

Partakarvan varassa – Partaterän tylsymisen  
tutkiminen elektronimikroskoopilla

Pro Gradu  
Turun yliopisto  
Fysiikan ja tähtitieteen laitos  
Fysiikka  
Helmikuu 2021  
LuK Ela Arasola  
Tarkastajat:  
Sari Granroth  
Johannes Niskanen

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Arasola, Ela Partakarvan varassa – Partaterän tylsymisen tutkiminen elektronimikroskoopilla

Pro Gradu -tutkielma, 71 s.

Fysiikka

Helmikuu 2021

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -järjestelmällä.

---

Kaikki ihmiset maailmassa tunnistavat terävän esineen ja tylsyneen terän. Terien tylsyminen on kuitenkin monimutkainen asia, jota on tutkittu yllättävän vähän. Tylsymiselle ei ole standardia tai mittaria. Mikäli tällainen kehitettäisiin, voitaisiin erilaisia teriä vertailla paremmin keskenään ja saada niistä pitkäikäisempiä. Tämä olisi loistava asia niin yksittäiselle käyttäjälle, kuin maapallollekin.

Tässä tutkielmassa tutkitaan terän tylsymistä pyyhkäisyelektronimikroskoopin eli SEMin (Scanning Electron Microscope) avulla. Käytettyjä teriä verrataan käyttämättömään verrokkiin ja havainnoidaan eroja. Valitsin tutkimuskohteekseni perinteisen partaterän yksinkertaisen muotonsa, sopivan kokonsa sekä helpon saatavuutensa vuoksi. Tutkielmassani tarkastelen yhtä käyttämätöntä ja kolmea eri kosteusolosuhteissa säilytettyä terää. Näin saan havainnollistettua myös säilytyksen vaikutusta.

Teriä käytettiin noin kymmenen kertaa. Käyttöjakson aikana ja päätyttyä löysin teristä erilaisia kategorisia piirteitä. Näiden avulla pystyin vertailemaan kulumista eri terissä. Työssä havaitsin myös käyttämättömän terän olevan jo valmiiksi epäsäännöllisen muotoinen elektronimikroskoopilla tarkasteltuna. Käytetyt terät kuluivat tietyin tavoin ja siitä päättelin, että yksittäiset kulumat yhdistyvät toisiin kulumiin ja tämä näyttäisi saavan aikaan terän laajempaa pyöristymistä. Havaitsin myös terien pinnan muuttuvan käytössä, mikä saattaa vaikuttaa partakarvan liukumiseen terää pitkin ja siten sen leikkautumiseen. Nämä asiat vaativat kuitenkin jatkotutkimuksia. Tutkielmani varmistaa myös aiemmin julkaistuja tutkimustuloksia sekä tuo niihin lisätietoa.

Asiasanat: SEM, pyyhkäisyelektronimikroskooppi, elektronimikroskooppi, kuvantaminen, terä, partaterä, tylsyminen

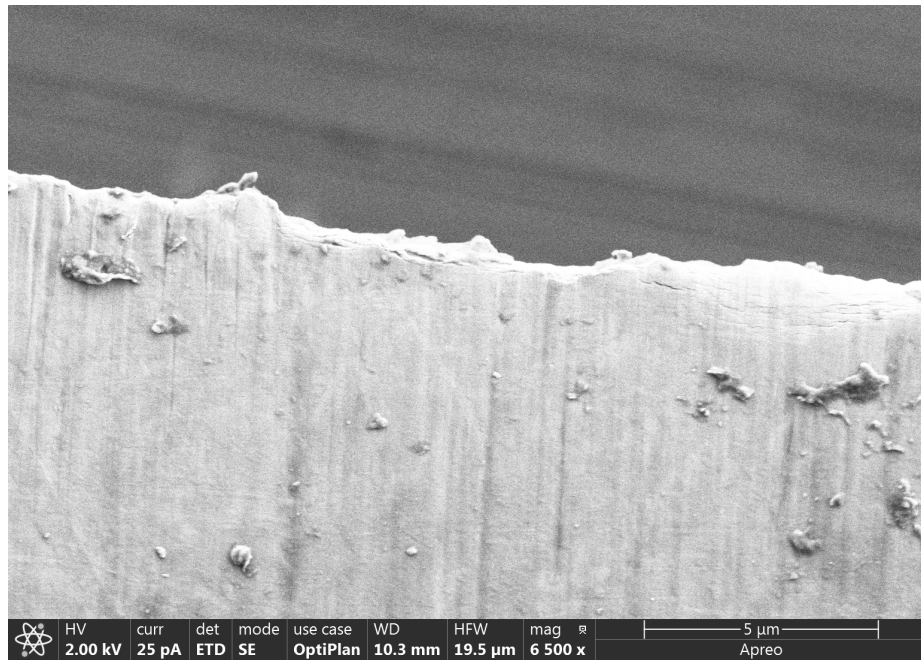
# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Parranajovälineistä</b>	<b>3</b>
2.1	Partaterä . . . . .	4
2.2	Partaterän valmistus . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Elektronisuihkun ja näytteen välinen vuorovaikutus</b>	<b>7</b>
3.1	Elektronien liike ja vuorovaikutustilavuus . . . . .	12
3.2	Näytteen varautuminen . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Pyyhkäisyelektronimikroskoopin rakenne</b>	<b>17</b>
4.1	Elektronitykki . . . . .	20
4.1.1	Terminen elektronilähde . . . . .	21
4.1.2	Kenttäemissiolähde . . . . .	22
4.2	Filamenttien vertailu . . . . .	22
4.3	Elektro-optinen systeemi . . . . .	24
4.3.1	Apertuuri . . . . .	25
4.3.2	Kokoojalinssi . . . . .	26
4.3.3	Objektiivivi . . . . .	27
4.3.4	Stigmaattori . . . . .	28
4.3.5	Pyyhkäisykäämi . . . . .	29
4.4	Näytekammion ominaisuuksista . . . . .	29
4.5	Kamerat . . . . .	31
4.6	Tyhjiösystemi . . . . .	32
4.7	Ilmaisimet . . . . .	32
4.7.1	Everhart-Thornley -ilmaisim . . . . .	32
4.7.2	BSE-analysaattori . . . . .	33

4.7.3	EDX-analysaattori . . . . .	34
4.7.4	In-lens/in-column -ilmaisimet . . . . .	36
4.7.5	Muita ilmaisinjärjestelmiä . . . . .	38
4.8	Ohjainlaitteisto . . . . .	40
4.9	Näytteen käsittely . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Mittaukset</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>Tulokset ja pohdinta</b>	<b>44</b>
6.1	Terän alkuaineanalyysi . . . . .	45
6.2	Terän pinta . . . . .	49
6.2.1	Epäpuhtaudet . . . . .	50
6.2.2	Piilaukut . . . . .	50
6.2.3	Platina . . . . .	52
6.2.4	Ruoste . . . . .	52
6.3	Terien muodot ja kuluminen . . . . .	54
6.3.1	Verrokkiterä . . . . .	58
6.3.2	Normaaliterä . . . . .	59
6.3.3	Kuivaterä . . . . .	61
6.3.4	Märkäterä . . . . .	62
6.3.5	Yleisvertailu tylsymisestä . . . . .	64
<b>7</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>67</b>

# 1 Johdanto

Tylyminen on universaalia. Kaikki asiat kuluvat ja terät tylsyvät. Tylymisestä ei ole kuitenkaan monia julkaisuja, ja useimmat tutkimukset keskittyvät veitsiin tai niiden teroittamiseen [1, 2, 3]. Terävyydelle tai sen mittaamiselle ei ole myöskään olemassa standardia [4]. Tässä tutkielmassa tylymisen kohteeksi valittiin partaterä yksinkertaisen muotonsa, sopivan kokonsa sekä helpon saatavuutensa vuoksi. Tässä työssä tutkin terän tylymistä pyyhkäisyelektronimikroskoopin avulla. Koejärjestyksessäni pyrin sulkemaan pois mahdollisimman monia satunnaistekijöitä, minkä vuoksi käsittelen partateriä ja niiden kulumista käytössä. Kun erilaisten tekijöiden määrä tylymiseen minimoidaan ja mittaus pidetään mahdollisimman toistettavana, nähdään käytöstä johtuneet muutokset selkeämmin. Partaterä on myös arkisena käyttöesineenä mielenkiintoinen, sillä tylsyneen terän tunnistaa heti, vaikkei tiedäkään miten se on tarkalleen tylsynyt. Kuvassa 1 on käytetyn partaterän topografia-kuva.



Kuva 1. Kuvassa on topografinen kuva partaterästä. Käytetty partaterä ei näytä sellaiselta kuin arkijärjellä ajattelisi. Terän pinnassa on epätasaisuuksia, eikä se näytä terämäiseltä. Terät yleensä mielletään sileiksi reunoiksi, jotka yhdistyvät muodostaen matemaattisesti terävän kulman. Terä voi olla myös sahalaitainen tai aaltoileva, mutta yleensä se on säännöllisen muotoinen.

Tutkielmassa tarvitaan valomikroskooppia yksityiskohtaisempi tutkimusmenetelmä, sillä tylsyminen ei näy valomikroskoopilla ennen kuin terä on käyttökelvoton. Tylsymisellä tarkoitetaan terän muodon muuttumista käytön vaikutuksesta tarkoituksettomasti. Tätä muutosta voidaan havainnoida pyyhkäisyelektronimikroskoopilla eli SEMillä (Scanning Electron Microscope). Menetelmä sopii hyvin terän tutkimiseen erotuskykynsä sekä mittaustuloksena saatavien topografia- ja alkuainekontrastikuvien vuoksi. Metallinen terä on myös suhteellisen yksinkertainen kuvannettava johtavuutensa vuoksi. Tutkielmassa eritellään SEMin toiminta ja rakenne.

Tutkielmassa tutkitaan kaikkiaan neljää eri partaterää, joista yksi on käyttämätön verrokki. Kolme muuta terää tylsytetään noin kymmenen käyttökerran verran ja säilytetään eri olosuhteissa. Näin saadaan vertailtua monimutkaista tylsymistä myös säilytyksen näkökulmasta. Tylsymistä tutkitaan vertaamalla käyttämätöntä

terää käytettyihin etsimällä sekä kategorisoimalla eroja. Tutkielman tarkoituksena on selvittää yksinkertaisen objektin, partaterän, tylsistymistä pyyhkäisyelektronimikroskoopilla.

## 2 Parranajovälineistä

Partaa on aina ajettu ja siistitty erilaisin metodein. Aivan 1800-luvun viimeisinä vuosina alkoi nykymuotoinen, kotona tehtävä ajo partahöylällä. Ennen 1920-lukua, valmistaja The Gillette Companyn alkuperäisten patenttien aikana, valmistettiin yksiteräisiä partahöyliä, joiden terää vain vaihdettiin. [5] Vuonna 1971 The Gillette Company julkaisi ensimmäisen kahden terän partahöylän. Kolmiteräinen partahöylä tuli markkoille 1998 The Gillette Companyn toimesta. [6] Loppu on historiaa. Kuitenkin viime vuosina erityisesti yksiteräiset partahöylät ovat olleet esillä. Niissä on hyviä puolia verrattuna moniteräisiin partahöyliin. Useimmat yksiteräiset partahöylät ovat pitkäikäisiä ja vain itse terä tulee vaihtaa. Terä on valmistettu pelkästään metallista, joten sen pystyy kierrättämään, ja valmistus on halpaa. Kuvassa 2 on esimerkki metallivartisesta yksiteräisestä partahöylästä. Nykyisessä maailmantilanteessa, jossa ilmastonmuutos on vahvasti esillä, kertakäyttökulutuksen vastustus on kuuluvaa ja arkeen haetaan erityisyyttä, on yksiteräinen partahöylä oiva vaihtoehto.



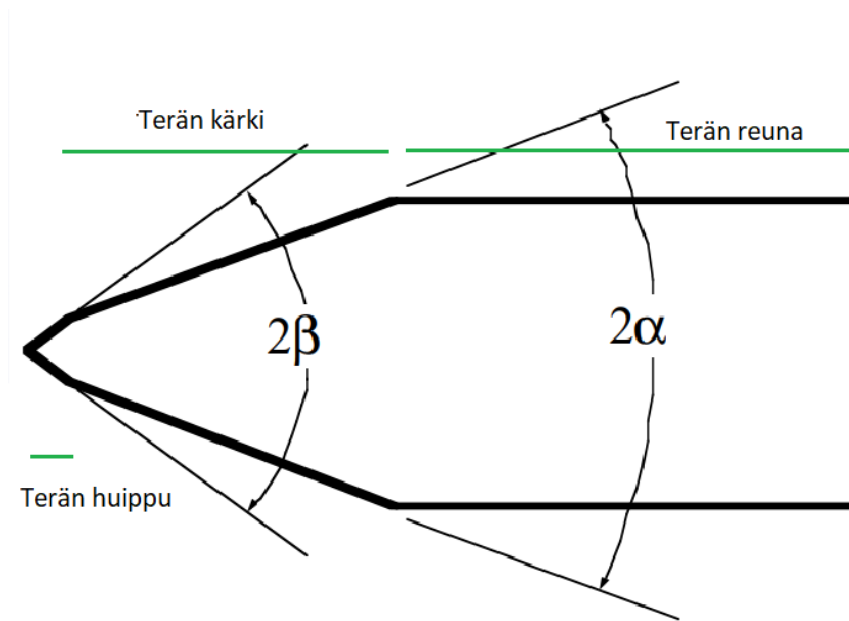


Kuva 2. Klassinen yksiteräinen partahöylä on säilyttänyt tunnistettavan muotonsa läpi historian.

Nykyään parranajovälineitä on monenlaisia: yksiteräisiä, moniteräisiä, sähköisiä partakoneita sekä partaveitsiä. Suosituin väline näistä on moderni moniteräinen partahöylä, josta vaihdetaan terän pidinpää terävämpää ajoa tarvittaessa. Näiden partahöylien varsiosat soveltuvat käytettäväksi useita kertoja. Moderni moniteräinen partahöylä on näkyvästi markkinoitu ja niitä näkee eniten kaupoissa myynnissä.

## 2.1 Partaterä

Partaterää käytetään parran tai muun karvoituksen pois ajamiseen partahöylällä. Partahöylää käytetään teränpitimenä, jotta ajo tapahtuu turvallisesti ilman haavoja. Partaa ajettaessa höylällä tulee ihon olla kostea tai muuten suojattu, ettei iho ärsyynny. Ajamisessa käytetään yleensä apuna partavaahtoa ja ajon jälkeen voidaan ihoa hoitaa kosteuttamalla. Kuvassa 3 on esitetty partaterän perusmuoto, johon on nimetty terän eri alueet.



