstatiidi, plagioklassi, kamsiidi, troilliidi ja oldhamiidi spektrid.

Identifitseeritud mineraalide detailsem iseloomustus tehti skaneerivelektronmikroskoopilisel analüüsil ja on järgnevalt esitatud vastavate mineraalide rühmade kaupa.

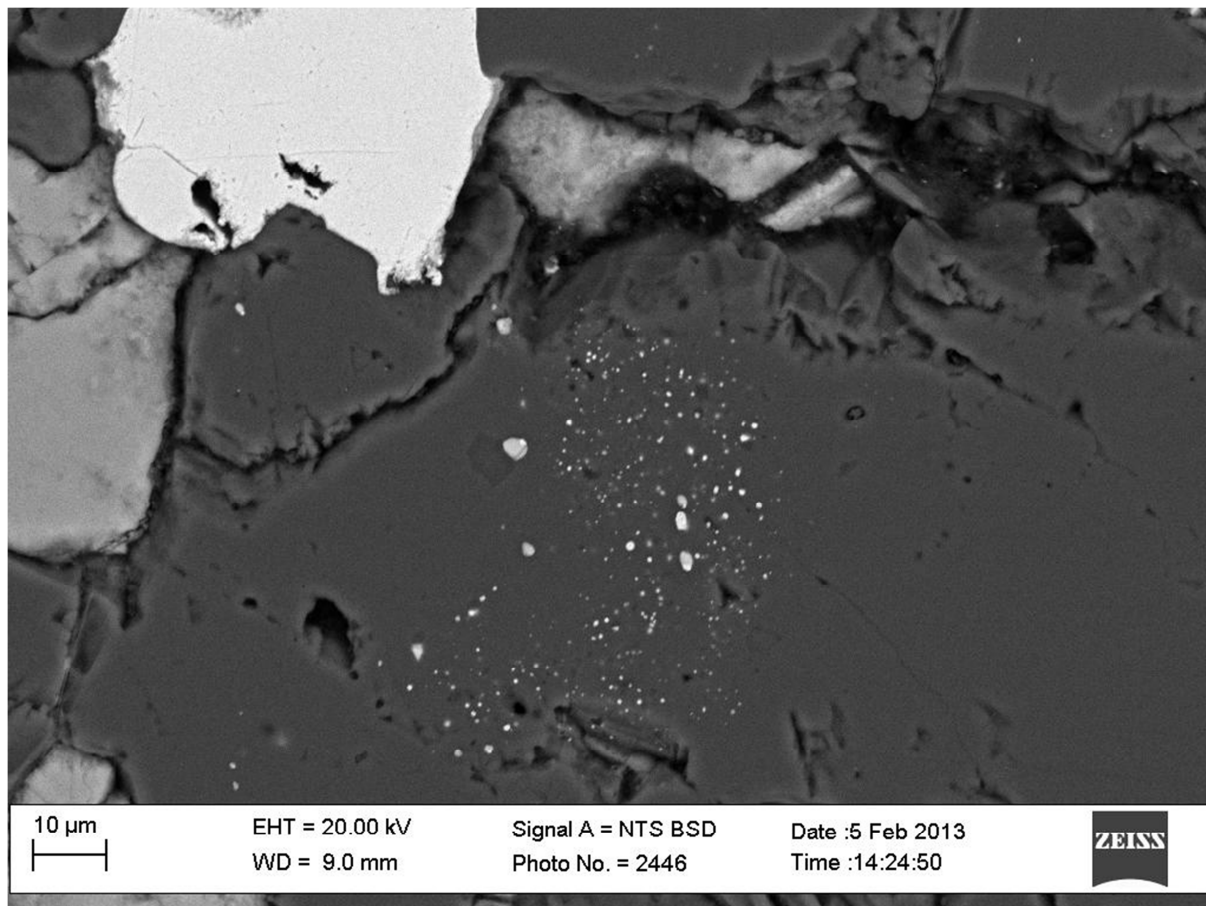
### *Silikaadid*

Pilstvere kondriitmeteoriidist moodustab enamuse magneesiumirikas pürokseen enstatiit ( $Mg_2Si_2O_6$ ). Enstatiit esineb maatriksina sulfiidide, metallide ja plagioklassi vahel või lausa suletistena nende faaside sees (joonis 4).



Joonis 4. SEM tagasihajunud elektronide (BSE) kujutis enstatiidi põhimassist, milles on suletistena kamasiit, oldhamiit, troiliit ja enstatiidiga sama tooni, kuid tekstuursema pinnaga plagioklass .

Enstatiidi sees esinevad plagioklassi tilgad ja ka suuremad laigud, harvem ka kvartsi laigud. Tihti esines enstatiidi sees alasid, kus metallifaas (nii kamasiit kui ka troiliit) moodustasid 1-5  $\mu\text{m}$  tilgakeste välju (Joonis 5). Tomkins (2009) on taolisi alasid kirjeldanud tavalistes kondriitides, kui löögimoondel on impakti rõhu tõttu eri mineraalide piirpindadel tekkinud sulami emulsiooni, mis jahtudes taas tahkub. Selleks, et Fe-Ni ja FeS kondriitmeteriidis sulaksid peavad temperatuurid tõusma vähemalt  $988^{\circ}\text{C}$  ni.



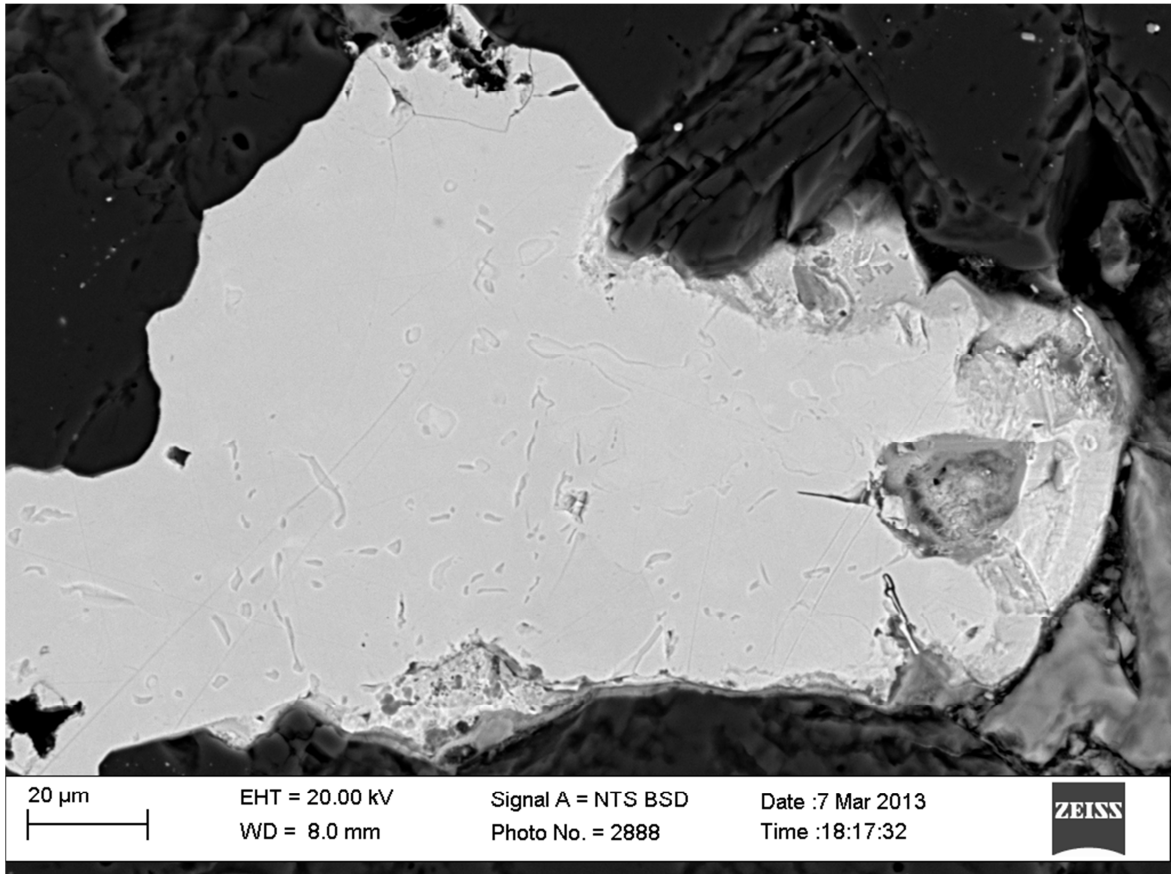
Joonis 5. Kvartsi, kamasiidi ja troiliidi tilgad enstatiidis.

### *Ehedad metallid ja intermetallilised ühendid*

Meteoriitide tüüpiline metalliline faas on kamasiit ja taeniit, mis erinevad nikli-raua vahekorra järgi. Kamasiit ehk  $\alpha$ -Fe,Ni koosneb keskmiselt 90% Fe ja 10% Ni ning taeniit sisaldab 80% Fe ja 20% Ni, kuid samas võib taeniidi niklisaldus olla kuni 70%, mis esineb raudmeteoriitides (Ramsden ja Cameron, 1966). Uuritud palas jäi taeniidi Ni sisaldus 20% ligi ja kamasiidi Ni sisaldus 5-6% piiresse. Ramsden ja Cameron (1966) väidavad ka, et pole leitud kamasiiti üle 7,8% Ni sisaldusega.

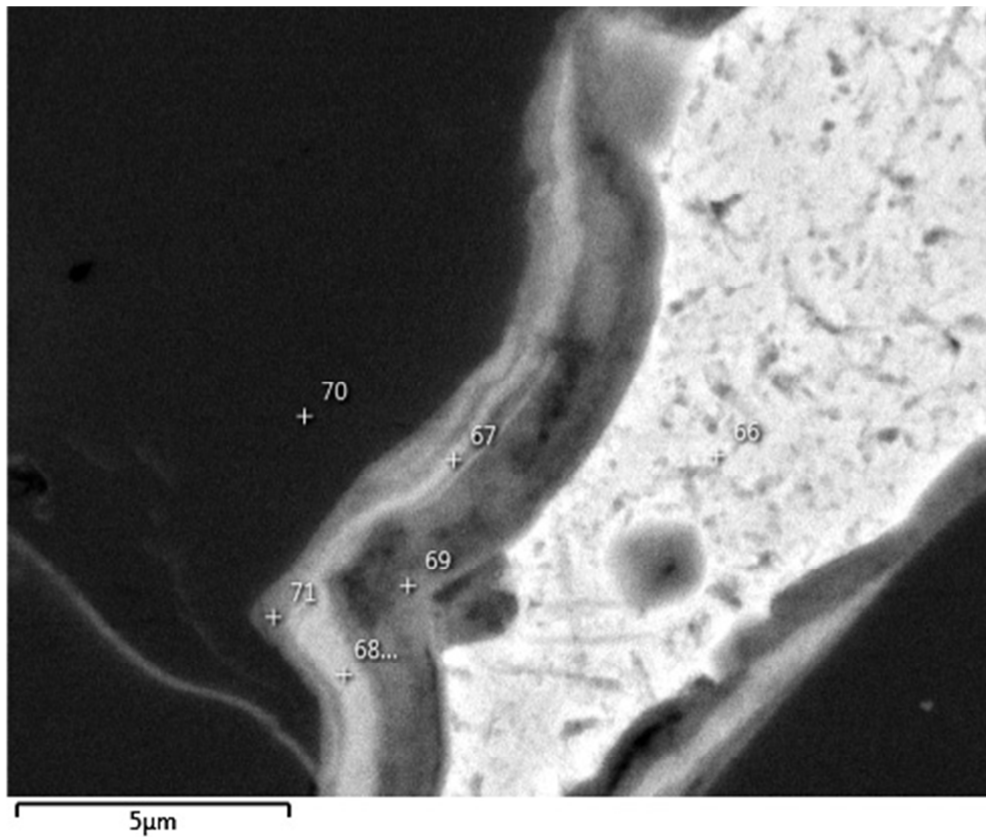
Taeniidi ja kamasiidi erinevus on pakituses ja kristalli ühikraku süngoönias. Kamasiit on raua võreparameetrite järgi ruumtsentreeritud ja taeniit nikli järgi tahktsentreeritud kristalli ühikrakuga. Kõrgetel temperatuuridel on aga mõlema kristallid tahktsentreeritud ning saab võimalikuks mineraalide kokkusulandumine vahelduvateks aladeks (Ramsden ja Cameron, 1966), mida võib identifitseerida ka uuritud palas (Joonis 6). Taeniidi ja kamasiidi sulamistemperatuurid jäävad 300-500°C vahele, sulami puhul veelgi madalamale (Ramsden ja Cameron, 1966). See tähendab, et uuritud meteoriit või vähemalt selles sisalduvad

metallifaasid peavad olema olnud kuumutatud temperatuurideni üle 500°C. Samuti esineb uuritud palas leiduv kamsiit tihti ka poorse-vesikulaarse tekstuuriga (Joonis 6 ja 7).

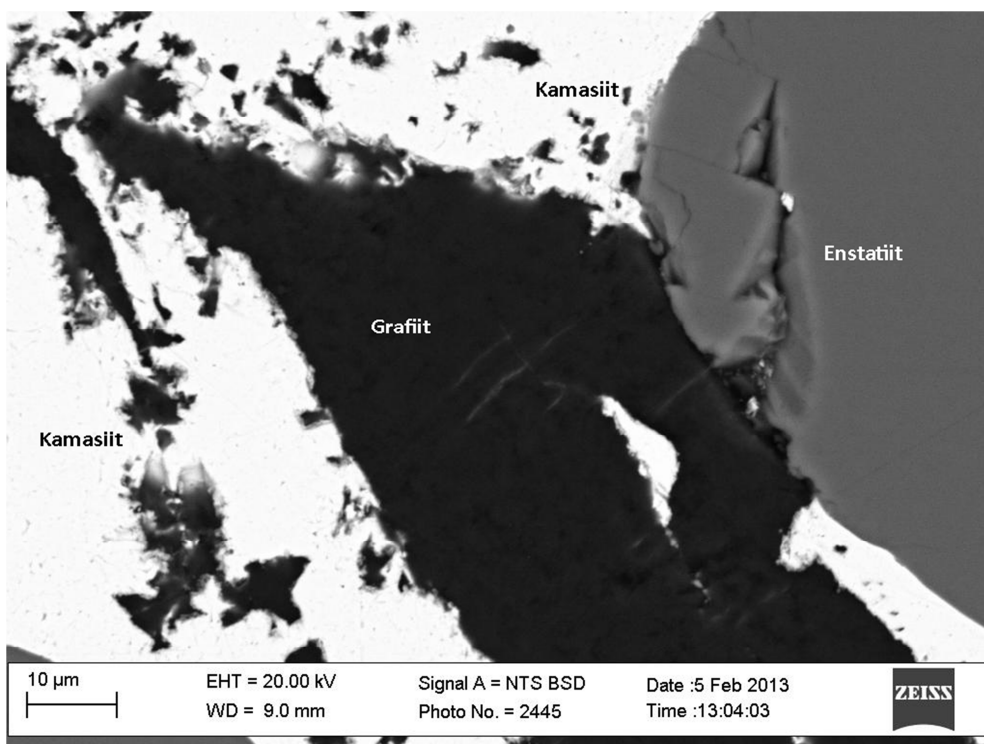


Joonis 6. Kamsiidis taeniidi suletised, alumises ääres näha ka kamsiidi iseloomulikku tekstuuri.

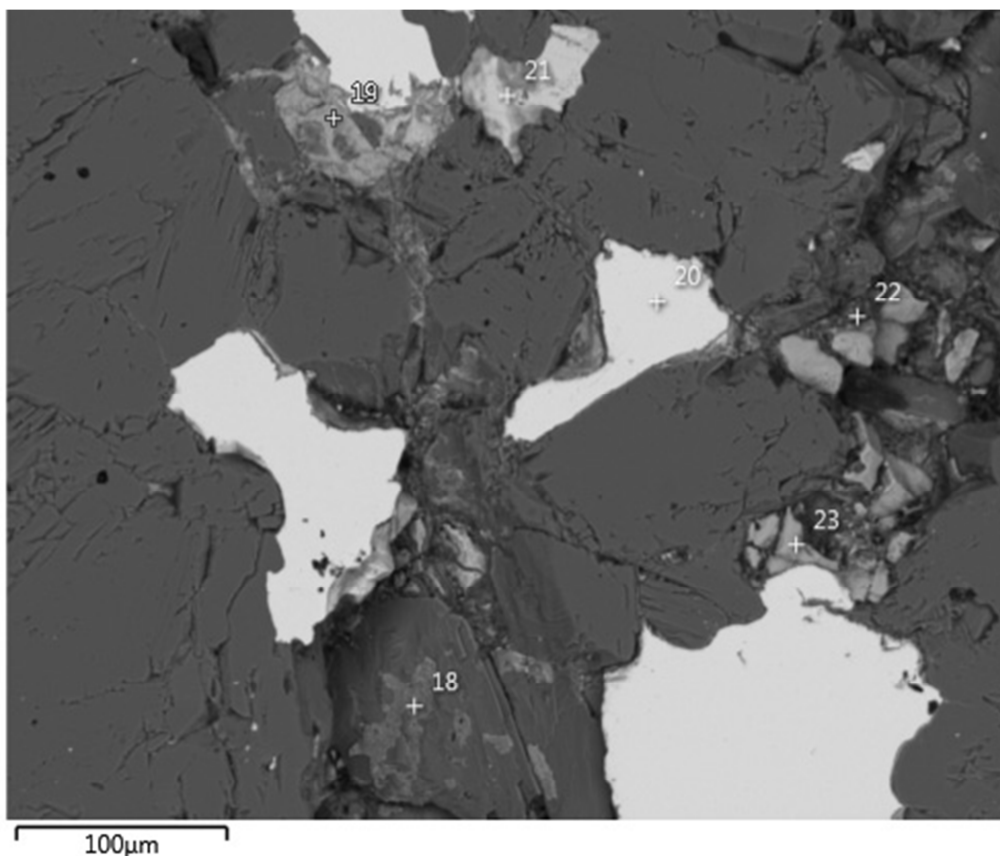
Pilistvere enstatiitkondriidi kamsiidi kavernides on identifitseeritav puhas grafiitne süsinik ja metallifaasis on sagedased enstatiidi suletised (Joonis 8). Viimased võivad esineda koos osaliselt oksüdeerunud ja fluidaalse iseloomuga rauafaasiga (Joonis 7 ja 9), mis võib viidata meteoriidipala osalisele hilisemale sulamisele impaktmoonde tõttu.



Joonis 7. Kamasiit (hele) ja rauaoksiidne ääris (hall, analüüsipunktid 67, 68, 69, milledest punktis 69 on hapnikusisaldus suurim).



Joonis 8. Grafiit kamasiidis



Joonis 9. Raud-oksiidi koostisega alad (analüüsipunkt 19 - 71,7% Fe, 24,8% O lisanditena S, Ca ja Si)

### *Sulfiidid*

Uuritud pala sisaldab erinevaid sulfiidseid faase raua, mangaani, kaltsiumi, kroomi ja tsingiga (Tabel 2). Identifitseeritud ühendid on monosulfiidid, mis tähendab, et väevliaatomiga on seotud üks metalli või muldmetalli aatom. Tüüpilised sulfiidid enstatiitkondriitides on oldhamiit, troiliit, alabandiit, niningeriit ja keiliit, mis on vastavalt erineva elementide vahekorraga Mn, Mg, Ca, Zn ja Fe sulfiidid.

Tabel 2 . Erinevate SEM-EDS'ga mõõdetud sulfiidide terade sagedus nii hulgaliselt kui ka protsentuaalselt 73 terast.