Kuva 3. Terän muodon havainnekuvassa nähdään miten terä teroitetaan ensin suuremmalla kulmalla  $\alpha$  ja aivan terän pää kulmalla  $\beta$ . Suurin osa teristä teroitetaan tällä tavalla. Kuvassa on eroteltu myös terän eri alueet. Puhuttaessa terästä tarkoitetaan useimmiten terän huippua. [1]

Partaterä kuuluu käytössä tai huonossa säilytyksessä. Tylsymisestä ei ole paljoakaan tutkimustietoa, mihin yhtenä syynä voi olla tylsymisen riippuvuus monesta eri tekijästä. Partaterän tylsymisestä on kuitenkin muutama laadukas video, jotka julkaistiin elokuussa 2020 Science-lehden artikkelin yhteydessä. Näissä viidessä videossa kuvataan erityisen hienosti karvan leikkaushetkeä [7].

Tässä tutkimuksessa partaterinä käytetään Astra Superior Platinum partateriä. Terät on valmistettu Pietarissa Venäjällä, niiden valmistuksen siirryttyä sinne Tšekeistä. Terät on valmistanut Astra, joka on osa Gillette-brändiä, jonka omistaa Procter & Gamble [6]. Niiden luvataan kestävän neljä ajoa ilman, että ne alkavat raapimaan ihoa. [8]

## 2.2 Partaterän valmistus

Partaterät valmistetaan ruostumattomasta teräksestä. Niissä on usein rautaa, kromia, molybdeeniä, hiiltä, piitä ja mangaania. Alkuaineet ja niiden suhteet kuitenkin vaihtelevat. Taulukossa 1 on esitetty kahden eri terän alkuainepitoisuudet. [9]

Taulukko 1. Partaterien materiaalina on ruostumaton teräs, joka koostuu eri alkuaineista vaihtelevin suhtein. Taulukossa on eräässä patenttihakemuksessa [9] esitetyt pitoisuudet alkuainekohtaisesti kahdelle terälle.

Alkuaine	Koostumus [m-%]	Koostumus [m-%]
Hiili (C)	0.45-0.55	0.45-0.55
Kromi (Cr)	12-14	13.62
Molybdeeni (Mo)	1.0-1.6	1.6-5.0
Pii (Si)	0.50	0.4-1.0
Mangaani (Mn)	0.89	0.5-1.0
Rauta (Fe)	Loput	Loput

Terän valmistus voi alkaa, kun ohut ruostumattomasta teräksestä tehty pitkä liuska menee läpi koneen, joka leikkaa terän muodot ja kiinnitysreiät toistuvasti nauhaan. Jokainen terä on kuitenkin edelleen kiinni kahdessa muussa terässä. Tässä vaiheessa ruostumaton teräs on vielä pehmeää ja käsittelemätöntä. Terän kovettamiseksi se lämpökäsitellään eli karkaistaan eri vaiheihin. Kuumennukset ja jäähtytykset sekä niiden kesto vaikuttavat suuresti terän ominaisuuksiin. Lopulta teräs on kovaa, mutta haurasta. Lopuksi terään printataan mahdollinen valmistajan nimi ja muste kuivataan. Liuskan reunat teroitetaan, kiillotetaan ja erotetaan toisistaan. Terät tarkastetaan tämän vaiheen jälkeen. Epäpuhtauksien poistamiseksi terät pestään ja ne kuivataan. Tämän jälkeen ne päällystetään suojaavalla pinnoitteella tyhjiökammiossa. Ensimmäisen pinnoittamisen jälkeen lisätään toinen, joka auttaa terää liukumaan ihon pinnalla paremmin. Sitten pinnoite kiinnitetään lämmön avulla. Terien lujuus tarkastetaan märkään paperiin leikkaamalla. Korroosion estämiseksi-

si terät suojataan vielä orgaanisella öljyllä. Lopuksi terät pakataan korroosiolta ja kuljetukselta suojaavaan vahapaperiin. [10]

### 3 Elektronisuihkun ja näytteen välinen vuorovaikutus

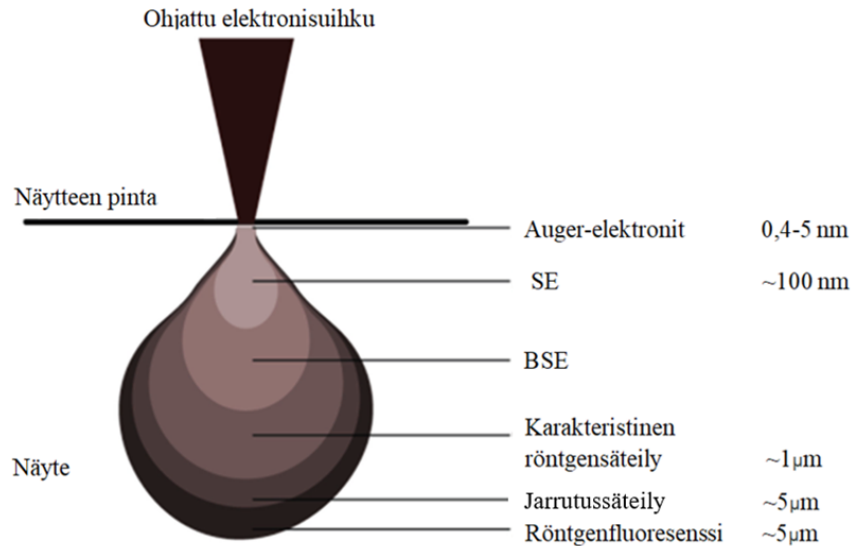
Pyyhkäisyelektronimikroskooppia kutsutaan lyhenteellä SEM, joka tulee englannin kielen sanoista Scanning Electron Microscope. SEM on mikroskooppi, jolla tutkitaan aineen pintarakennetta ja sen koostumusta. Elektronimikroskopiassa näytteeseen ohjataan elektronisuihku, jolloin menetelmän erotuskyky paranee huomattavasti verrattuna valomikroskopiaan. Elektronisuihkun ja näytteen välisen vuorovaikutuksen seurauksena havaittavat elektronit muodostavat mittaustuloksena saatavan kuvan. [11]

Virran vaikutuksesta filamentista irtoaa primaarielektroneja (PE), jotka ohjataan näytteeseen sähkömagneettisin linsein. Tyhjiön läpi kuljettuaan primaarielektronit osuvat näytteeseen, joka koostuu atomeista, joissa on positiivisia, elektroniin nähden suurimassaisia protoneja, sekä negatiivisesti varautuneita elektroneja. SEMillä tutkittaessa hyödynnetään kolmea eri vuorovaikutusefektiä elektronin vuorovaikutuksessa näytteen kanssa:

1. syntyy SE eli sekundaarinen elektroni (Secondary Electron)
2. havaitaan BSE eli takaisin sironnut elektroni (Back Scattered Electron)
3. Virittyneen atomin viritystilan purkautuessa syntyy karakteristista röntgensäteilyä. [12]

Listatut vuorovaikutusefektit kertovat näytteen karkeasta ja hienojakoisesta pintarakenteesta, koostumuksesta sekä kiderakenteesta. Muita vuorovaikutusefektejä, joita tässä työssä ei käsitellä syvällisemmin, ovat esimerkiksi Auger-elektronit ja ei-karakterinen röntgensäteily. [11]

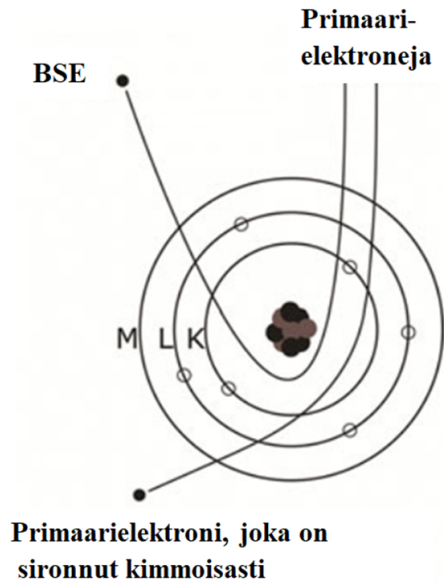
Kuvassa 4 on esitetty primaarielektronisuihkun osuminen näytteeseen. Siihen on myös merkitty miltä syvyyksiltä eri signaalit tulevat. Pisaran mallinen vuorovai-  
kutustilavuus muuttuu materiaalin ja primaarielektronisuihkun energian mukaan.  
[11]



Kuva 4. Pisaran mallinen vuorovaikutustilavuus, joka näyttää miltä alueelta näytteestä saadaan elektronisuihkulla signaali. Kuvassa on pääpiirteisesti esitetty miltä syvyydeltä mikäkin signaali muodostuu. [11]

Takaisinsironneet elektronit (BSE) ovat näytepinnan kanssa kimmoisasti törmänneitä primaarielektroneja. BSE syntyy, kun primaarielektroni vuorovaikuttaa näytteen atomin ytimen kanssa siten, että se muuttaa suuresti kulkusuuntaansa ytimen positiivisen varauksen ja merkittävästi elektronin massaa suuremman massan vuoksi. Elektroni voi muuttaa suuntaansa myös monen pienikulmaisen suunnan muutoksen ansiosta. Kun elektronin sirontasuunta on kohti näytteen pintaa, ja se päättyy energiaansa menettämättä ulos näytteestä sekä ilmaisimelle, havaitaan BSE-signaali. Havaintokuva BSE:n synnystä on kuvassa 5. Suuri osa ilmaisimille saapuvasta elektronisignaalista on BSE:tä ja sen energia on keV-luokkaa. Elektronien liike-energia on ainut keino erottaa eri signaalit toisistaan, koska elektronit

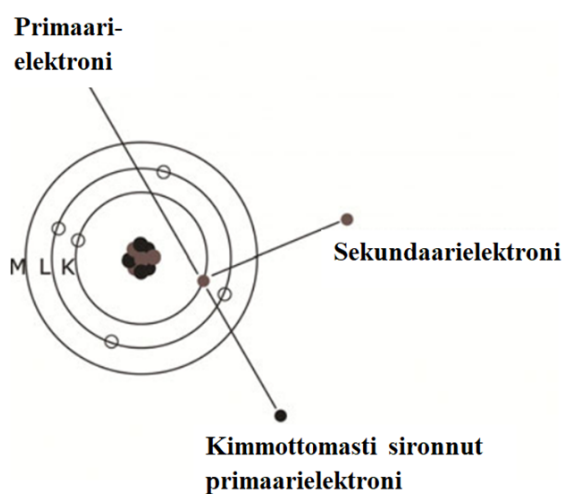
itsessään ovat aina identtisiä. Ilmaisimille päätyvien takaisinsironneiden elektronien määrä riippuu näytteen koostumuksesta ja atomien massasta eli siten järjestysluvusta. Tämä nähdään kuvantaessa kirkkauseroina, jota voidaan kutsua alkuaine- tai järjestysluku-kontrastiksi. [11, 12]



Kuva 5. Primaarielektronin kimmoisa sironna atomista. Elektroni ei menetä energiaansa havaittavasti, mutta sen suunta muuttuu. Kun suunnan muutos tapahtuu kohti näytteen pintaa ja elektroni päätyy ulos näytteestä kutsutaan primaarielektronia BSE:ksi, joka ei päädy ulos näytteestä. [11]

Sekundaarielektroni (SE) on elektroni, joka irtoaa näytteeseen primaarielektronin vaikutuksesta. Mikäli primaarielektroni luovuttaa näyteatomien elektronille suuremman määrän energiaa kuin millä elektroni on sitoutunut atomiin, tapahtuu emisio ja emittoitunutta elektronia kutsutaan SE:ksi. Atomin ulkokehän elektronit ovat heikommin sitoutuneina ytimeen, joten yleensä SE on näytteen atomin valenssielektroni ja alle 50 eV liike-energialtaan. Yleensä sekundaarielektroneita havaitaan sitä enemmän mitä suurempi energia primaarielektroneilla on, koska tällöin SE saa suuremman kineettisen energian ja pääsee todennäköisemmin ulos näytteestä. Primaarielektronin energia ei saa kuitenkaan olla liian suuri, jottei se pääse liian syvälle

näytteeseen, josta emittoituva SE ei pääse ulos. Primaarielektronin liikerata muuttuu yksittäisen kimmottoman törmäyksen johdosta ja se jatkaa liikettään hidastuneena. Mitä suurempi energia primaarielektronilla on alunperin sitä suuremman matkan se kulkee ja sitä enemmän se törmäilee. Lopulta elektroni jää näytteeseen ja metalleissa muuttuu johde-elektroniksi. Kuvassa 6 on havainnollistettu SE:n syntyä. Sekundaarielektronien aiheuttamaa kontrastia SEM-kuvassa sanotaan topografiseksi kontrastiksi. [12]

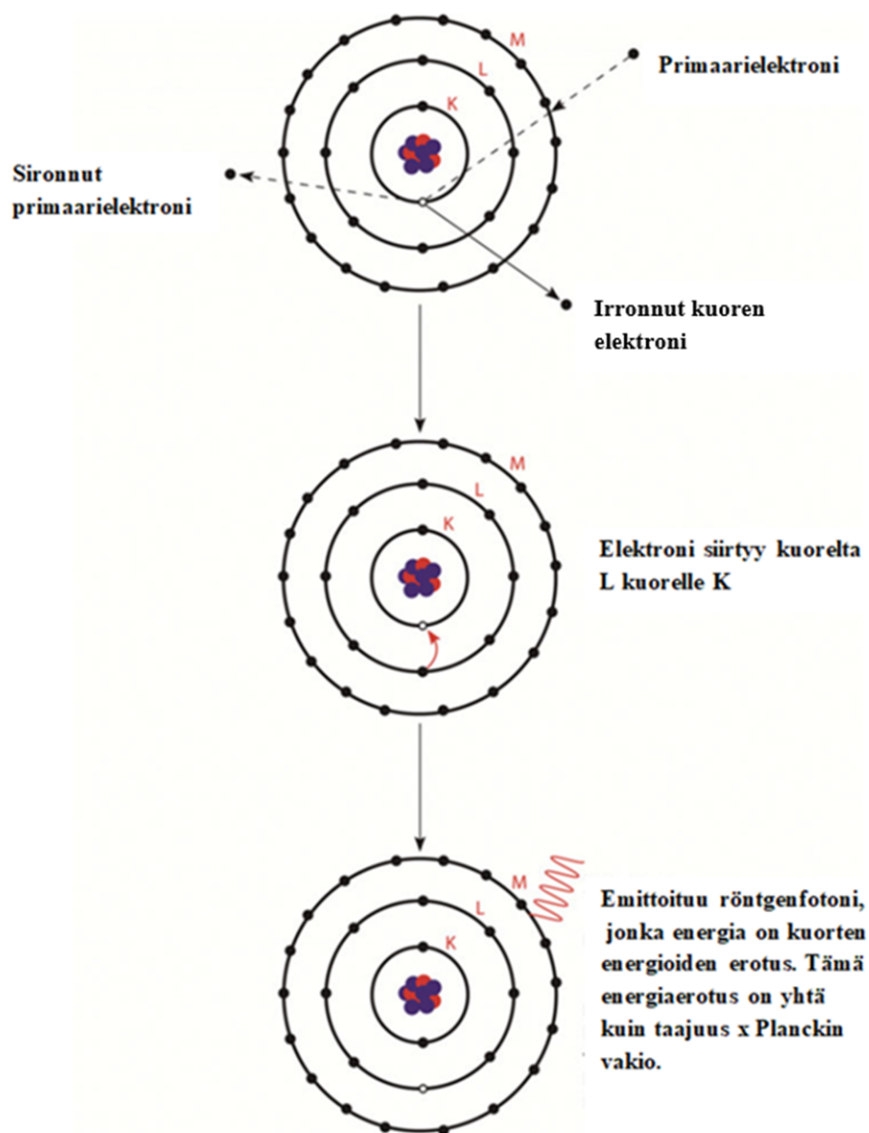


Kuva 6. Primaarielektroni törmää kimmottomasti näyteatomin elektroniin. Törmäyksessä alunperin sidottu elektroni saa liike-energiaa ja poistuu kuoreltaan. Tämä SE havaitaan, mikäli se poistuu kohti näytteen pintaa. [11]