Mineraal	Hulk	%
Troiliit	26	35,62
Oldhamiit	23	31,51
Alabandiit	12	16,44
Daubreliit	9	12,33
Busekiit	3	4,11

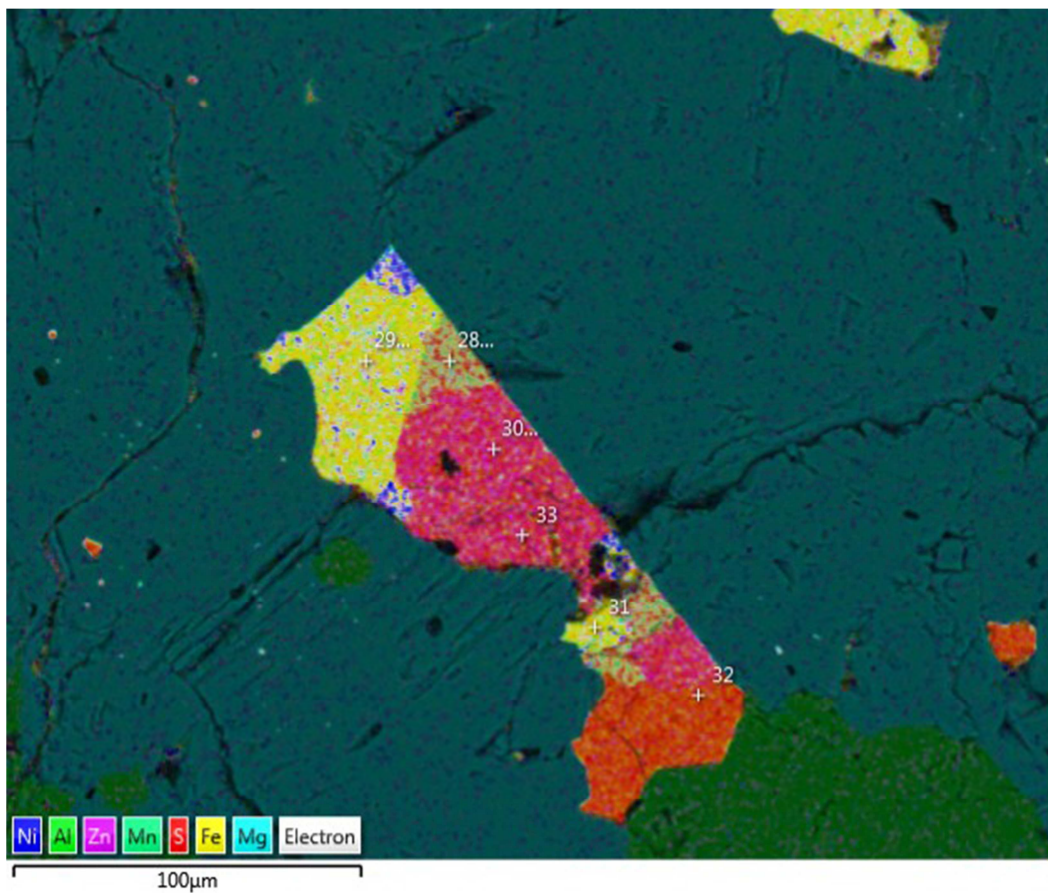
Enam esineb troiliiti, rauasulfiidi, mille koostises on vähemal määral ka Cr ja Ti. Sellega on enamasti kontaktis Mg, Mn, Ca, Zn ja/või Cr lisandiga sulfiidid. Erinevare sulfiidsete faaside elementide vahekorrad on antud tabelis 3.

Tabel 3. Enstatiitkondriitides esinevad sulfiidid ja elementide stöhhiomeetriline vahekord.

Faas/ massi %	S	Fe	Mg	Mn	Zn	Cr	Ca
Troiliit ( $\text{Fe}^{2+}\text{S}$ )	36,5	63,4	-	-	-	<0,1	-
Niningeriit*	46,5	24,3	21,2	8,0	-	-	-
Keiliit *	39,5	29,8	4,8	23,8	0,1	1,2	0,8
Oldhamiit <sup>+</sup>	44,7	0,3	1,5	-	-	-	53,5
Daubreliit ( $\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{S}_4$ )	44,5	19,3	-	<0,1	-	36,1	-
Alabandiit ( $\text{Mn}^{2+}\text{S}$ )	36,9	<0,1	<0,1	63,1	-	-	<0,1
Busekiit**	35,9	28,9	1,2	10,1	23,6	-	-

\* Karwowski *et al.*, 2007, <sup>+</sup> Palache *et al.*, 1944, \*\*Ma *et al.*, 2012

Pilistvere enstatiitkondriidis on iseloomulik sulfiidsete faaside silmatorkav koostiseline varieeruvus ühe mineraalitera piires (Joonis 10).



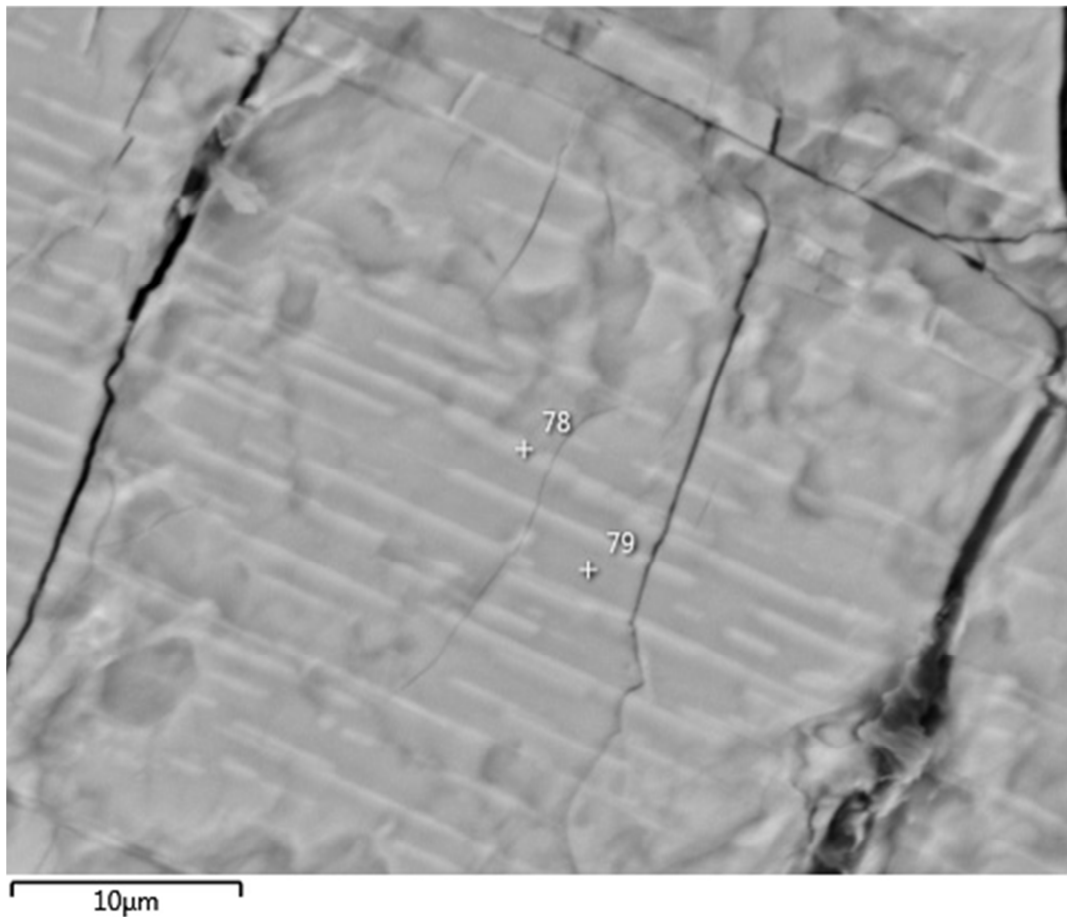
Joonis 10. Analüüsipunktis 28 on alabandiit, punktis 29 kamsiit (nurkades taeniit), punktides 30 ja 33-busekiit (Zn hulga erinevusega) ja analüüsipunktis 32 troiliit

Troiliit (FeS), mis on uuritud Pilstvere meteoriidipalas kõige levinum sulfiid (Tabel 2), esineb tüüpiliselt Cr ja Ti lisandiga. Cr sisaldus oli maksimaalselt 2%, kuid enamasti 1% ringis ning Ti alati alla 1%. Rauda on troiliidis 61-65% ja väävlit 33-37% (tabel 4).

Tabel 4. Elementide vahekord troiliidis, mõõdetud 26 tera

	<b>Fe</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ti</b>
Elementide sisaldus troiliidis, massi %	61,5	36,7	1,2	0,6
	61,1	37,1	0,9	0,9
	63,0	35,7	0,7	0,6
	65,2	33,1	1,0	0,7
	64,6	33,7	0,9	0,7
	64,7	33,7	0,8	0,8
	65,3	33,1	1,0	0,6
	65,3	33,0	1,1	0,6
	63,8	34,7	0,8	0,7
	62,7	35,2	1,3	0,8
	61,5	36,1	1,8	0,6
	62,8	35,3	1,0	0,9
	63,6	34,7	0,9	0,7
	63,6	35,0	0,9	0,5
	63,0	35,3	1,0	0,7
	62,6	35,9	0,8	0,7
	62,0	35,2	2,1	0,7
	63,3	35,2	0,9	0,6
	65,5	32,7	1,0	0,8
	65,5	32,9	0,7	0,8
	62,6	33,6	2,9	0,8
	62,8	34,4	2,1	0,7
	65,1	33,4	0,7	0,8
	65,5	32,7	1,0	0,8
	63,5	33,3	2,5	0,8
	64,3	34,0	0,9	0,8

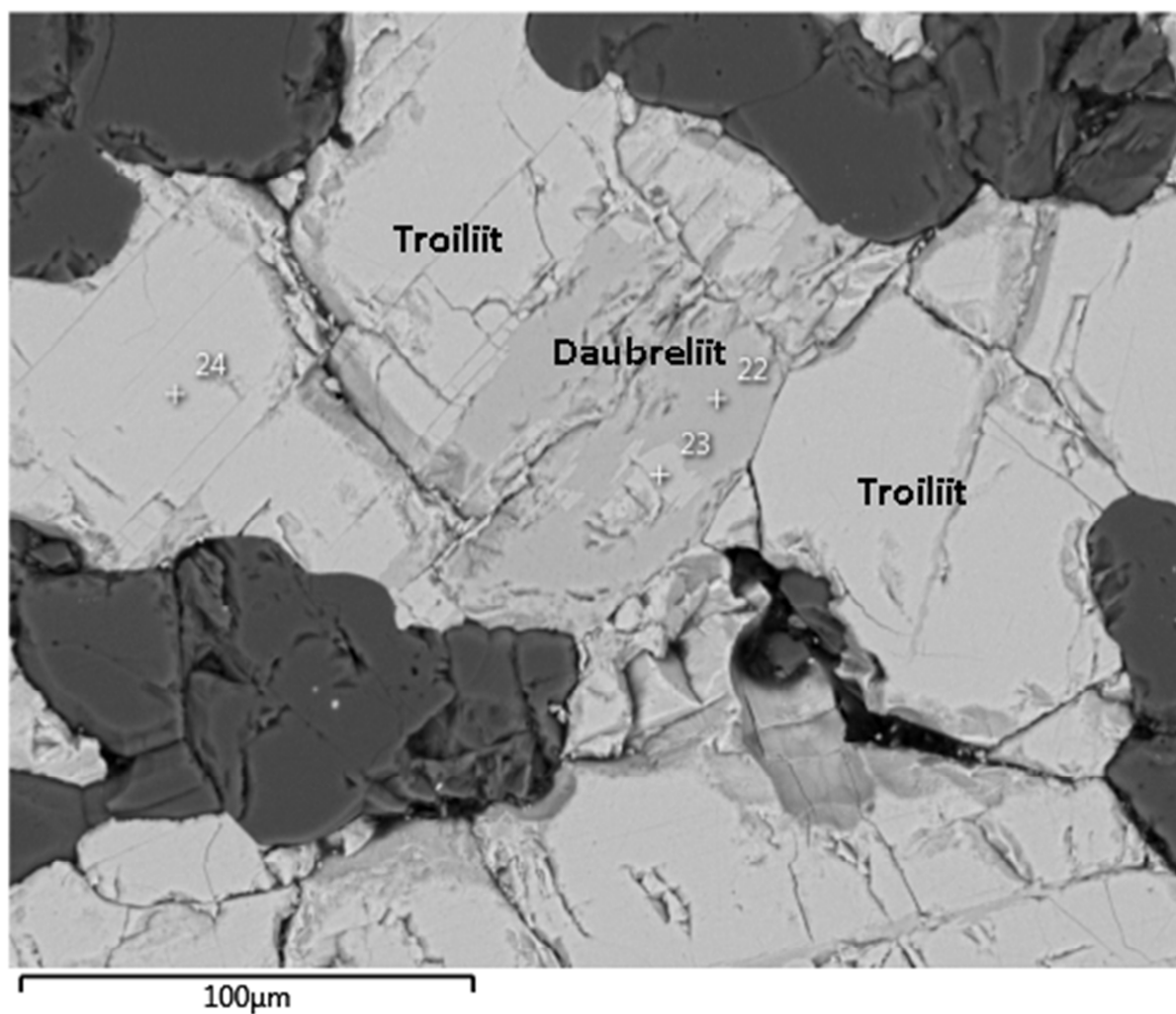
Pilstvere troiliidis esineb raua asendumise arvelt kroomirikkamaid lamelle (Joonis 11), mis enamasti on daubreliidi koostisega, kuid harvem on kroomi sisaldus vaid mõned protsendid kõrgem ja raua sisaldus sama võrra väiksem.



Joonis 11: Troiliit, kus heledad triibud on Cr rikkad

Peale nimetatud sulfiidide identifitseeriti Pilstvere meteoriidis eraldiseisvana daubreliit, mis on kroomirikas rauasulfiid ( $\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{S}_4$ ). Draubreliit esineb Pilstvere meteoriidis lamellide või ksenomorfsete aladena troiliidi sees (Joonis 12).

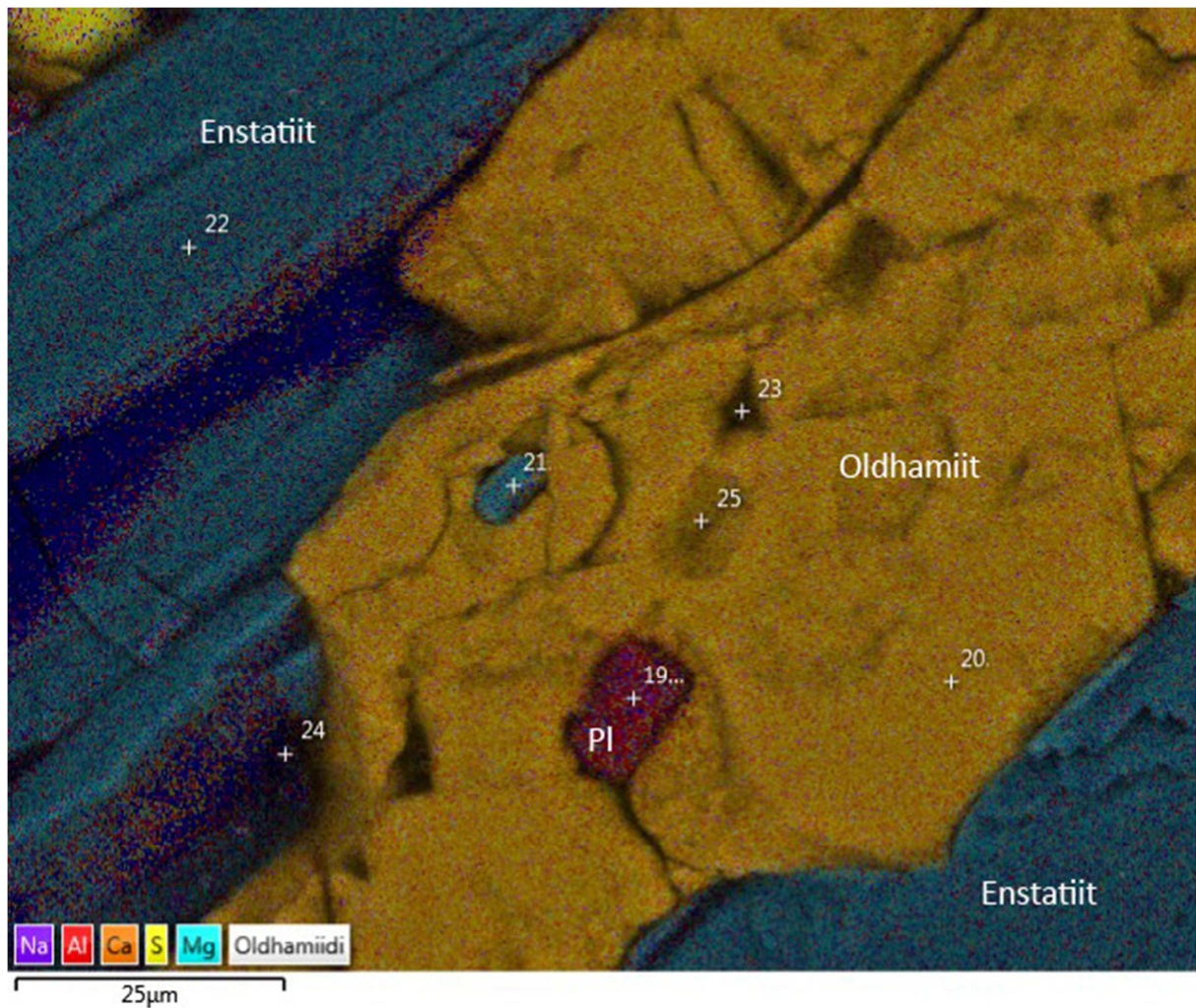
Daubreliidi koostis on 35-39% Cr, 41-45% S, 16-19% Fe ja 1-2% Mn ning ühes teras ka 0,1% Cu (Tabel 5).



Joonis 12. Daubreliidis alad troiliid

Tabel 5. Daubreliidis koostis, mõõdetud 9 tera

Elementide sisaldus daubreliidis, massi %	S	Cr	Fe	Mn	Cu	Zn
	44,3	36,2	17,4	2	0,1	
	42,5	37,2	16,7	2		1,6
	42,5	37,5	18,1	1,9		
	41,8	37,6	18,4	2,2		
	43,5	38,2	18,3	0		
	42,0	36,6	19,0	2,4		
	45,0	35,1	17,8	2,0		
	43,4	36,3	18,3	1,9		
39,6	39,9	18,4	2,1			



Joonis 13 . Oldhamiit (kollane)

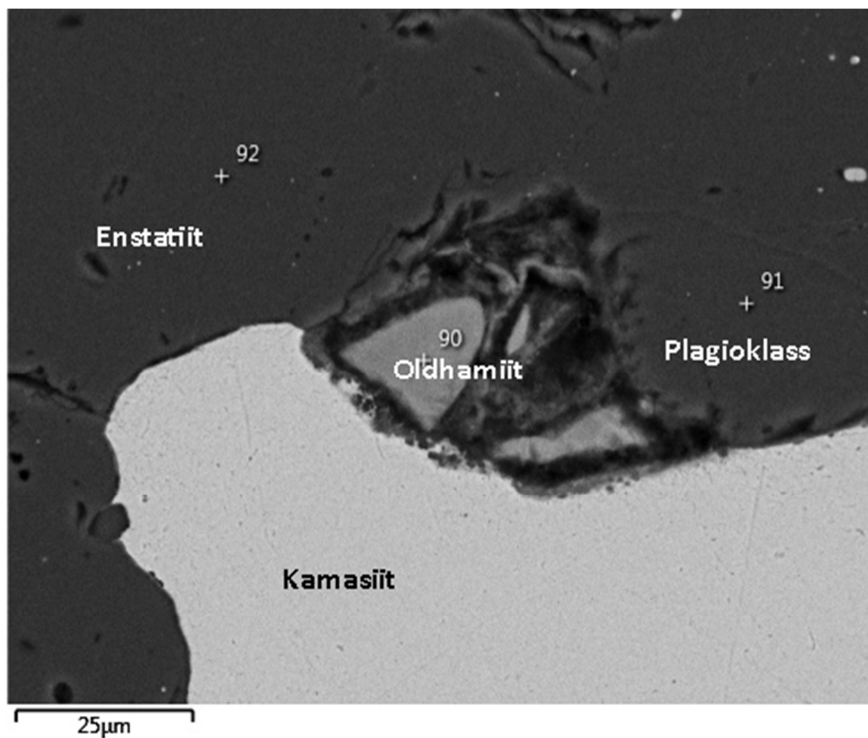
Troiliidi kõrval on Pilstvere meteoriidis teiseks tüüpiliseks sulfiidiks CaS – oldhamiit (Joonis 13).