Röntgensäteet syntyvät, kun primaarielektroni luovuttaa törmäyksessä sisäkuoren elektronille tämän ionisaatioenergiaa suuremman energian ja se emittoituu. Energia-aukko täyttyy ulkokuoren elektronilla välittömästi. Kuitenkin elektronin siirtyessä ulkokuorelta sisäkuorelle atomi pyrkii perustilaan, joten vapautuu röntgenfotoni, jonka energia on kuorien välisen energia-eron suuruinen. Kuvassa 7 havainnollistetaan röntgenfotonin syntyminen. Tämä viritystila voi purkautua myös Auger-emission kautta, mutta tällöin ei havaita röntgensäteilyä. SEM-laitteistoissa käytettävillä kiihdytysjännitteillä havaittavien röntgenkvanttien energia yleensä muuta-

masta keV:sta muutamaan kymmeneen keV:iin. Suurista atomeista syntyy enemmän röntgenfotoneja, sillä elektronikuoria on enemmän. Edellä kuvatulla tavalla syntyvää röntgensäteilyä kutsutaan karakteristiseksi röntgensäteilyksi, sillä joka alkuaineen elektronikuorien välisiä energiaeroja vastaa eri energialla havaittava spektriviiva. Eri alkuaineista emittoituvat karakteristisen röntgensäteilyn energiat tunnetaan hyvin, ja niiden avulla voidaan tunnistaa näytteen sisältämät alkuaineet muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Tämä on SEMin avustuksella tehtävän EDX-analyysin (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) perusta. EDX-analyysi kertoo yhdessä SEMin kanssa yksityiskohtaisesti pinnanrakenteesta sekä alkuainekoostumuksesta ja alkuainejakaumasta. Tutkittaessa röntgenspektriä nähdään jatkuva kuvaaja. Jatkuvan spektrin muodostavat tausta sekä karakteristiset röntgenemissioviivat. Viivat erottuvat taustasta, jos röntgenkvantteja havaitaan enemmän kuin taustasäteilyä kyseisellä energialla. Spektrin taustan muodostaa jarrutussäteily (bremsstrahlung), jonka aiheuttavat pääasiassa primaarielektronit, jotka ovat menettäneet energiaa useissa törmäyksissä näyttemateriaalissa tai mittauskammion seinämissä. Tausta ei ole karakteristinen alkuaineille tai mittaukselle. [11]



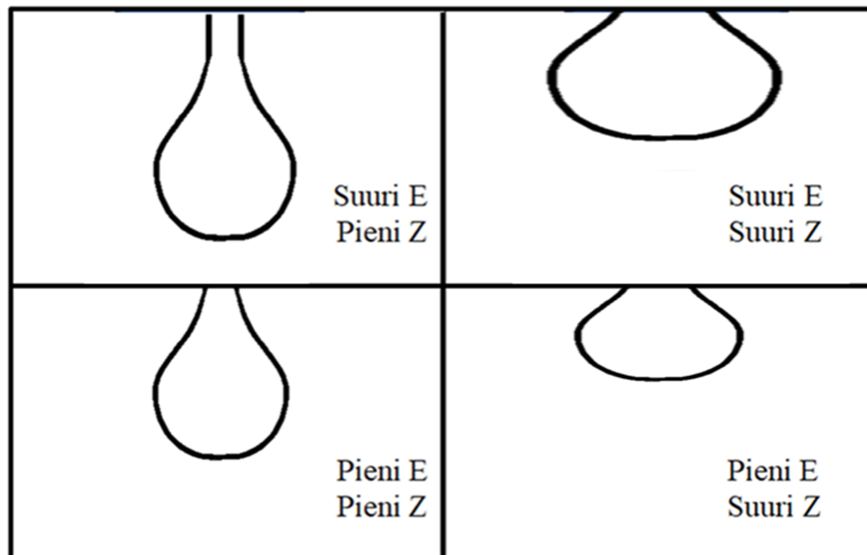


Kuva 7. Sidottu elektroni irtoaa K-kuoreltaan primaarielektronin sirotessa. Tämän energia-aukon tulee paikkaamaan ylemmän kuoren elektroni. Tuon elektronin energia pienenee ja emittoituu röntgenfotoni, jonka energia ( $h\nu$ ) on elektronin tilojen energioiden erotus. [11]

### 3.1 Elektronien liike ja vuorovaikutustilavuus

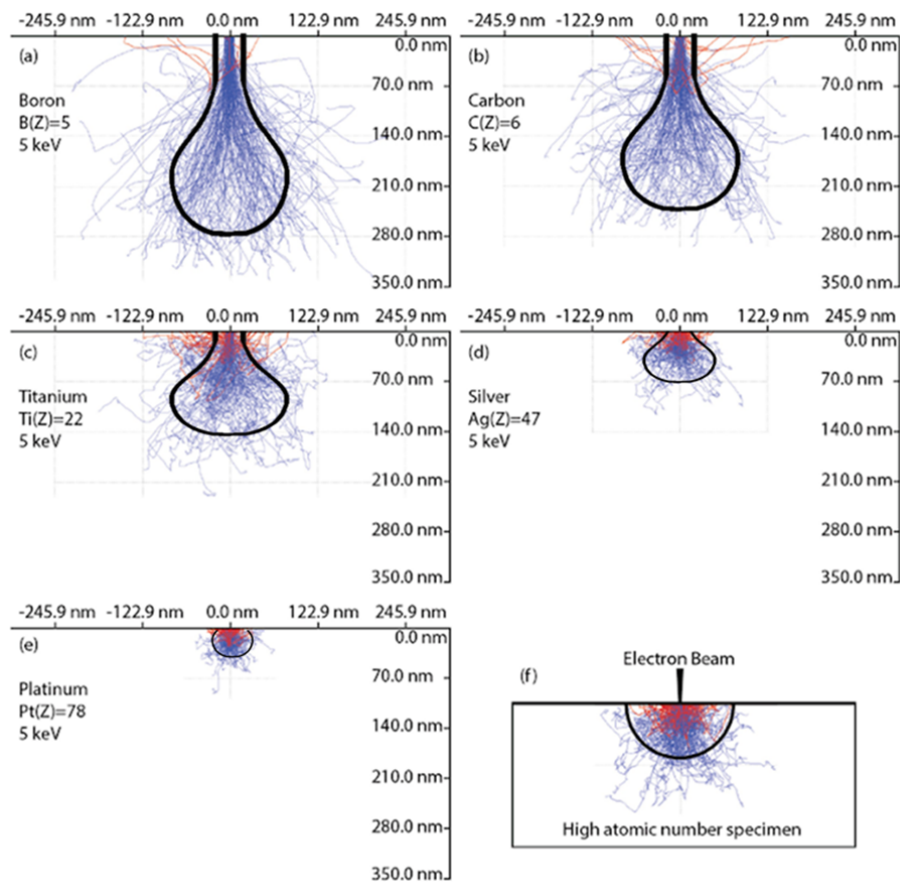
Elektronit liikkuvat näytteessä törmäillen, eikä törmäysten väli ei ole pitkä. Elektronin törmäysten välillä kulkemaa matkaa kutsutaan elektronin keskimääräiseksi vapaaksi matkaksi (Inelastic Mean Free Path eli IMFP). Mitä isompi elektronin

energia on, sitä pidempi on sen vapaa matka. Tiedetään myös, että mitä raskaampia atomin ytimiä näytteessä on, sitä todennäköisempää on kimmoisa törmäys elektronin ja ytimen välillä. Tällaisessa törmäyksessä myös elektronin siroamiskulma on suurempi. Koko aluetta, johon primaarielektronit vaikuttavat näytteessä, kutsutaan vuorovaikutustilavuudeksi. Tämän pisaran muotoisen alueen ulkopuolelta ei SEM kerää tietoa, ja myös tarkentaminen vaikeutuu huomattavasti elektronien siroannan kasvattaman alueen vuoksi. Kuvassa 8 tämä vuorovaikutustilavuus on esitetty primaarielektronin liike-energian ( $E$ ) ja näyteatomien järjestysluvun ( $Z$ ) mukaan. Energia vaikuttaa enemmän syvyyteen, jolta sekundaarielektronit voivat emittoitua tai takaisinsironneet elektronit kulkeutua takaisin tyhjiöön. Järjestysluku vaikuttaa vuorovaikutustilavuuden muotoon. Vuorovaikutustilavuus on suurimmillaan, kun primaarielektronisuihku tulee kohtisuoraan näytteeseen. Mitä suurempi poikkeuma kohtisuorasta kulmasta olisi, sitä enemmän elektroneja pääsisi pois pinnasta ja vuorovaikutustilavuus jäisi epäsymmetriseksi. [11]



Kuva 8. Järjestysluku  $Z$  ja primaarielektronin energia  $E$  vaikuttavat suuresti vuorovaikutustilavuuteen.  $E$  vaikuttaa pisaran syvyyteen ja  $Z$  pisaran leventymiseen. [12]

Vuorovaikutustilavuuden muotoa voidaan tutkia Monte Carlo -tietokonesimulaatiolla. Esimerkiksi CASINO (monte CARlo SIMulation of electroN trajectory in sOlids)-mallissa simulaatio toimii mallintamalla törmäyksiä tilastollisesti ja piirtää elektronien liikeradat näkyviin. Malli ottaa huomioon kimmoisen ja kimmotoman sironnan ja siten mallintaa muutoskulmat liikeradoissa ja energiahäviöt. Simulaatiolla saatuja vuorovaikutustilavuuksia eri materiaaleissa on esitetty kuvassa 9. Mallinnuksessa punaiset viivat edustavat BSE:ja ja siniset viivat absorboituneita elektroneja, jotka menettävät kaiken energiansa ja jäävät näytteeseen. Monte Carlo -menetelmällä voidaan tutkia vuorovaikutustilavuuden muotoa eri materiaaleissa ja eri elektronisuihkun energian arvoilla. [13] [14]

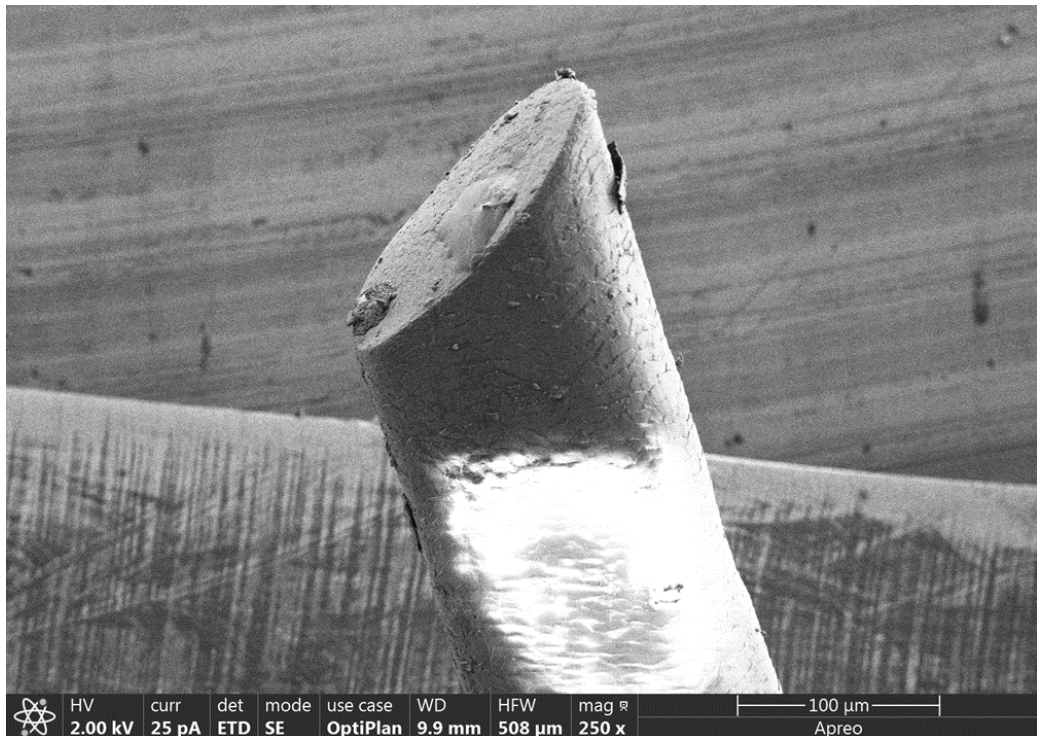


Kuva 9. Monte Carlo -simulaatiolla tuotettuja kuvia takaisinsironneiden elektronien liikeradoista eri alkuainenyhteissä. Punaiset viivat edustavat BSE:ja ja siniset viivat absorboituneita elektroneja, jotka menettävät kaiken energiansa ja jäävät näytteeseen. Kuvista nähdään miten vuorovaikutustilavuus muuttuu järjestysluvun mukaan. [12]

### 3.2 Näytteen varautuminen

Näyte voi varautua elektronipommituksen johdosta. Ihannetilanteessa näytteestä poistuu näytevirtana pitimeen yhtä paljon elektroneja, kuin siihen jää mittauksessa käytetyn elektronisuihkun ja näytteen vuorovaikutusten seurauksena. Mittauskohdan negatiivinen varautuminen näkyy SEM-kuvissa kirkkaina tai valkoisina kohtina. Positiivinen pintavaraus näkyisi kuvissa tummana alueena. Varautuminen näkyy kuvissa, koska pintaan kerääntyvä varaus estää elektronien poistumisen näytteestä ja heijastaa elektronisuihkun elektroneja ilmaisimelle. Everhart-Thornley -ilmais-

on erityisen herkkä varautuneiden näytteiden suhteen. Varautumista voidaan estää pinnoittamalla näyte hiilellä, kullalla tai jollakin muulla hyvin johtavalla metallilla sekä maadoittamalla näyte näytteenpitimeen esimerkiksi kupariteipillä. [15, s. 326] Varautumista voidaan estää myös nostamalla kammion painetta vesihöyryllä, jolloin eristävän näytteen pintaan muuten kerääntyvä varaus pääsee purkautumaan vesihöyryn kautta näytekammioon [16, s. 230]. Kuvassa 10 näkyy, kuinka varaus on keskittynyt pinnoittamattomassa näytteessä alueelle, jonka avulla kuva tarkennettiin ja joka siksi altistui elektronisuihkulle pidemmän aikaa. Altistusaika, jonka aikana elektroneilla pommitetaan näytettä vaikuttaa varautumiseen. Näyte varautuu sitä todennäköisemmin, mitä kauemmin sitä pommitetaan elektroneilla. Varautumisen voimakkuuteen vaikuttaa lisäksi elektronien määrä sekä käytetty jännite eli primaarielektronien liike-energia. Orgaaniset näytteet, kuten partakarva, varautuvat helpommin, kuin esimerkiksi metallit, jotka on helppo maadoittaa. [12, s.134]



Kuva 10. Kuvassa näkyy keskellä partakarva ja sen takana alhaalla kuvassa partaterä. Kuvasta huomataan näytteen varautuminen valkeana alueena, jossa kuva tarkennettiin. Tarkennus piti tehdä lähellä karvan leikkauspintaa, jotta se saatiin näkymään selkeästi. Tämä valitettavasti tuhosi näytettä tarkennuskohdasta.