Oldhamiidi terad on võrreldes stöhhiomeetrilise koostisega Pilstvere meteoriidis keskmisest vähesel määral Ca vaesemad, mida asendab Fe ja Mn, sarnanedes rohkem Bustee akondriidis mõõdetud oldhamiidi koostisega (Palache et al., 1944). Pilstvere meteoriidis mõõdetud oldhamiit sisaldab enamasti kuni 1-2% Mn, kuni 0,8% Mg ning Fe alla 1%. Ca sisaldus on reeglina 51-55% vahel ja S 44-45% vahel üksikute eranditega (Tabel 6). Harvem leidub oldhamiidi teri, kus raua lisandit ei ole.

Oldhamiidi terad näivad uuritud palas kohati lahustunud (joonis 14), mis on arvatavasti seotud pala poleerimisel kasutatud veepõhiste pastadega. CaS on kergesti lahustuv ja väga reaktiivne ning ei ole maapinnal tavatingimustel stabiilne (Skinner ja Luce, 1971).

Tabel 6. Elementide sisaldus oldhamiidis, mõõdetud 22 teras

Elementide sisaldus oldhamiidis, massi %	Ca	S	Mn	Fe	Mg
	53,5	44,6	1,0	0,7	0,3
	53,0	45,6	1,4	0	0
	53,7	45,9	0	0	0,4
	53,1	44,7	1,5	0,4	0,3
	52,5	44,5	1,3	1,5	0,3
	53,2	44,4	1,4	0,7	0,3
	52,6	44,5	1,5	0,9	0,5
	53,8	44,2	1,6	0,5	0
	53,6	44,5	1,5	0	0,5
	53,8	44,1	1,5	0	0,6
	54,1	44,3	1,1	0	0,4
	52,4	44,1	1,6	1,3	0,5
	53,0	44,1	1,4	1,0	0,4
	53,3	43,3	1,7	0,9	0,8
	53,8	44,6	1,3	0	0,2
	53,9	44,5	1,2	0	0,4
	53,7	44,7	1,3	0	0,4
	53,2	44,7	1,4	0,4	0,4
	53,5	45,0	1,1	0	0,4
54,1	44,7	0,9	0	0,2	
53,1	44,6	1,3	0,5	0,4	
53,5	44,8	1,4	0	0,3	

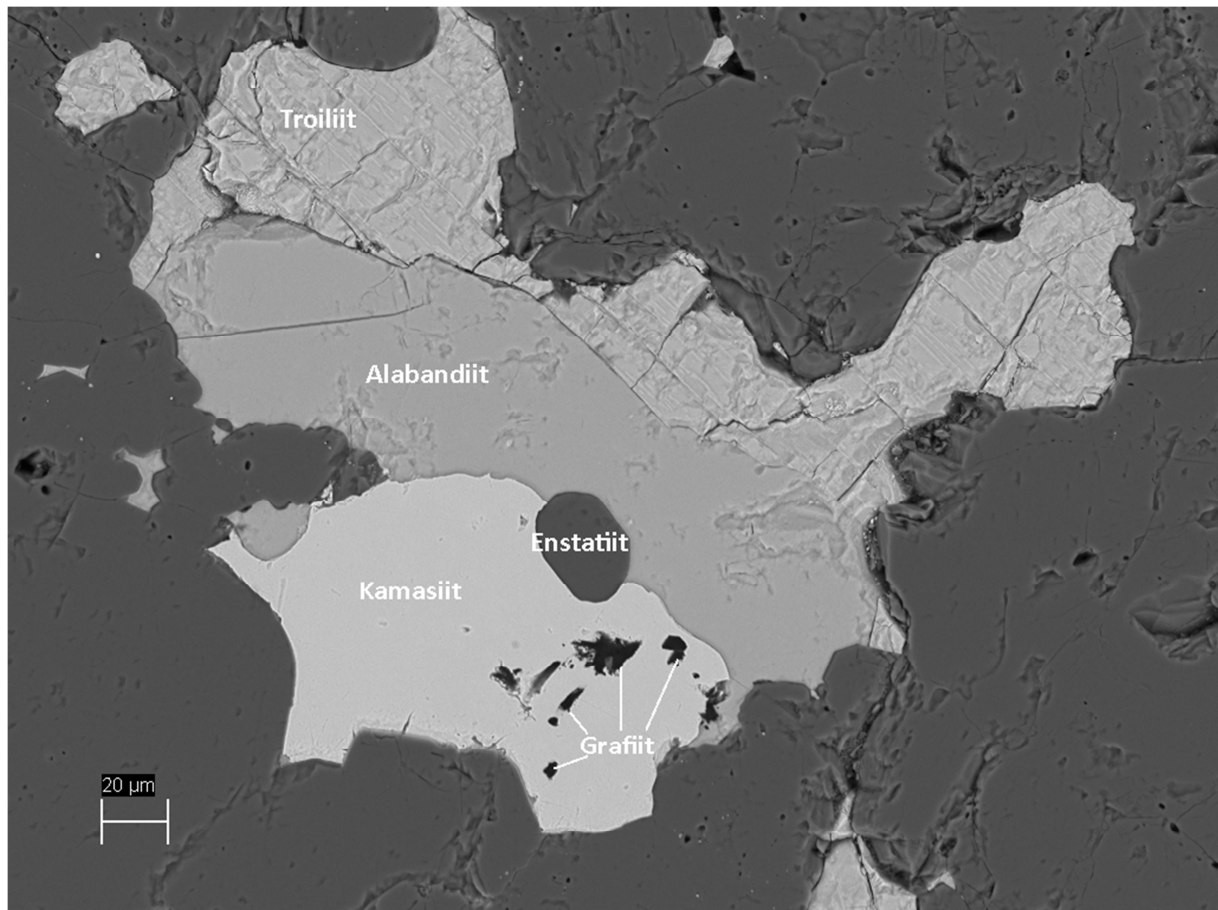


Joonis 14 . Osaliselt lahustunud äärtega oldhamiit

Varasemad uuringud (Skinner ja Luce, 1971) näitavad, et alabandiit ehk mangaani sulfiid ja magneesiumisulfiid ningeringiit ei esine kunagi koos ühte tüüpi kondriitides. Näiteks EL6 tüüpi kondriitides on troiliidi ja oldhamiidiga koos alabandiit.

Enstatiitkondriitides esinev keiliit on rauarikas ningeringiidi analoog, mis tunnistati eraldi mineraaliks alles aastal 2002. Esimesena leiti see EH4 ja EH5 tüüpi kondriitidest (Skinner ja Luce, 1971).

Uuritud Pilstvere EL6-tüüpi enstatiitkondriidis identifitseeriti alabandiit (MnS) (joonis 15) ning ningeringiiti ega ka selle rauarikast erimit keiliiti ei tuvastanud, mis vastab EL6-tüüpi kondriitide tüüpilisele koostisele.



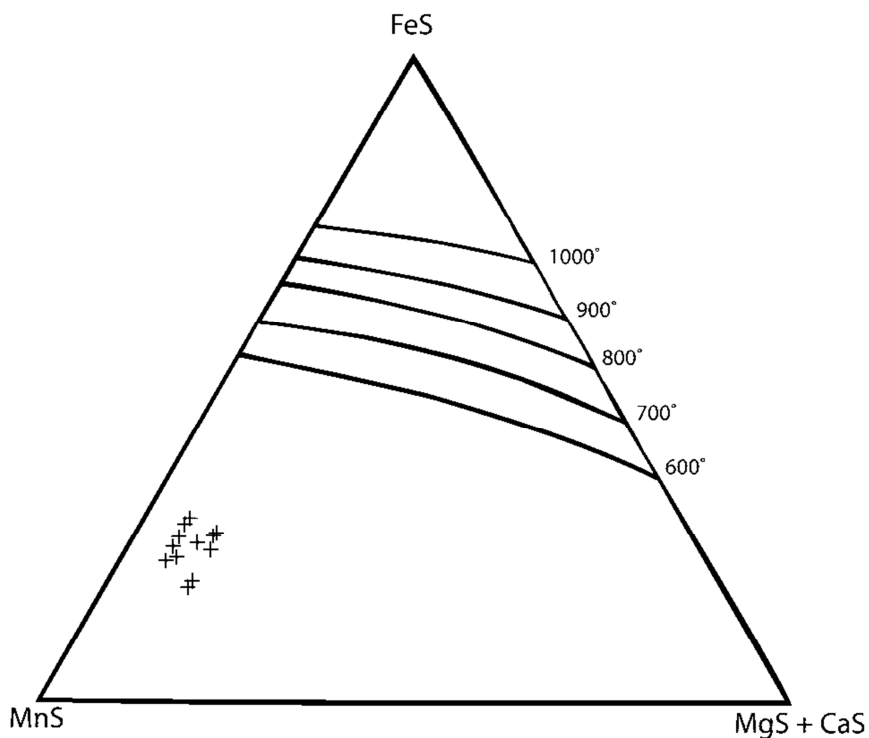
Joonis 15. Alabandiit koos kamasiidi ja Cr lamellidega troiliidiga.

Pilstvere meteoriidis määratud alabandiidi koostises on enamasti 42-47% Mn, 35-37% S, 11-18% Fe ja alla 0,5% Ca. Kaltsiumit ei esine kõigis mõõdetud terades (tabel 7).

Tabel 7. Alabandiidi koostise varieerumine mõõdetud 12 tera põhjal

Elemendi sisaldus alabandiidis, massi %	Mn	S	Fe	Mg	Ca
	42,3	36,6	17,7	3,1	0,3
	46,3	38,6	11,7	3,3	0
	43,4	35,6	17,8	3,2	0
	46,6	36,2	14,9	2,2	0,2
	44,1	36,0	16,5	2,6	0,3
	43,6	36,9	15,9	3,3	0,3
	47,0	37,0	12,6	3,4	0
	44,4	35,1	18,5	1,7	0,2
	46,6	35,0	16,3	1,7	0,3
	43,6	35,4	19,0	1,7	0,3
	45,7	34,9	17,3	1,6	0,4
	48,1	35,2	14,7	1,7	0,4

Skinner ja Luce (1971) näitasid, et alabandiidi kationide vahekord sõltub sulfiidifaasi moodustumistemperatuuridest. Selle järgi näitab Aukamäe fragmendis mõõdetud alabandiidi terade koostis, et mineraal on formeerunud madalatel temperatuuridel (alla 500°C) (joonis 16).



Joonis 16 . Alabandiidi koostise kolmnurkdiagramm ja tasakaalulise koostisega temperatuuriväljad Skinner ja Luce (1971) järgi. Analüüsitud Pilistvere kondriidi proovid märgitud ristidega.

Pilistvere meteoriidis identifitseeriti kolmes teras ka busekiit, mis on peamiselt tsingi-raua sulfiid (tabel 8). Busekiit on wursteriidi rauarikas erim, mis esmakordselt kirjeldati Zakłodzie meteoriidis alles 2012. aastal (Ma *et al*, 2012). Zakłodzie on enstatiidirikas akondriit ning busekiit ja troilliit arvatakse olevat tekkinud impaktsulast pürroitiidi (rauasulfiid) lagunemisel ja enstatiidi fluididega reageerides.

Tabel 8. Busekiidi koostis mõõdetud kolme tera põhjal.

Elemendi sisaldus busekiidis, massi %	<b>S</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>
	36,4	32,0	19,9	11,6
	36,6	31,4	20,5	11,6
	30,8	32,0	24,4	12,8

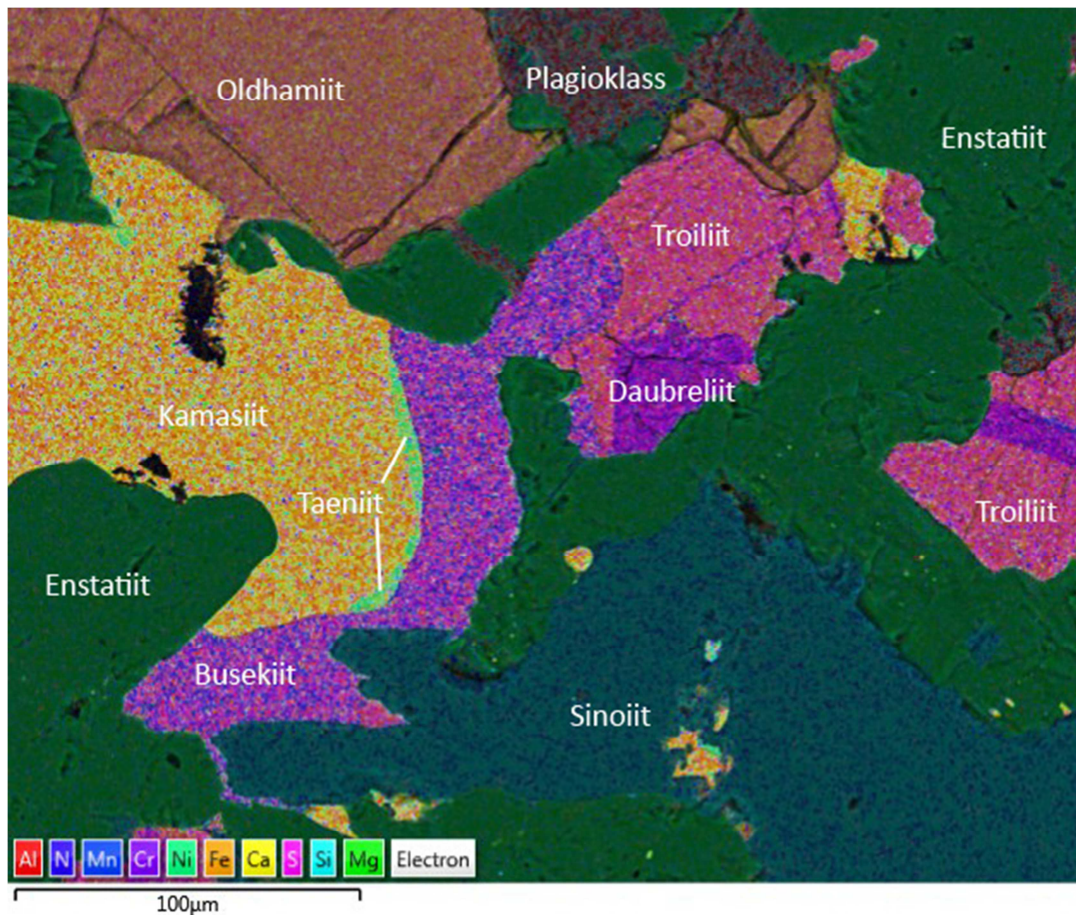
Uuritud palas on busekiit kahel juhul kontaktis alabandiidi, kamsiidi ja troiliidiga (joonis 10) ning kolmas tera on kontaktis kamsiidi, enstatiidi ja sinoiidiga. Varem Pilistvere meteoriidis busekiiti kirjeldatud ei ole.

### *Sinoiit ja šreibersiit*

Pilistvere meteoriidis identifitseeriti ka kaks ainult meteoriitides leitud mineraali. Sinoiit on ränioksünitriid -  $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$  – mis on arvatavasti tekkinud löökmoondel. Sinoiit esineb tüüpiliselt impaktil osaliselt üles sulanud enstatiitkondriitides ja selle mineraali tekketingimused ja mehhanismid pole täpselt teada (Rubin, 1997).

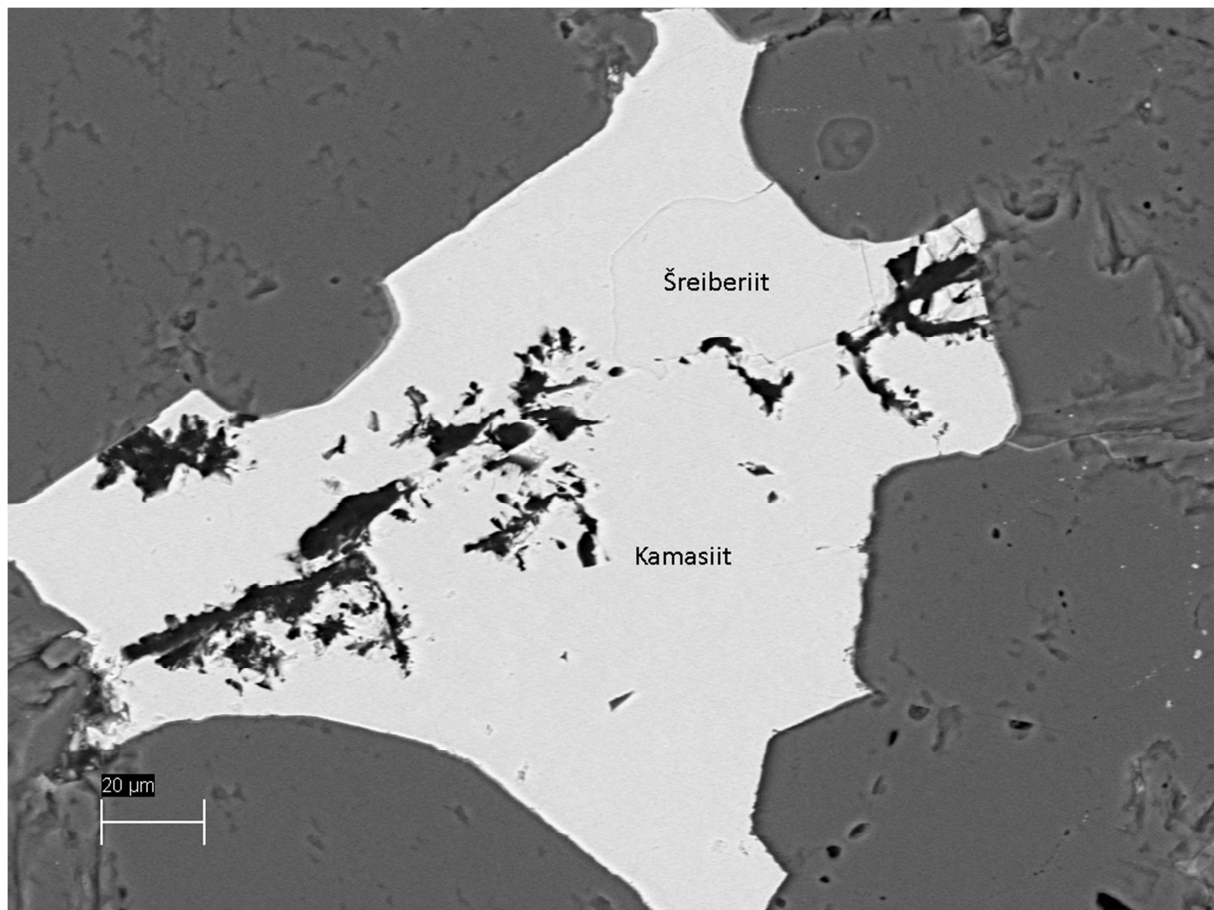
Lämmastik vabaneb mineraalist temperatuuridel  $\sim 950\text{-}1086^\circ\text{C}$  (Rubin, 1997) ja lendub, kuid suurte rõhkude (28-34GPa) (Sekine, *et al.*, 2006) mõjul jääb osa lämmastikust siiski kivimit moodustama (Rubin, 1997). Samas temperatuurivahemikus on vedelad ka Ni-Fe sulamid (Ramsden ja Cameron, 1966) ja selles on lahustunud redutseeritud räni, mis reageerib lämmastikuga ning moodustab sinoiidi (Rubin, 1997).