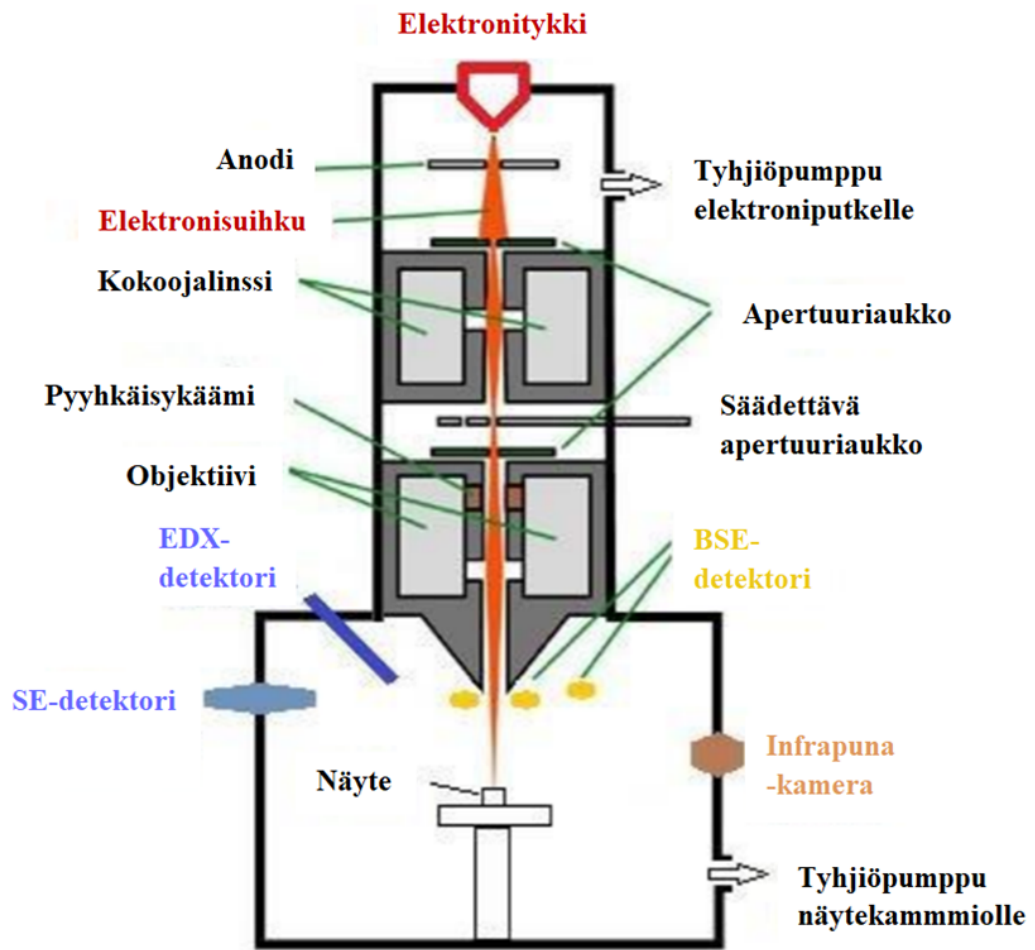
## 4 Pyyhkäiselektronimikroskoopin rakenne

Tässä tutkimuksessa käytettiin Thermo Fisher Scientificin Apreo S pyyhkäiselektronimikroskooppia, joka on esitetty kuvassa 11. Sen erityispiirteitä ovat muun muassa elektronipylväässä olevat niin kutsutut in-lens tai in-column -ilmaisimet (Trinity-ilmaisimet käytetyssä Apreo S -laitteistossa), yhdistelmälinssi sekä mahdollisuus suorittaa mittauksia 500 Pa paineessa. [17] Apreo S on monipuolinen SEM, jossa on kirkas elektronilähde. Se tuottaa vakaan elektronisuihkun, joka helpottaa mittauksia ja parantaa kuvan laatua. Kuvassa 12 on esitetty läpileikkaus SEMistä. Kuvasta poiketen Apreo S -laitteistossa on kolme in lens -ilmaisinta, jotka toimivat myös BSE-ilmaisimena. Elektronipylvään ulkopuolella Apreossa on EDX-analysaattori, siirret-

tävä BSE-ilmaisain ja Everhart Thornley -ilmaisain samassa kulmassa näytteeseen nähden kuin EDS-ilmaisain.



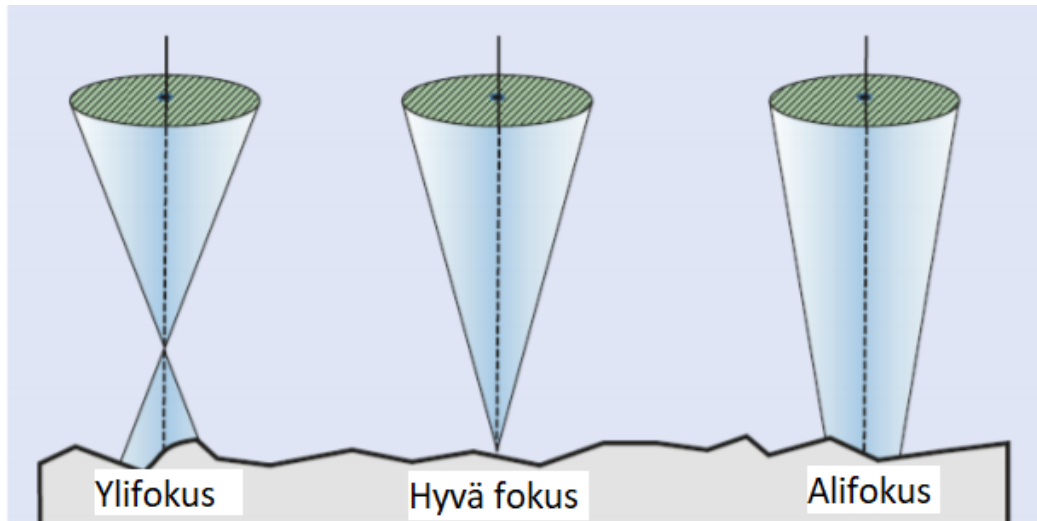
Kuva 11. Turun yliopiston SEM/EDX-laitteisto (Thermo Fisher Scientific Apreo S/Oxford Ultim Max) .



Kuva 12. Pyyhkäiselektronimikroskoopin kaaviokuva. Kuvan yläosa koostuu elektronipylvästä ja alaosasta näytekammioista. [18]

Elektronimikroskoopin tärkeimpiä osia ovat elektronipylväs, joka tuottaa ja ohjaa elektroneja, näytekammio, ilmaisimet ja tietokone, jolla ohjataan systeemiä ja analysoidaan tulokset. Erotuskykyyn eli resoluutioon vaikuttaa käytetty filamentti, kiihdytysjännite, elektronisuihkun hajaantumisen laajuus näytteen pinnalla, työskentelyetäisyys sekä käytetyt ilmaisimet. [16, s.256] Työskentelyetäisyyden vaikutusta elektronisuihkun kohdennukseen on havainnollistettu kuvassa 13.





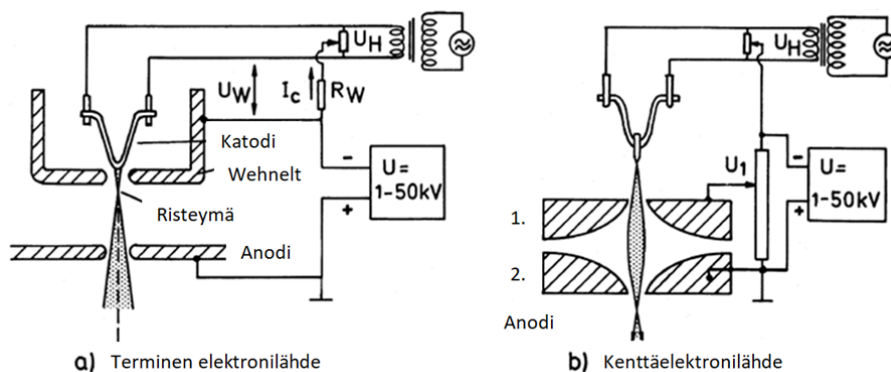
Kuva 13. Elektronisuihkun kohdennus riippuu paljon työskentelyetäisyydestä. Kuvasta nähdään selkeästi miten elektronisuihkun halkaisijan koko muuttuu erilaisessa fokuksessa. Pienimmillään halkaisija on hyvässä fokuksessa. [12, s.72]

#### 4.1 Elektronitykki

Elektronitykillä voidaan luoda säädellysti eri määrä eri energisiä elektroneja. Elektronitykki vaatii vähintään  $10^{-4}$  Pa tyhjiön, jotta elektronit eivät siroaisi ympäröivän kaasun molekyylien vuoksi ja kulkisivat mahdollisimman hallitusti. [11, 12] Elektronitykissä elektronilähteen muodostavat katodi eli filamentti, Wehnelt-sylinteri ja anodi. Filamentin muodolla on erityisen suuri merkitys. Siinä tulee olla terävä kärki, sillä sen terävimmästä kohdasta purkautuu vakaasti eniten elektroneja kärjen osoittamaan suuntaan. Filamentista emittoituvien elektronien määrä on sitä suurempi, mitä suurempaa hehkuvirtaa käytetään elektronien irrottamiseen. Hehkuvirta on virta, joka lämmittää katodia eli filamenttia. Jokaisella filamentilla on myös kuitenkin oma saturaatiovirta, jonka ylittäminen vaurioittaa elektronilähdettä. [11, 12] Yleisesti käytössä on kahden tyyppisiä elektronitykkeitä: termisiä elektronilähteitä ja kenttäemissiolähteitä käyttäviä. Termisissä elektronilähteissä elektronit irrotetaan kuumentamalla filamenttia. Kenttäemissioähteissä elektronit taas irrotetaan korkean jännitteen avulla. [11] Seuraavaksi käsitellään nämä eri elektronilähteet.

#### 4.1.1 Terminen elektronilähde

Termiset lähteet koostuvat negatiivisesti varatusta katodista, Wehnelt-sylinteristä ja maadoitetusta anodista. Kuvassa 14 on esitetty termisen elektronilähteen ja kenttäemissiolähteen rakenne. Elektronit emittoituvat katodista ja fokusoituvat Wehnelt-sylinterin aukosta, koska elektronit hylkivät negatiivisesti varatun aukon reunoja. Katodin ja anodin välissä elektroneja kiihdytetään 0,1-50 kV jännitteellä. [15, 16] Tämä on mahdollista katodin kärjen pienen koon vuoksi, mikä keskittää suuren sähkökentän hyvin pienelle alueelle. [11] Ensimmäinen anodi on 3-5 kV:n potentiaalissa verrattuna katodiin, jotta se irrottaa elektroneja, muttei kuumenna kärkeä. Toinen anodi taas kiihdyttää elektroneja halutusti elektronipylvääseen ja kohti näytettä. [12] Termisistä elektronilähteistä yleisimmin käytössä on edullinen ja luotettava volframifilamentti. Siitä parempi termisen elektronilähde on  $LaB_6$  eli lantaaniheksaboridi. Tämä kalliimpi, mutta myös kirkkaampi ja pitkäikäisempi, keraaminen kide toimii 1200-1600 °C lämpötilassa, joka on alempi kuin volframilähteen toimintalämpötila. [11]



Kuva 14. Elektronilähteet on jaettu kahdenlaisiin. a) Tyypillinen termisen elektronilähde, jossa on katodi, Wehnelt-sylinteri ja anodi. b) Kenttäemissiolähde, jossa on 1. ja 2. anodi. [15]

### 4.1.2 Kenttäemissiolähde

Kenttäemissiolähteet muodostavat tarkkaan kohdistetun elektronisuihkun, jolloin saavutetaan selvästi parempi erotuskyky kuin termisten elektronilähteiden kanssa. Kenttäemissiolähtellä voidaan saavuttaa nanometrierotuskyvyn kuvia. Tutkimuksessa käytetty SEM on kenttäemissiomikroskoopi. Kohdentunut elektronisuihku ei vaadi niin monia ohjaavia linsejä, kuin termistä filamenttia käyttävä mikroskoopi, koska kenttäemissiolähde kohdistaa elektronisuihkun paljon pienemmälle alalle. Verrattuna termisiin elektronilähteisiin nämä kestävät myös kolme kertaa pidempään eli ovat pitkäikäisempiä. Esimerkiksi kenttäemissiolähteet kestävät 3000 tuntia verrattuna termisen elektronilähteen  $LaB_6$ :n 1000 tuntiin. Eri elektronilähteitä on vertailtu taulukossa 2. [15]

Kenttäemissiolähteitä on kahta tyyppiä: kylmä- ja Schottky. Kylmäkenttäemittori toimii ilman lämmitystä ja elektronit irtoavat sähkökentän avulla. Se on tyypillisesti valmistettu volframista. Schottky-kenttäemissiolähde toimii sähkökentän sekä lämmityksen avulla. Se on valmistettu zirkoniumoksidista (ZrO) tai volframista. Kenttäemissiolähteelle on ominaista, että sitä pidetään aina päällä, eikä sitä näin ollen tarvitse puhdistaa nopealla kuumennuksella. Se sopii pitkäaikaiseen käyttöön, jossa säätämiseen ja huoltoon ei mene ylimääräistä aikaa. [11] Työssä käytetyssä SEMissä on pitkäikäinen kirkas Schottky kenttäemissiolähde. [19]

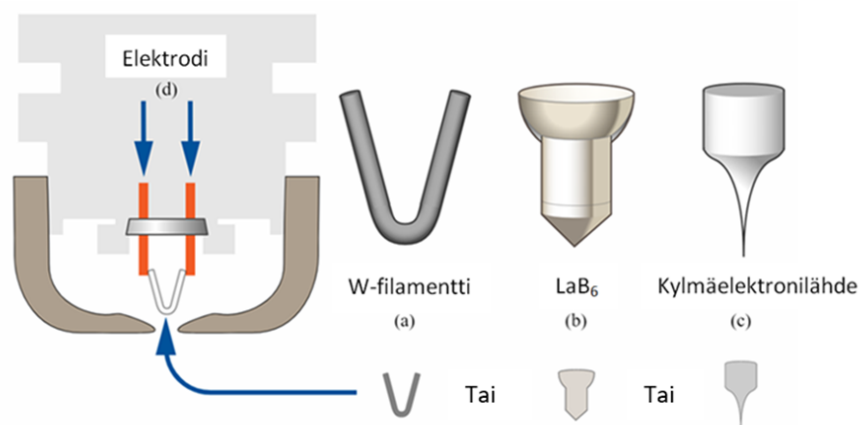
## 4.2 Filamenttien vertailu

Edellä esitellyistä elektronilähteistä on yhteenveto taulukossa 2 ja filamentit on esitetty kuvassa 15. Taulukosta huomataan erityisen selkeästi kenttäemissiolähteiden suurempi kirkkaus, pienempi elektronisuihkun hajonta ulostulossa, pienempi katodin säde ja pidempi käyttöikä verrattuna termisiin elektronilähteisiin. Vaikka kenttäemissiolähteet ovat monin tavoin parempia kuin termiset elektronilähteet, vaativat nämä paremman tyhjiön ja ovat huomattavasti kalliimpia kuin termiset elektroni-

Taulukko 2. Neljän eri elektronilähteen vertailu. [15, 16]

	Terminen W-katodi	Terminen LaB <sub>6</sub> -katodi	Kylmäkenttä- elektronilähde	Schottky- elektronilähde
Katodin materiaali	W	LaB <sub>6</sub>	W(310)	ZrO/W(100)
Katodin säde [nm]	60 000	10 000	< 1000	< 100
Emissiovirta [A]	200	80	5	200
Lämpötila [°C]	2800	1600	300	1800
Kirkkaus [A/(cm <sup>2</sup> sr)]	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>
Elektronisuihkun energian hajonta ulostulossa [eV]	1.5 - 2.5	1.3 - 2.5	0.35 - 0.7	0.3 - 0.7
Tyhjiö [Pa]	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-8</sup>
Käyttöikä [h]	100	1000	3000	3000

lähteet. Kenttäemissiolaitteiston filamentti on myös termisen elektronilähteen filamenttia herkempi vaurioitumaan tyhjiön jäännösaineiden ionien adsorptiosta. Ioneja syntyy paljon jos elektronisuihku on epävakaata tai emissiovirta osuu liian suuressa kulmassa ensimmäiseen anodiin. Ionit kuluttavat ja laajentavat kärjen pintaa, mikä taas johtaa elektronisuihkon laadun heikkenemiseen. [15]



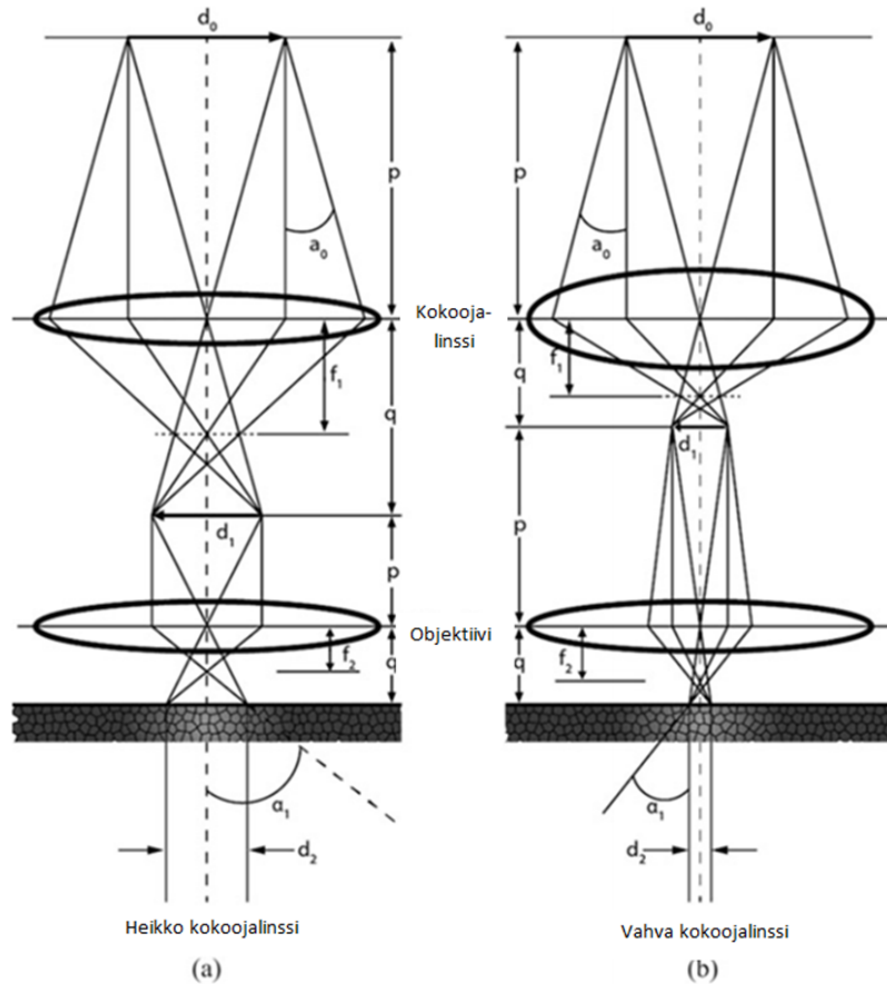
Kuva 15. Kolme erilaista filamenttia: a) volframilanka b) lantaaniheksaboridia ( $LaB_6$ ) ja c) yhtenäiskiteinen volframi, lähteen [20] pohjalta.

### 4.3 Elektro-optinen systeemi

Elektronilähteen elektronisuihkon halkaisija on iso, joten tarvitaan erilaisia elektro-optisia osia kohdistamaan elektroneja. Kohdistukseen käytetään linssejä, apertuuri-aukkoja, stigmaattoria ja pyyhkäisykäämejä. Nämä esitellään myöhemmin tässä luvussa. Esimerkiksi volframi-filamentti tuottaa halkaisijaltaan  $50 \mu\text{m}$  elektronisuihkun, joka täytyy tarkentaa  $0,5 \mu\text{m} - 10 \text{ nm}$  kokoluokkaan, jotta saavutetaan haluttu erotuskyky [11]. Yleensä linssejä tarvitaan useampi ja erilaisia. [16]

Apréo S:ssä viimeinen linssi on elektrostaattinen linssi, johon voidaan haluttaessa yhdistää magneettikenttä. Magneettikenttä fokusoii elektronit entistä paremmin, jolloin voidaan saavuttaa alle  $1 \text{ nm}$  erotuskyky. Tässä mittaustavassa työskentelyehtäisyyden pitää olla hyvin pieni ( $1-2 \text{ mm}$ ), eikä sitä voida käyttää magneettisille

näytteille. Edellä mainittu yhdistelmälinssi mahdollistaa korkearesoluutioisen mittauksen magneettikentän ja lyhyen työskentelyetäisyyden ansiosta. Tällöin resoluutioksi voidaan saada 1.0 nm 1 kV:lla. [19]

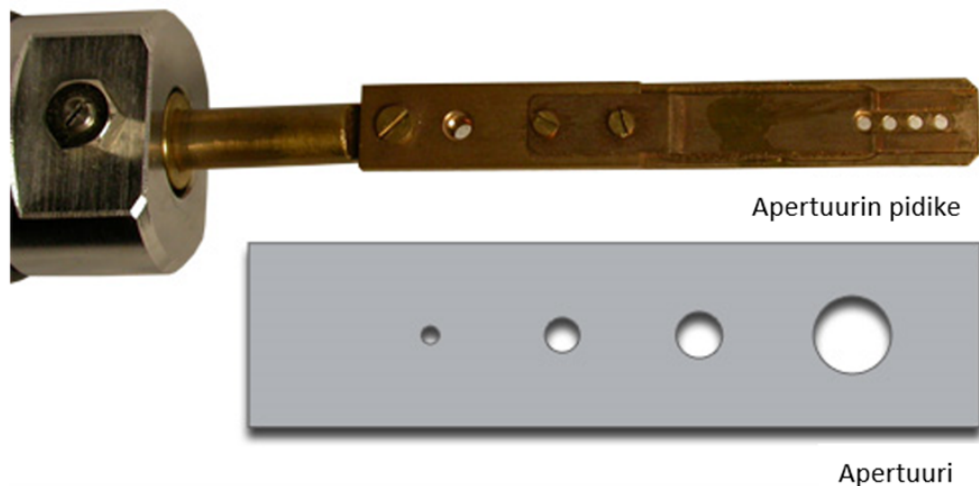


Kuva 16. Kuvassa on havainnollistettu eroja linssien taittovoimakkuuksissa. Kuvassa esitetään kokoojalinssi heikolla ja voimakkaalla taittovoimakkuudella eli lyhyellä ja pidemmällä polttovälillä. Kokoojalinssi kokoaa säteen ja kohdistaa sen polttopisteeseen, joka on  $f_1$ :n etäisyydellä linssistä. Kuvassa esiintyvät  $d$ :t ovat lähteen kuvia linssien jälkeen. [11, s.40]

#### 4.3.1 Apertuuri

Apertuuriaukko (aperture) on ohueen johdinlevyyn tehty aukko. Johdinlevy on yleensä molybdeenia tai platina-iridium -seosta. Apertuurilla poistetaan elektroni-

suihkusta liian suuressa kulma-aukeamassa tulevat elektronit ja aukon koolla säädel-  
lään läpipääsevien elektronien määrää. Pieni apertuuriaukko päästää lävitse vähem-  
män elektroneja kuin suurempi ja siten läpipääsevän elektronisuihkun virtakin on  
pienempi. Pienemmällä apertuurilla voidaan saavuttaa korkeampi paikkaresoluutio,  
mutta havaittavien elektronien ja röntgenkvanttien määrä pienenee ja kuva ei ole  
niin kirkas. EDX-analyysiin käytetään isompia apertuureja, jotta saadaan enemmän  
elektroneja. Aukkojen säteet vaihtelevat 10-500  $\mu\text{m}$  välillä. [11] Apertuurit on syytä  
pitää puhtaana, sillä epäpuhtaudet aiheuttavat elektronien hajaantumista, jota ei  
stigmaattorilla saada korjattua. [12]



Kuva 17. Erikokoisia apertuuriaukkoja johdinlevyissä. Ylempänä näkyy myös johdinlevynpidike. [21]

#### 4.3.2 Kokoojalinssi

Kokoojalinssiä (condenser lens) kutsutaan yleisesti myös kondensoriksi. Näitä on yleensä pyyhykäisyelektronimikroskoopissa ainakin yksi heti elektronitykin jälkeen. Kokoojalinssi on käämi, jonka taittovoimakkuutta säädelään käämissä kulkevan virran voimakkuuden avulla. Virta luo käämin sisään magneettikentän, joka ohjaa primaarielektroneja. Käyttämällä voimakasta taittoa kokoojalinssissä osa primaarie-

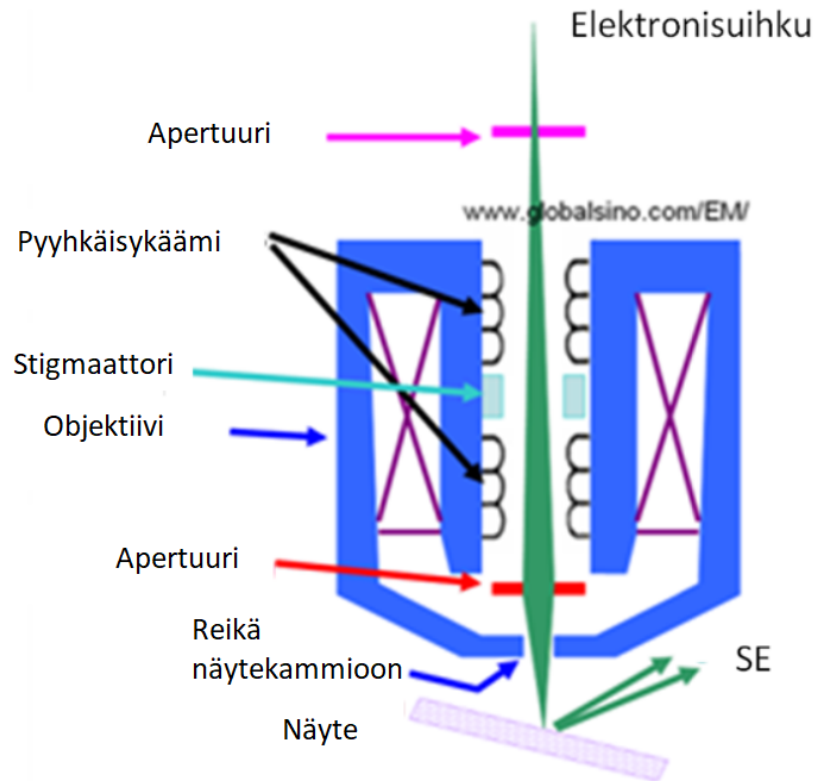
lektroneista jää sitä seuraavaan apertuuriin ja täten säädellään elektronisuihkun elektronien määrää eli suihkun virtaa. Linssin magneettikentän radiaalinen komponentti saa elektronit, jotka eivät ole optisella akselilla, kiertämään spiraalirataa. [11]

SEMin sähkömagneettiset linssit ovat ideaalitapauksessa täysin symmetrisiä. Oikeasti linseissä on aina virheitä, jotka aiheuttavat epäsymmetrisyyttä linssien kentissä ja vääristymää elektronisuihkussa. Tällaisia virheitä ovat esimerkiksi linssin kannattimen, käämien symmetrisyyden ja osien liikkeiden aiheuttamat virheet. [12]

### 4.3.3 Objektiivi

Objektiivit säätelevät elektronisuihkua viimeisenä ennen näytettä. Objektiivit ovat käämejä, joiden virtaa voidaan säätää ja siten supistaa sekä fokusoida elektronisuihkua. Objektiivit vaativat jäähdytystä, jotteivat ylikuumene. Kuvassa 16 on esitetty linssisysteemissä kokoojalinssi ja objektiivi. [11] Apreossa viimeiseen objektiiviin voidaan yhdistää magneettikenttä, jolloin resoluutioksi voidaan saada jopa 1,0 nm [17].