Pilistvere meteoriidis leiti üks sinoiidi tera, mis on kontaktis enstatiidi ja busekiidiga (joonis 17).



Joonis 17. Enstatiitkondriidile iseloomulik mineraalide mitmekesisus: sinoiit, busekiit, kamasiit taeniidiga, troiliit daubreliidiga, oldhamiit ja maatriksmineraalidena enstatiit ja plagioklass.

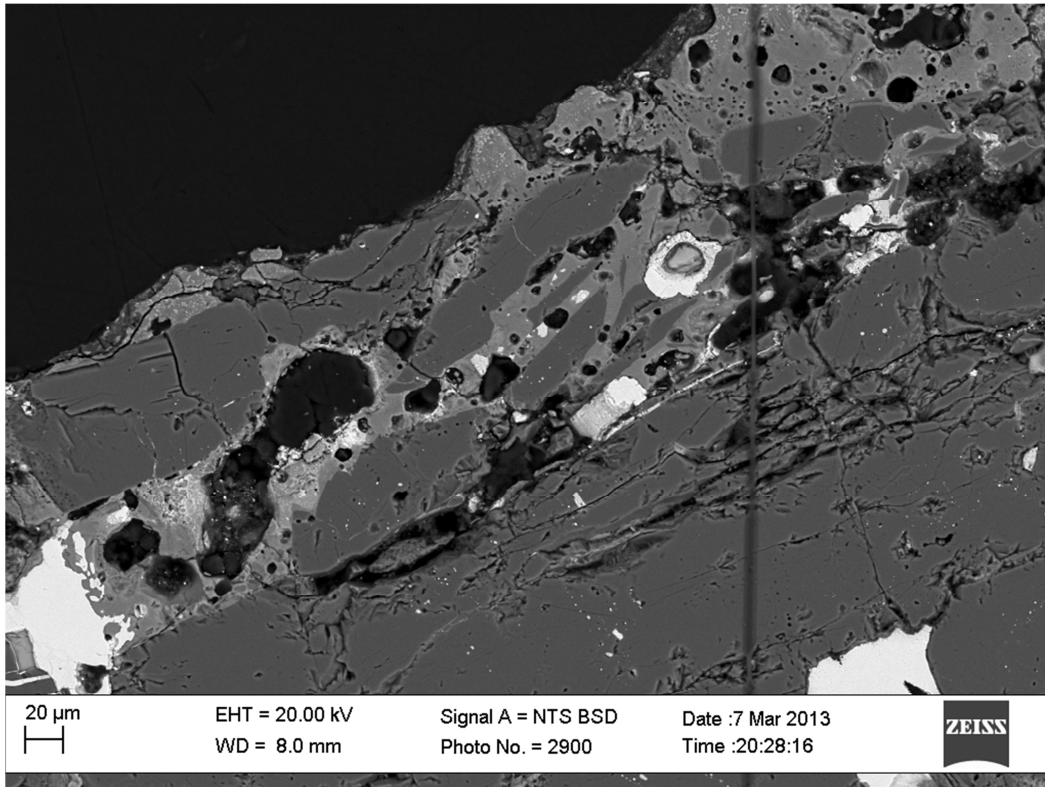
Lisaks sinoiidile identifitseeriti haruldane mineraal šreibersiit (joonis 18), mis on nikli-raua fosfaat  $[(\text{Fe},\text{Ni})_3\text{P}]$ . Šreibersiidis on kirjeldatud ka räni esinemist nikli arvelt. Räni osakaal mineraalis on väiksem kõrgema petrooloogilise tüübi enstatiitkondriitides (Wai ja Knowles, 1972). Samas uurimuses on jõutud ka järeldusele, et akondriidid (ilma kondriteta ehk seega rohkem metamorfiseerunud) on väga lähedased oma koostiselt 6. tüüpi enstatiitkondriitidele. Teiseks toetavaks argumendiks võiks pidada ka seda, et uuritud enstatiitkondriidis leidub busekiiti, mis on esmakordselt kirjeldatud samuti enstatiit akodriidis (Ma *et al*, 2012).



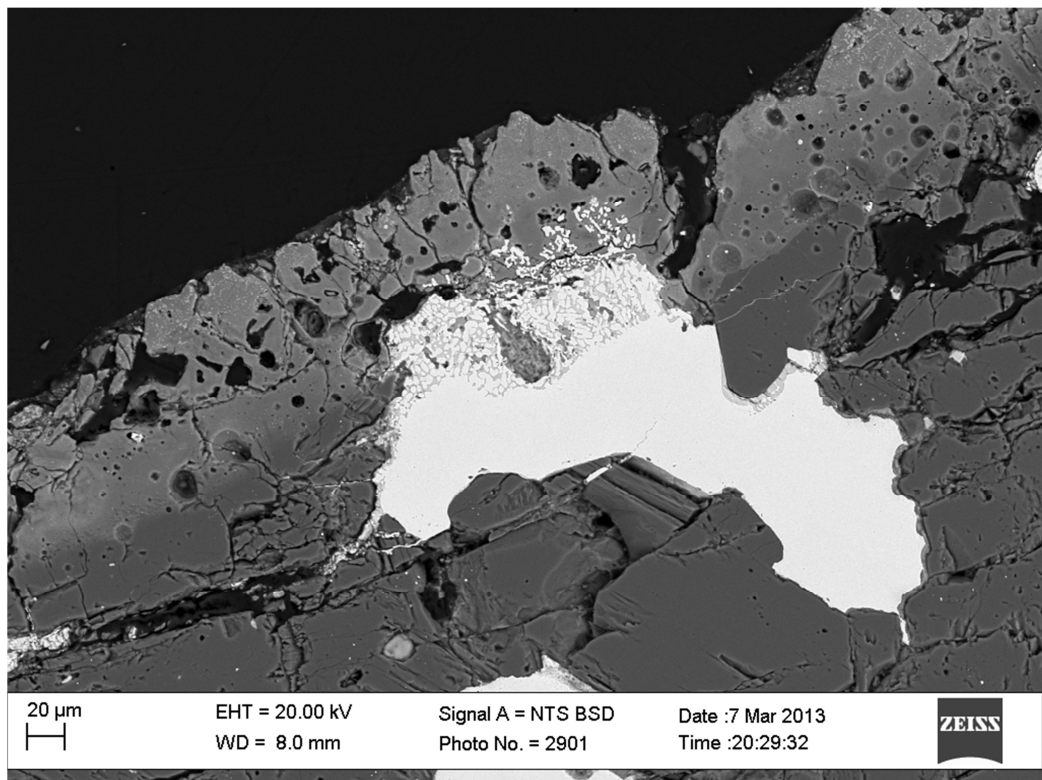
Joonis 18: Kamasiit, milles grafiidi suletised, ning šreibersiit

### *Sulamiskoorik*

Uuritud pala väliserval on hästi eristatav sulamiskoorik, mis on arvatavasti moodustunud sissetungimisel ja pidurdumisel Maa atmosfääris. Sulamiskoorik ulatub pinnast kuni 150 - 200 μm sügavusele ning on osaliselt brektšastunud. Ruumi kildude vahel täidab oksüdeerunud fluidaalne kivimsula, milles esinevad ka õhumullid (vesiikulid). Sulamistsooni ulatunud metallifaas moodustab tilkade klatri (joonised 19 ja 20).



Joonis 19. Sulamiskoorik, mis on moodustunud meteoriidi pinnale Maa atmosfääri läbides



Joonis 20. Kamasiidi segunemine enstatiidiga sulamiskoorikus.

## Kokkuvõte ja järeldused

Pilistvere meteoriidisajust leitud neli fragmenti on ühed esimesed tõestatud enstatiitkondriitidest (Tiirmaa, 2002). Enstatiitkondriidid on huvipakkuvad just seetõttu, et need koosnevad aineist, mis arvatavasti tekkis enne Päikesesüsteemi lõpliku formeerumist. Seega pakuvad seda sorti meteoriidid võimalust vaadata ajas tagasi ja uurida, mis tingimused valitsesid sel ajal ja milline oli protoplanetaarsüsteemi koostis. Lisaks on osaliselt differentseerunud enstatiitkondriidid võrreldes teiste meteoriidirühmadega oluliselt sarnasemad Maa (kogu)kivimilise koostisega (McSween, 1987).

Uuritud Pilistvere meteoriid on EL6 tüüpi, tugevalt moondunud enstatiitkondriit. Selle koostise selgitamiseks kasutati Pilistvere meteorisajust leitud Aukamäe fragmenti, mille palast tehti kogukivimi röntgendifraktsioonanalüüs üldmineraloogilise koostise määramiseks, röntgenfluoresentsanalüüs ja skaneeriv elektronmikroskoopiline analüüs pala keemilise koostise üldiseloomustamiseks ja meteoriiidi koostisosade detailsemaks kirjeldamiseks. Töö eesmärgiks on kirjeldada Pilistvere meteoriiidi mineraloogilist ja keemilist koostist ning mineraalse koosluse järgi teha järeldused nende formeerumistemperatuuride kohta.