Kuva 18. Kuvassa on esitetty objektiivin rakenne. Kuvasta näkee erityisesti stigmaattorin ja pyyhkäisykäämien sijainnit. [22]

#### 4.3.4 Stigmaattori

Stigmaattori (stigmator tai stigmator coil) korjaa hajataittoa ja auttaa muodostamaan poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisen elektronisuihkun. Kuvissa stigmaattisuus näkyy yleensä muotojen venymisenä tai epätarkkuutena. [11] Stigmaattori korjaa hajataittoa sähkö- tai magneettikentällä, joka on kohtisuorassa elektronisuihkuun nähden. [23]

Stigmaattorit ovat usein objektiivien sisällä ja niitä on kolmea tyyppiä. Magneettinen stigmaattori voi olla esimerkiksi ei-magneettinen rengas, jossa on kaksi raudan palaa. Rengas on samankeskeisesti optisella akselilla ja sitä pystytään pyörittämään siinä sekä liikuttamaan akselin suuntaisesti. Näin pystytään poistamaan objektiivin hajataittoa niin suunnan kuin suuruuden suhteen. Stigmaattori toimii ikään

kuin heikkona sylinterisenä linssinä, joka ei poikkeuta elektroneja niin voimakkaasti sauvojen plus- ja miinusnapojen muodostaman magneettikentän voimakkuuden ja suunnan avulla. Toisessa versiossa laitetaan sauvoja symmetriseksi kehäksi optisen akselin ympärille, mutta nyt elektrodien potentiaalijakaumaa voidaan muuttaa. Näin voidaan muuttaa syntyneen heikon sylinterisen linssin voimakkuutta ja akselin suuntaa. Sauvoja tulee olla vähintään neljä kappaletta ja parillinen lukumäärä, jotta saadaan synnytettyä sopiva kenttä sähkömagneettisesti. Kolmas tapa on kokoojalinsseihin ja objektiivihin liitettävä sähkömagneettinen stigmaattori, joka toimii säätämällä käämin virtaa. Ensimmäiset käytetyt stigmaattorit olivat tällaisia. [24]

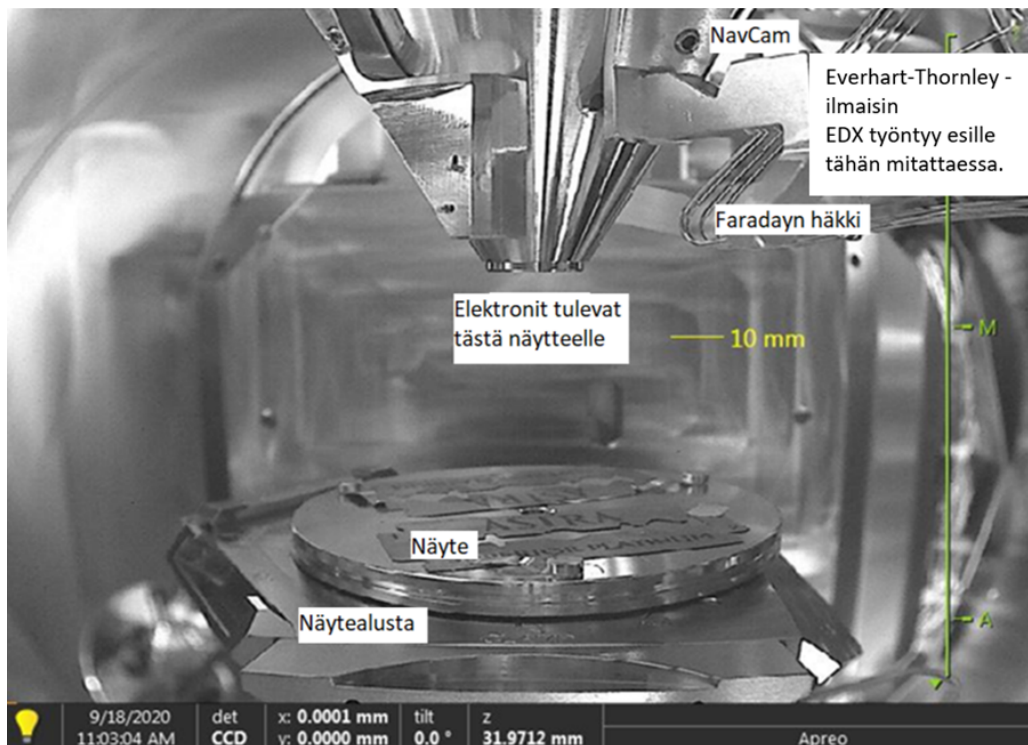
#### 4.3.5 Pyyhkäisykäämi

Kuvantaminen tapahtuu skannaamalla eli pyyhkäisemällä tutkittavaa aluetta elektronisuihkulla. Pyyhkäisykäämit (scan coil) poikkeuttavat elektronisuihkun x- ja y-suunnassa, jotta näytteen pinta voidaan pyyhkäistä alue kerrallaan. Tällaista aluetta kutsutaan rasteriksi. Lopullinen, skannattu mittausalue on neliön muotoinen. Jokaiselle mittaukselle määritetään halutut mittausparametrit, joita ovat esimerkiksi erotuskyky eli mittapisteiden määrä, mittausaika kussakin pisteessä (dwell time) sekä skannaustapa. Pyyhkäisykäämit sijaitsevat objektiivissa kuvan 18 osoittamalla tavalla. [25]

### 4.4 Näytekammion ominaisuuksista

Näytekammio (specimen chamber) on tyhjiöity kammio, jossa sijaitsee näytteenpöytä, ilmaisimia, infrapunakamera, optinen kamera, plasmalähde sekä erilaisia sensoreita. Sensoreilla varmistetaan kammion tila, esimerkiksi paine ja lämpötila. Näytekammio on esitetty kuvassa 19. Kammiossa on usein aiemmin ollut erillinen ilmalukko, jolloin tyhjiötä ei ole menetetty kaikkialta avatessa ja aikaa on säästynyt. Näytekammio on venttiilien avulla eristetty elektronipylväästä, joka täytyy pitää

koko ajan hyvässä tyhjiössä. Tarvittava tyhjiö näyttekammiossa saavutetaan ilmauksen jälkeen muutamien minuuttien aikana turbopumpun sekä esipumppuna toimivan pumpun, kuten vierintä- tai rotaatiopumpun, avulla. [11]

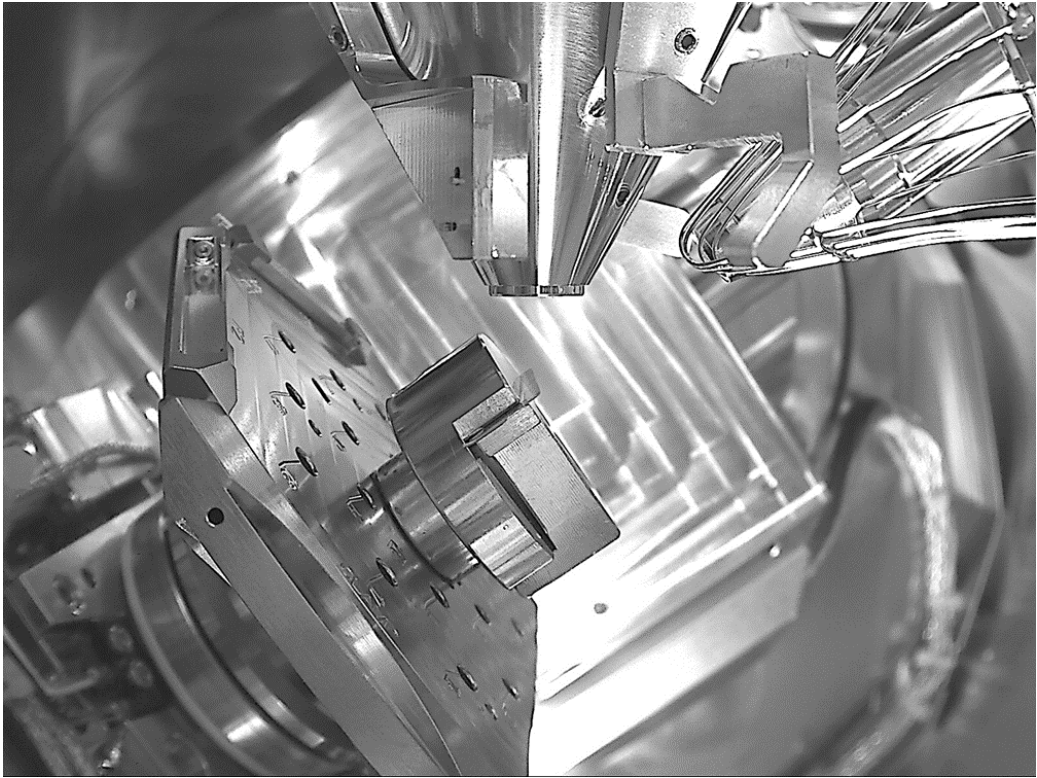


Kuva 19. Näyttekammio kuvattuna näytteen ollessa sisällä. Kuvassa näkyy etualalla keskellä näytteenpidin, jonka yläpuolelta tulee mitattaessa elektronisuihku näytteeseen.

Näytteenpidin helpottaa näytteen liikuteltavuutta sekä navigointia. Näin näyte saadaan oikeaan asentoon ja sitä voidaan hallita tarkasti. Näytteenpidin on myös maadoitettu, jotta näyte ei varautuisi. Näytteenpitimessä voi olla paikkoja erilaisille näytealustoille. Kammiossa on myös värähtelyä estävä pohja, jotta näyte saadaan mahdollisimman paikallaan olevaksi. [11]

Työssä käytetyssä Apreo S:ssä on monipuolinen näytteenpidin, jota saadaan kallistettua sekä kierrettyä, kuten kuvassa 20. Osassa paikoista voi näytteen asettaa 45 asteen kulmaan ilman, että koko pidintä tarvitsee kallistaa. Yhdellä sivulla on paikat läpäisyelektronimikroskopianäytteille (Scanning Transmission Electron Mic-

roscopy). [17]



Kuva 20. Kuvassa näkyy poikkileikkausnäytteille suunniteltu pidin, joka on voimakkaasti kallistettuna näytekammiossa. Näytettä kallistettiin, jotta saatiin terästä kuvia suoraan ylhäältä ja eri kulmissa.

## 4.5 Kameranat

Näytekammiossa on sekä optinen- että infrapunakamera. Optista kameraa käytetään, kun otetaan navigointia varten kuva näytteestä ennen elektronisuihkun päälle laittoa. Navigointikuvaa käytetään, kun halutaan liikkua näytepaikasta toiseen. Kameraa varten näytekammiossa on myös LED-valoja, jotta näyte nähdään tarkasti. [11] Toinen Apreon kameroista on IR-CCD (Charge Coupled Device) kamera, joka kuvaa infrapunavaloa, ja jolla voidaan katsoa kammiota koko ajan mittausten aikana. Erityisesti kameraa tarvitaan, kun asetetaan näyte tarkalleen oikeaan kohtaan hyvin lyhyen etäisyyden päähän objektiivista. Näyte ei nimittäin saa missään nimessä osua elektronipylvääseen, sillä elektronipylvään suuntaus on hyvin herkkä ja

laite voisi vaurioitua kontaktista pysyvästi. Myös näyte vaurioituisi osumasta. [11]  
Tässä työssä esimerkiksi kuvat 19 ja 20 on otettu infrapunakameralla. [17]

## 4.6 Tyhjiösystemi

SEMissä on pidettävä tyhjiö, jotta elektronit saadaan kulkemaan näytteelle asti. Hyvä tyhjiö takaa elektroneille suuremman vapaan matkan, jolloin ne eivät osu molekyyliin ja siroa. Tyhjiö myös suojaa elektronilähdettä hapettumiselta. Näytekammioiden kontaminoitumista hiilen, vesihöyryn ynnä muiden vastaavien vuoksi estetään pitämällä hyvä tyhjiö. Tyhjiösystemi muodostuu itse kammioista, esipumpusta, turbopumpusta, mittareista, ilmalukoista ja putkista. Esipumppua tarvitaan saavuttamaan tietty painealue, jossa turbopumppu voidaan käynnistää/turbopumppu toimii tehokkaimmin. Alkupumppauksen jälkeen otetaan käyttöön tehokkaampi turbopumppu, jolla saavutetaan hyvä tyhjiö. [11]

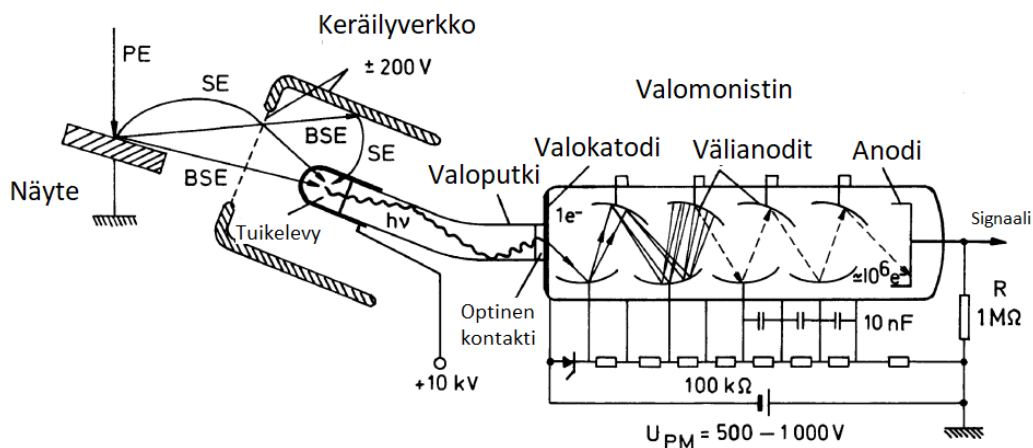
## 4.7 Ilmaisimet

SEMissä on monenlaisia ilmaisimia, joita käytetään muodostamaan kuva näytteestä. Toiminnaltaan erilaiset ilmaisimet mahdollistavat tutkittavan näytteen tarkemman analysoinnin ja niiden yhtäaikaisten käyttö vähentää virheiden mahdollisuutta.