Pilistvere meteoriiidi Aukamäe fragmendi põhimass koosneb peamiselt enstatiidist, vähem plagioklassist ning metallilisest faasist, mida esindab taeniidi suletistega kamsiit. Meteoriidis leidub mitmeid ebahariliku koostisega Maa pinnal ebastabiilseid sulfiide, mida esindavad nii Mn, Fe, Ca kui ka Cr ja Zn sulfiidid. Neist viimast, ZnS - busekiiti pole Pilistvere enstatiitkondriidis varem kirjeldatud. Peale põhifaaside leidub kondriidis grafiidisuletisi ja üksikute leidudena haruldasi, vaid meteoriidides esinevaid mineraale - sinoiiti, mille leidumine viitab sellele, et meteoriid on talunud ka impaktimoonet, ja mineraali šreibersiiti, mis on haruldane Fe,Ni-fosfaat.

Kondriidipala välisküljele on moodustunud sulamiskoorik, kus eri mineraalid on fluidaalselt vaheldumisi sulanud. Mõnesaja mikromeetri paksune sulamistsoon on meteoriiidi pinnale tekkinud pidurdumisel Maa atmosfääris.

Meteoriidis esinevate mineraalide keemilise koostise järgi saab hinnata nende formeerumistemperatuure. Pilistvere meteoriiidi Aukamäe fragmendis identifitseeritud alabandiidi koostises esinevate Mn, Fe, Mg ja Ca vahekord näitab, et mineraal on tekkinud moondetemperatuuridel alla 500°C (Skinner and Luce, 1971). Sama temperatuurivahemikku

võib oletada ka meteoriidis identifitseeritud metallifaaside kamasiidi ja taeniidi alusel (Ramsden ja Cameron, 1966). Seega võib järeldada, et Pelistvere meteoroid moodustus temperatuuridel ~500 °C. Sinoiidi esinemine viitab vähemalt lokaalselt kõrgematele temperatuuridele. Sinoiidi moodustumine vajab temperatuure 1000°C ligi (Rubin, 1997) ning ka kõrget rõhku (28-34GPa) (Sekine, *et al.*, 2006). Seda järeldust toetab ka kohati esinevad metallifaasi ja troiliidi mikrosuletised enstatiidis.

### *Tänuavaldused*

Täna Jaan Aruvälja röntgedifraktsiooni ja röntgenfluoresentsanalüüside teostamise eest.

Täna ka Indrek Musta vormistuslike ja keelesiste nõuannete eest

## **Geochemistry and mineralogy of EL6 enstatite chondrites - Pilistvere meteorite**

Enstatite chondrites are rare meteoroidal material believed to represent chemically primitive material of the protosolarsystem. Enstatite chondrites contain highly reduced minerals in sulphide or metal forms. Chondrites also contain molten droplets called condrules (McSween, 1987).

The Pilistvere meteorite is one of the first proven enstatite chondrites. There are four witnessed fall fragments of the Pilistvere chondrite, which fell in the middle of Estonia on august of 1863 and these are named Aukamäe, Kurla, Wahhe and Saviaugu. The Pilistvere meteorite is described as an EL (low iron) enstatite chondrite of the petrologic type 6 (metamorfosed) (Tiirmaa, 2002). This means it has few or no condrules because of its high metamorphic grade.

The research is focused on the Aukamäe fragment and gives an overview of the chemical and mineralogical composition of the fragment and its assumed formation temperatures.

A small section (2.5x2x1 cm) was cut from the Aukamäe fragment. It was analyzed by X-ray diffraction and X-ray fluorescence methods and observed by scanning electron microscopy method.

The matrix of the Pilistvere meteorite is mainly enstatite, les plagioclase and silica. The main metallic phase is kamacite, with inclusions of taenite. Kamacite holds inclusions of graphite as well. There are also several sulphides of Fe, Ca, Mn, Mg, Cr and Zn, whereas buscite (ZnS) has not been described in the Pilistvere meteorite before. Exotic minerals like sinoite (oxynitride) and schreibersite (phosphate) were observed. In addition, there was an opportunity to describe a few hundreds micrometers thick fusion crust.

The characterization of the chemical composition of the minerals formed in the meteorite make possible to determine its formation temperatures. The relation between the chemical equilibrium of Mn, Mg, Fe and Ca in mineral alabandite and its formation temperature has been studied by Skinner and Luce (1971). The measurement of Alabandite grains in the Pilistvere meteorite confirms its formation temperatures lower than 500°C. The formation of kamacite-taenite solid solution takes place at the same temperature range (Ramsden ja

Cameron, 1966). Sinoite forms at much higher temperatures (950-1085 °C) (Rubin, 1997) and pressures (28-34GPa) (Sekine, *et al.*, 2006) and therefore is thought to be an impact-related mineral. The metal phase microinclusions in enstatite also refer to impact melt (Tomkins, 2009). Therefore, it seems that the meteorite is formed at temperatures lower than 500 °C, but high temperatures caused by impact events have strongly influenced its chemistry and structure.

## Viidatud kirjandus

Huss G. R., Rubin A. E. and Grossman J. N. (2006) Thermal metamorphism in chondrites. Meteorites and the Early Solar System II. Univ. Arizona Press, Tucson, lk. 567-586

Javoy, E. *et all* . 2010. The Chemical composition of the Earth: Enstatite chondrite models. Earth and Planetary Science Letters. nr 293, lk 259-268

Lawrantjewa, Z.A. 1996. Elemental composition of mineraal constituents from Pillistfer EL6 chondrite. NASA Astrophysics Data System. Lunar and Planetary Institute, lk 737-738

Lin, Y. El Goresy, A. 2002. A comparative study of opaque phases in Qingzhen (EH3) and MacAlpine Hills 88136 (EL3): representatives of EH and EL parent bodies. Meteoritics & Planetary Science ,nr.37, lk. 577-599

Lodders ,K. Fegley, B, Jr. 1998. The Planetary Scientist's Companion. Oxford University Press, New York

Karwowski, Ł., Kryza, R., Przylibski, T.A., 2007. New chemical and physical data on keilite from the Zakłodzie enstatite achondrite. The American Mineralogist, Vol 92, lk 204-209

Ma, C., Beckett, J.R., Rossman, G.R. 2012. Busecite, (Fe,Zn,Mn)S, a new mineraal from the Zlakodzie meteorite. The American Mineralogist, Vol 97, lk 1226-1233

McSween, H.Y., 1987, Meteorites and their Parent Planets. Cambridge University Press, Cambridge  
Mittlefehldt ,D.W. 2008. Meteorites – A Brief Tutorial. Reviews in Mineralogy & Geochemistry. nr. 68, lk. 571-590.

Palache, C., Berman, H., Frondel, C.,1944. Dana's system of mineralogy, vol 1, lk 208–209.

Peters, S.T.M, Münker, C. 2012. Uniform distribution of p-process <sup>174</sup>Hf in extraterrestrial materials, European Mineralogical Conference, Vol. 1

Ramsden, A.R., Cameron, E.N. 1966. Kamacite and taenite superstructures and a metastable tetragonal pahse in iron meteorites. The American Mineralogist, Vol 51, lk 37-55

Rubin, A.E. (1997) Sinoite (Si<sub>2</sub>N<sub>2</sub>O): Crystallization from EL chondrite impact melts. The American Mineralogist, Vol 82, lk 1001–1006.

Rubin, A.E & Scott, R.D & Keil, K. 1997. Shock metamorphism of enstatite chondrites. Geochimica et Cosmochimica Acta .nr. 61 /4, lk.847-858

Scott, E.R.D. 2011. Meteorites: An Overview. Elements nr 7 /1, lk 47-48

Sekine, T., He, H., Kobayashi, T., Shibata, K.,2006. Sinoite (Si<sub>2</sub>N<sub>2</sub>O) shocked at pressures of 28 to 64 GPa. The American Mineralogist, Vol 91, lk 463–466

Semenenko, V. P., Samoilovich, L. G. 1982. The Pilistvere meteorite. Meteoritika, nr. 40, lk 28-33

Skinner , B.J ja Luce, F.D. 1971. Solid solutions of the type (Ca,Mg,Mn,Fe)S and their use as geothermometers for the Enstatite chondrites. The American mineraloogist, vol 56, lk 1269-1296

Zipfel, J., Bischoff, A., Schultz, L., Spettel, B., Dreibus, G., Schönbeck, T., Palme, H. 2010. Mineralogy, chemistry, and irradiation record of Neuschwanstein (EL6) chondrite. *Meteoritics & Planetary Science* 45, Nr 9, lk 1488-1501

Tiirmaa, R. 2002. *Meteoriidid ja meteoriidikraatrid*. K&O Ofset. Tallinn, lk 75-79

Tomkins, A.G., 2009. What metal –troilite textures can tell us about post-impact metamorphism in chondrite meteorites. *Meteoritics & Planetary Science* 44, Nr 8, lk 1133-1149

Trieloff, M. Palme, H., (2006) „The origin of solids in the early Solar System. *Planet Formation – theory, observations and experiments*. Cambridge university press , lk 64-89

Wai, C.M., Knowles, C.R. 1972. The metal phase of the Bustee enstatite achondrite. *Mineralogical Magazine* , vol. 38, lk. 627-629

Wenk, H. & Bulakh, A. 2011. *Minerals: Their Construction and Origin*. Cambridge university press. New York

White, W.M. *Geochemistry*, 2013. Wiley-Blackwell. USA, lk 442-456

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

Mina \_\_\_\_\_ Sigrid Soomer \_\_\_\_\_  
(*autori nimi*)  
(sünnikuupäev: \_\_\_\_\_ 27.09.1986 \_\_\_\_\_)

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

EL6 kondriitmehooriitide geokeemia ja mineraloogia - Pilstvere meteoriiit  
\_\_\_\_\_  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on \_\_\_\_\_ Kalle Kirsimäe \_\_\_\_\_,  
(*juhendaja nimi*)

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **24.05.2013**