### 4.7.1 Everhart-Thornley -ilmaisin

Everhart-Thornley -ilmaisin (ETD) on yleisimmin käytetty ilmaisimena SEMissä. Sitä käytetään havaitsemaan sekundaarielektroneja, jolloin saadaan näytteen pinnasta reaaliaikainen kuva, jossa erottuu näytteen topografia. Kuvissa korkeammat kohdat ja reunat näkyvät kirkkaampina ja siinä erottuvat myös varjot samaan tapaan kuin valomikroskoopissa. Näytekammiossa Everhart-Thornley -ilmaisimena sijaitsee sivulla, noin 45 asteen kulmassa näytteeseen nähden, kuten kuvassa 19. Sen tunnistaa sitä ympäröivästä Faradayn häkistä.[11, 26] Kuvassa 21 on esitetty Everhart-Thornley

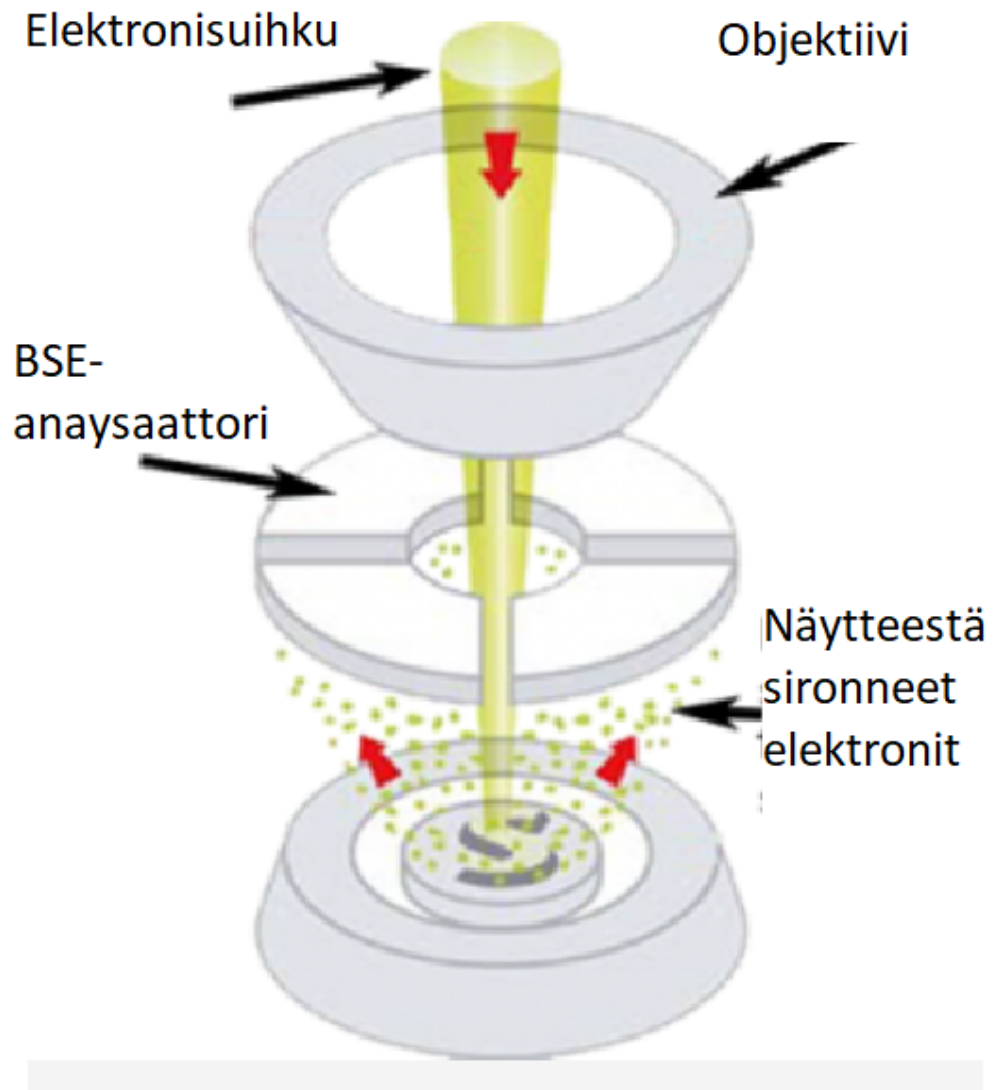
-ilmaisimen toimintaperiaate. Se rakentuu tuikeilmaisimesta ja valomonistimesta. Everhart-Thornley -ilmaisimien tunnetaan myös E-T -ilmaisimena ja SE-ilmaisimena. [12, 17]



Kuva 21. Sekundaaristen elektronien havaitsemiseen käytetty Everhart-Thornley -ilmaisimien koostuu tuikeilmaisimesta ja valomonistimesta. [15]

#### 4.7.2 BSE-analysaattori

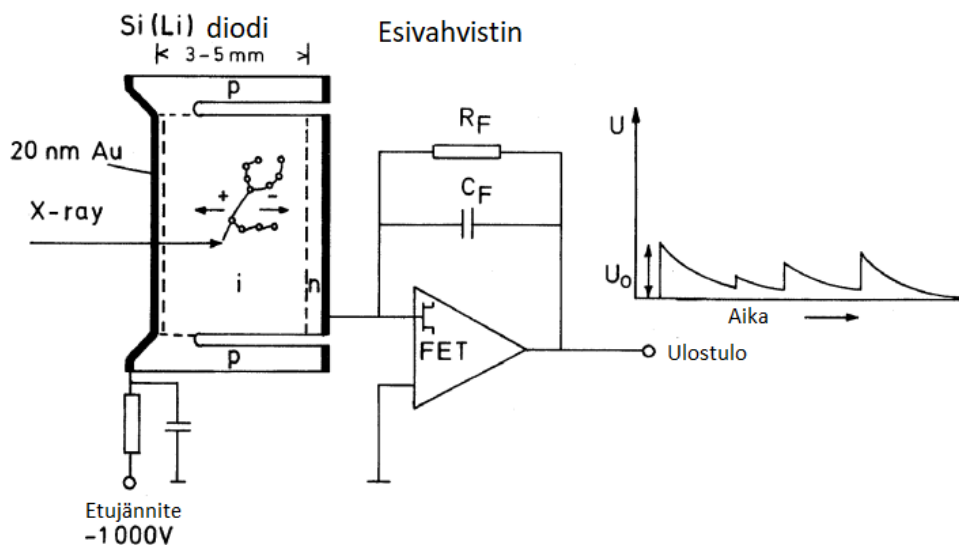
BSE-analysaattori muodostaa reaaliaikaisen kuvan näytteestä takaisin sironneiden elektronien avulla. Kuvassa 22 näkyy kaaviokuva analysaattorin toiminnasta. Kuva ei ole yhtä yksityiskohtainen kuin SE-analysaattorilla, mutta tarjoaa informaatiota alkuaineiden jakautumisesta näytteessä. Alkuaine-erot nähdään näytteessä kontrastieroina, koska elektronit siroavat herkemmin raskaista alkuaineista, kuin kevyemmistä. BSE-analysaattorilla erotetaan erilaisia alkuaineita tai partikkeleita näytteen pinnasta eli esimerkiksi likaa tai pinnoitteita.



Kuva 22. Takaisin sironneet elektronit tulevat alhaalta BSE-analysointorille. [25]

#### 4.7.3 EDX-analysointori

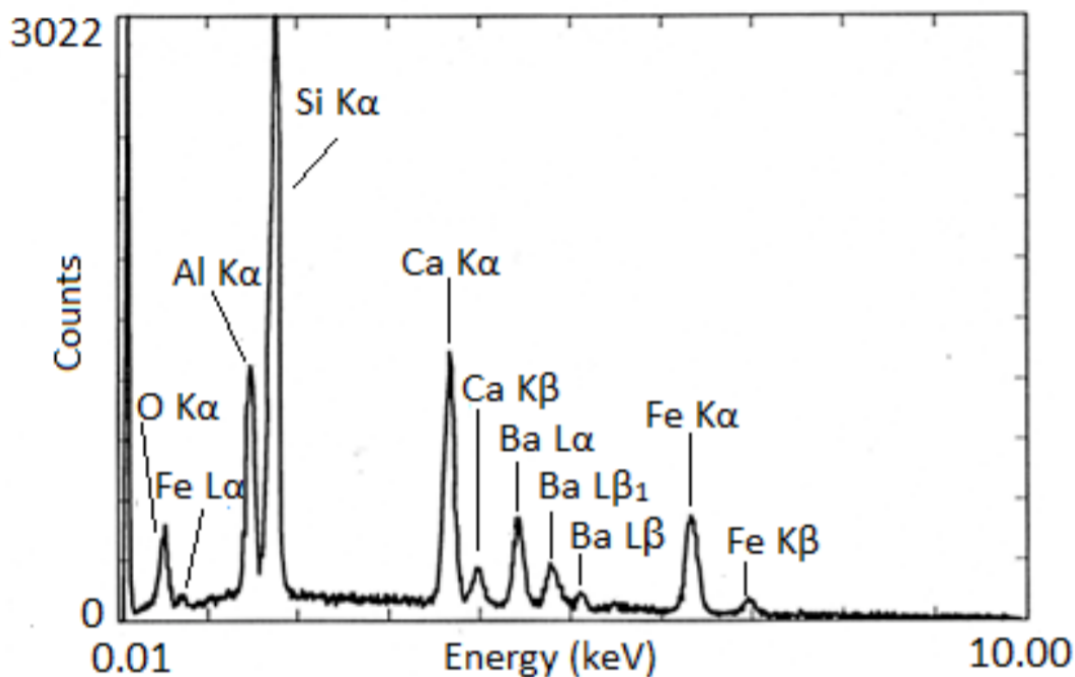
EDX-analysointorilla (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) havaitaan elektronisuihkun aikaansaamaa röntgensäteilyä. [11, 23] Kuvassa 23 on esitetty analysointorin toimintaperiaate. Yhdessä SEMin kanssa EDX-analyysi kertoo yksityiskohtaisesti pinnan rakenteesta sekä alkuainekoostumuksesta ja -jakaumasta.



Kuva 23. EDX-analyysin perustoimintaperiaate. Kuvassa Si (Li)-röntgendiodi on kytketty kanavatransistoriin eli FETiin, jossa on resistiivinen takaisinkytkentä. Oikealla kuvassa on esitetty ulostulojännite ajan suhteen. [15]

Kuvantamisen yhteydessä voidaan samanaikaisesti ottaa myös röntgenspektri pisteestä tai alueesta, josta erottuvat kaikki alkuaineet paitsi vety, helium ja litium. Kuvassa 24 on esitetty emissiospektri, jonka karakterisista fotoemissioviivoista alkuaineet voidaan tunnistaa. Spektriviivoja vastaavista fotonin energioista voidaan tunnistaa eri alkuaineita. Spektrin tausta aiheutuu jarrutusäteilystä, jota syntyy kaikilla fotonin energioilla. Yksittäisistä pisteistä mitattujen spektrien avulla voidaan muodostaa alkuainekartta. Paikkaresoluutio on mikrometrin luokkaa ja EDX-analyysaattorin herkkyys 0,1-0,5 painoprosenttia. EDX-analyysaattori tunnetaan yleisesti myös nimellä Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). [11, 18, 27] EDX sijaitsee Everhart-Thornley -ilmaisimen kanssa samassa kulmassa näytteeseen nähden [18]. Tutkielmassa käytetään Oxford Ultim Max EDS:ä.





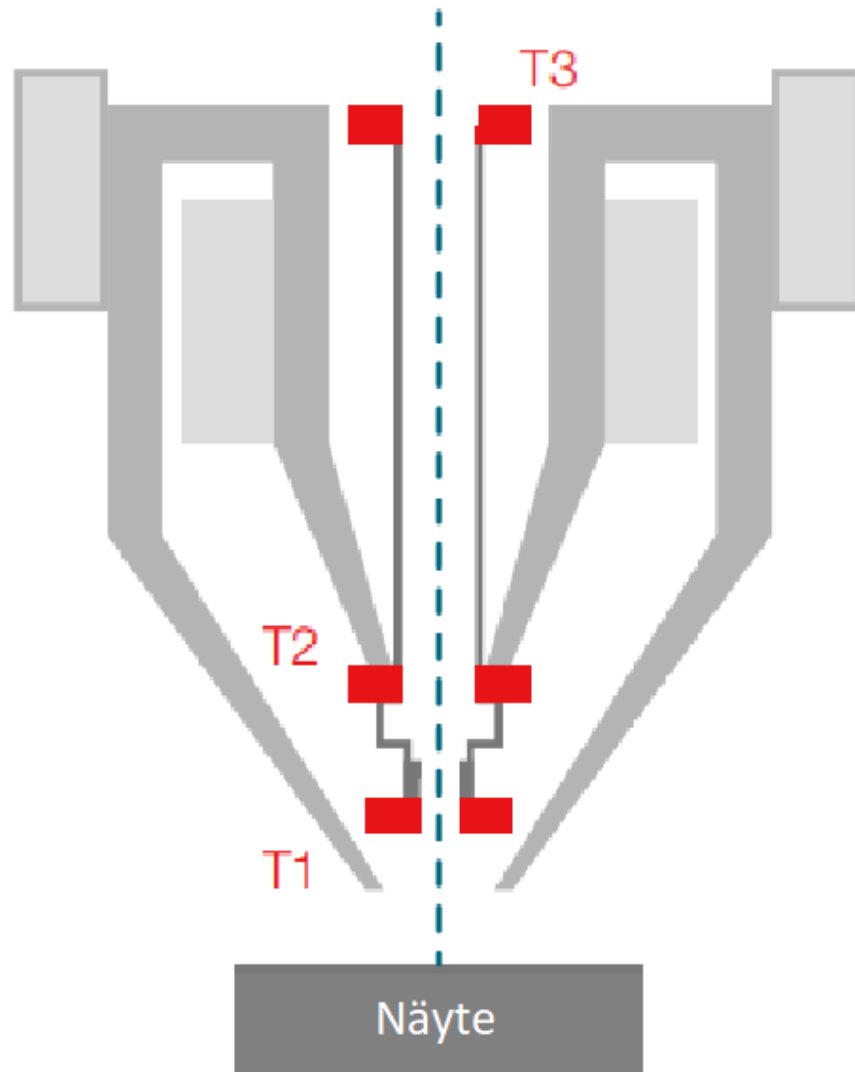
Kuva 24. Esimerkki röntgenspektristä, jonka karakterisista piikeistä voidaan tunnistaa näytteen alkuainekoostumus. [18]

#### 4.7.4 In-lens/in-column -ilmaisimet

In-lens/in-column -ilmaisimet ovat elektrostaattisen linssin/elektronipylvään sisällä sijaitsevia ilmaisimia, jotka havaitsevat signaalin suoraan näytteen yläpuolelta. Tällöin esimerkiksi epätasaisia kappaleita tutkittaessa kuva on erilainen, kuin Everhart-Thornley -ilmaisimella havaittuna. Työskentelyetäisyydestä riippuen ilmaisimet havaitsevat joko takaisinsironneita tai sekundaarielektroneja. Ylimpänä pylväässä sijaitseva ilmaisimien antaa signaalin aivan näytteen uloimmasta kerroksesta.

Tässä tutkimuksessa käytetyssä Apreo S SEMissä on kolmen in lens -ilmaisimen Trinity-ilmaisinsysteemi, joka muodostuu kolmesta ilmaisimesta: T1, T2 ja T3. Näistä T1 ja T2 sijaitsevat elektrostaattisen linssin sisällä, kun taas T3 on ylempänä elektronipylväässä, kuten kuvasta 25 nähdään. Ilmaisimen etäisyys näytteestä on verrannollinen sille päätyvien elektronien liike-energiaan, joskin myös elektronien lentoradalla on vaikutusta.

Ilmaisimet T1, T2 ja T3 havainnollistavat eri energia-alueita ja siten ovat herkkiä eri sirontamekanismeille. T1 havainnoi takaisin sironneita elektroneja lähimpänä näytettä ja kerää maksimimäärän signaalia. T1 toimii pienillä tai suurilla etäisyyksillä näytteestä, eikä näytteen suuntaus vaikuta sen toimintaan. Sen avulla voidaan kuvata varautuvia ja herkkiä materiaaleja. Myös alhaista elektronisuihkun virtaa voidaan käyttää T1 kanssa. [28] T1 ilmaiseekin hyvin materiaalikontrastia, T2 pinnan rakennetta ja T3 aivan ulointa pintaa, kun työskentelyetäisyys on 10 mm. [18]



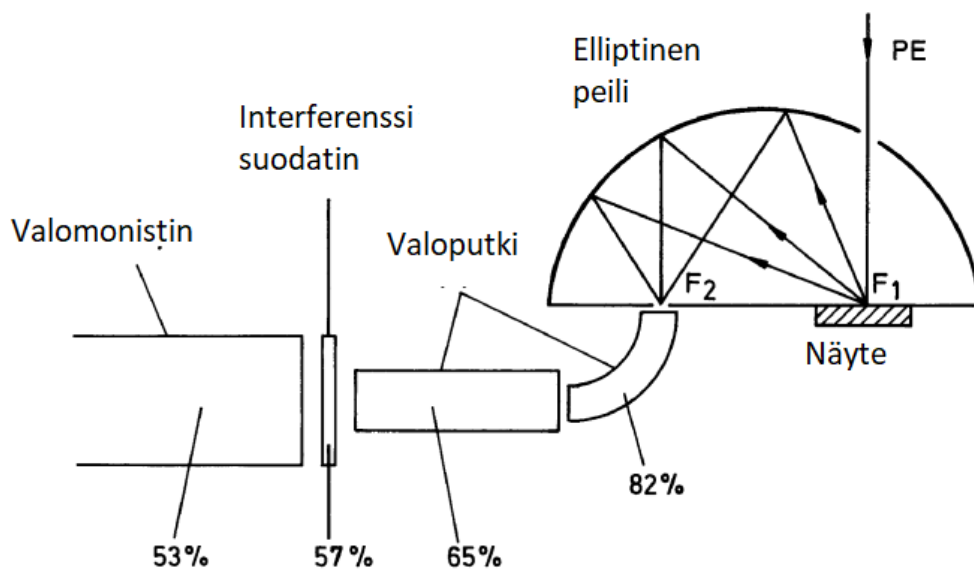
Kuva 25. Trinity-ilmaisinsysteemin muodostavat kuvassa näkyvät T1,T2 ja T3. T1 ja T2 ovat elektrostaattisen linssin sisällä ja T3 on elektronipylväessä. [28]

#### 4.7.5 Muita ilmaisinjärjestelmiä

STEMillä eli pyyhkäisyläpivalaisuelektronimikroskoopilla (Scanning Transmission Electron Microscope) tutkitaan yleensä ohuita näytteitä, joiden läpi elektronit kulkevat tai joista elektronit taipuvat. STEMillä mitatessa näyte asetetaan kupariverkelle ja sillä tutkitaan yleensä nanopartikkeleja. STEM:n detektori on aina näytteen

alla. [15, s. 312]

SEMissä havaitaan myös fotoneja katodoluminesenssi-ilmaisimella. Katodoluminesenssi (CathodoLuminescence, CL) on suurienergisten elektronien aiheuttamaa luminoivan materiaalin virittymistä ja sen tilan purkautumista fotonien emissiona. Näistä fotoneista osa havaitaan ihmissilmälle näkyvillä aallonpituuksilla, muut infrapunaa tai ultraviolettisäteilyn alueella. Katodoluminesenssi-ilmaisimessa kerää fotonit ja ohjaa ne valomonistimeen signaalin vahvistamiseksi, kuten kuvassa 26. Katodoluminesenssin avulla voidaan erottaa näytteen ominaisuuksia, jotka eivät näkyisi muuten SEMissä.[29] [12, s.482]



Kuva 26. Katoluminesenssi-ilmaisimessa koostuu elliptisestä peilistä ja valomonistimesta. [15]

Käytetyssä Apreossa ei ole kahta seuraavaa mittalaitetta: WDS-analysointilaitteella (Wavelength Dispersive Spectrometer) voidaan tutkia röntgenspektriä kapealta energia-alueelta. Aaltodispersiivisellä röntgenanalysointilaitteella eli WDS-analysointilaitteella (Wavelength Dispersive Spectrometer) voidaan mitata röntgenspektri kapealta energia-alueelta hyvin tarkalla resoluutiolla. Tällöin saadaan yksityiskohtaisempaa informaatiota tutkittavalta energia-alueelta. Tämä on erityisen

käytännöllistä, jos tutkittavassa näytteessä on alkuaineita, joiden röntgenspektrin piikit ovat hyvin lähellä toisiaan. Analysaattorin paikkaresoluutio on mikrometrin luokkaa, kuten EDX-analysaattorissa, mutta analysaattorin herkkyys on 10-100 ppm luokkaa. EDX-analyysiin verrattuna näytteen etäisyyden kanssa tulee olla tarkempi. SEMin WDS-analysaattoria voidaan kutsua myös WDX:si. [11, 27]

EBSD-analysaattorilla (Electron BackScatter Diffraction) voidaan analysoida näytteen kiderakennetta ja kiteiden orientaatioita näytteessä. Tämä on tärkeä lisä EDX-laitteistoon, sillä samanlainen kemiallinen koostumus voi muodostaa monenlaisia kiderakenteita. Esimerkiksi hapettuneen raudan kemiallinen koostumus on hankalaa tai mahdotonta selvittää pelkästään SEM- tai EDX-mittauksilla. EBSD-mittaus perustuu diffraktioon, joka havaitaan elektronisuihkun osuessa kiteiseen näytteeseen. Myös rae- ja raeraja-analyyseihin sekä faasien kartoitukseen EBSD-analysaattori on hyvä. Analysaattorin paikkaresoluutio on noin 30-100 nm riippuen näytteestä. [11, 27]

## 4.8 Ohjainlaitteisto

Ohjainlaitteisto on tärkeä osa SEMiä. Ohjainlaitteisto auttaa hallitsemaan elektronilähteen virtaa ja elektronien ohjaamista näytteeseen. SEMin tärkeimmät mittausparametrit ovat jännite, virta, astigmaattisuus sekä fokus. Ohjainlaitteistolla voidaan säädellä niin näytekamion ilmaamista ja avaamista, kuin näytteenpitimen asentoa. Tietokone sujuvoittaa merkittävästi tiedonhallintaa ja käsittelyä. Tietokonejärjestelmä myös ohjaa mittauksessa ja suojaa laitteistoa esimerkiksi varoittamalla mikäli näyte olisi osumassa johonkin kammiossa. Ennen kaikkea käyttömukavuus on parantunut ja mittaukset vievät vähemmän aikaa, kun kaikkea säädetään samasta selkeästä käyttöliittymästä, eikä jokaiselle parametrille ole omaa säädintä. [11, s. 71]

## 4.9 Näytteen käsittely

SEMillä tutkittavien näytteiden on kestettävä elektronisuihkua sekä tyhjiötä, sillä näytteestä ei saa höyrystyä kammioon materiaalia. Mikäli näyte ei johda sähköä se varautuu, eikä luotettava kuvantaminen onnistu, joten se tulee saada riittävän johtavaksi. Tämä voidaan tehdä päällystämällä näyte ohuella metallikerroksella, esimerkiksi kullalla, tai käyttämällä metallitahnaa tai kehystämällä näyte metalliteipillä. Näyte voidaan joissain SEM-laitteistoissa mitata myös heikommassa tyhjiössä tai jopa ilmanpaineessa, jolloin näyte ei varaudu yhtä voimakkaasti. Aina näyte kuitenkin maadoitetaan näytteenpitimeen joko kiinnikkeiden tai johtavan teipin avulla. Näytettä on aina käsiteltävä pinsettien ja hanskojen kanssa, jottei esimerkiksi sormenjälkien rasva likaa näytettä ja kammiota ja haittaa tutkimusta. Usein näyte myös pestään etanolilla ennen kammioon laittoa.

Partaterät ovat johtavia magneettisia näytteitä. Niitä ei tarvitse päällystää ennen mittausta, vaan ainoastaan niistä pestään ylimääräiset epäpuhtaudet etanolilla muualta kuin reunoista, jottei terän kärki vaurioidu. Partaterän maadoittamiseksi riittää kiinnittää se kahdesta kohtaa näytealustaan metallisilla kiinnikkeillä. Periaatteessa yksikin maadoituskohta on riittävä, mutta näytealustaan mahtui hyvin kaksi kiinnikettä ja näyte oli suuri.

## 5 Mittaukset

Tutkin partaterän tylsymistä vertaamalla verrokkiterää kolmeen käytettyyn eri olosuhteissa säilytettyyn terään SEMin avulla. Verrokkiterää ei käytetty ennen mittauksia. Tarkoituksena on eritellä havaittuja tylsymistapoja sekä säilytyksen vaikutusta terään. Tutkin terien mittaustuloksista myös niissä väitetyn platina-pinnoitteen laatua ja platinan määrää.

Verrokkiterää säilytettiin kosteudeltaan vaihtelevissa NTP-olosuhteissa, mutta

paketissa suojaissa. NTP tulee englannin kielen sanoista Normal Temperature and Pressure, jolloin paine on  $1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$  ja lämpötila on  $20 \text{ }^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$  [30]. Muut tutkittavat terät olivat noin 10 kertaa käytettyjä, kokeneen käyttäjän käytössä tylsyneiksi toteamia. Verrokkia lukuun ottamatta kaikkia partateriä käytti klassisen yksiteräisen partahöylän kokenut käyttäjä, joka käytti partavaahtoa ajaessaan ja huuhteli terän aina käytön jälkeen. Valitsin koehenkilön hänen kokemuksensa perusteella. Hän on ajanut vuosia partaansa yksiteräisillä partaterillä ja hänelle on kehittynyt toimiva oma ajotyöli. Näin ollen voidaan olettaa terien kuluvan verrattain samalla tavalla. Kolmea muuta partaterää säilytettiin vaihtelevissa oloissa kylpyhuoneessa: kuivatussa molekyyliseulassa ja suljetussa astiassa, jonka pohjalla oli vettä, johon terä ei kuitenkaan koskenut. Taulukossa 3 on esitetty eri terien tiedot. Tästä eteenpäin kutsun teriä säilytystapansa mukaan: verrokkiterä, normiterä, kuivaterä ja märkäterä. Kuivaterää säilytettiin mittauksiin asti kuivatussa molekyyliseulassa. Märkäterä siirrettiin alle kahden viikon käyttöjakson jälkeen kylpyhuonetta kuivempaan paikkaan NTP-olosuhteisiin.

Tutkin eri säilytystapojen avulla säilytyksen mahdollista vaikutusta terän kulumiseen. Muuttamalla säilytysolosuhteita halusin tutkia kosteuden oletettua haittaa metalleille mm. korroosion vuoksi. Ennen mittauksia pyyhin partaterien keskiosat varovasti alkoholilla, jotta SEM ei likaantuisi. Tällöin pystyin silti havainnoimaan terän kärkeä samanlaisessa tilassa, jolla sitä käytetään ajamiseen. Puhdistettaessa terän kunto olisi vaarantunut ja mahdollisesti tärkeää informaatiota olisi voinut kadota.

Partaterä koostuu kahdesta terävästä reunasta, joista jommalla kummalla parta ajetaan. Kuvassa 27 on kaksi terää näytekammiassa. Partaterien hieman alle  $10 \mu\text{m}$  leveät teroitettut osuudet erottuvat kuvassa kiiltävänä osana terän reunoissa. Partaa ajaessa käytetään partavaahtoa suojaamaan ihoa. Terä huuhdellaan vedellä jokaisen käytön jälkeen, jotta karvat ja partavaahto irtoavat sen pinnasta. Terästä käytetään

Taulukko 3. Neljän testattavan Astra superior platinum -partaterän tiedot.

Verrokki	Käyttämätön	Säilytetty paketissaan NTP-olosuhteissa
Normaali	Käytetty n. 10 krt	Säilytys vaihtelevissa kylpyhuoneolosuhteissa
Kuiva	Käytetty n. 10 krt	Säilytys molekyyliseulassa minimoidussa kosteudessa
Märkä	Käytetty n. 10 krt	Säilytys suljetussa astiassa, jonka pohjalla on vettä

vuoroin toista reunaa, joissa kuluminen tapahtuu.



Kuva 27. Kaksi partaterää näyttönpitimestä maadoitettuna. Märässä säilytetty vasemmanpuoleinen terä on maadoitettu kahden kiinnikkeen avulla. NTP-olosuhteissa säilytetty oikeanpuoleinen terä on toisesta reunasta maadoitettu johtavalla kupariteipillä.

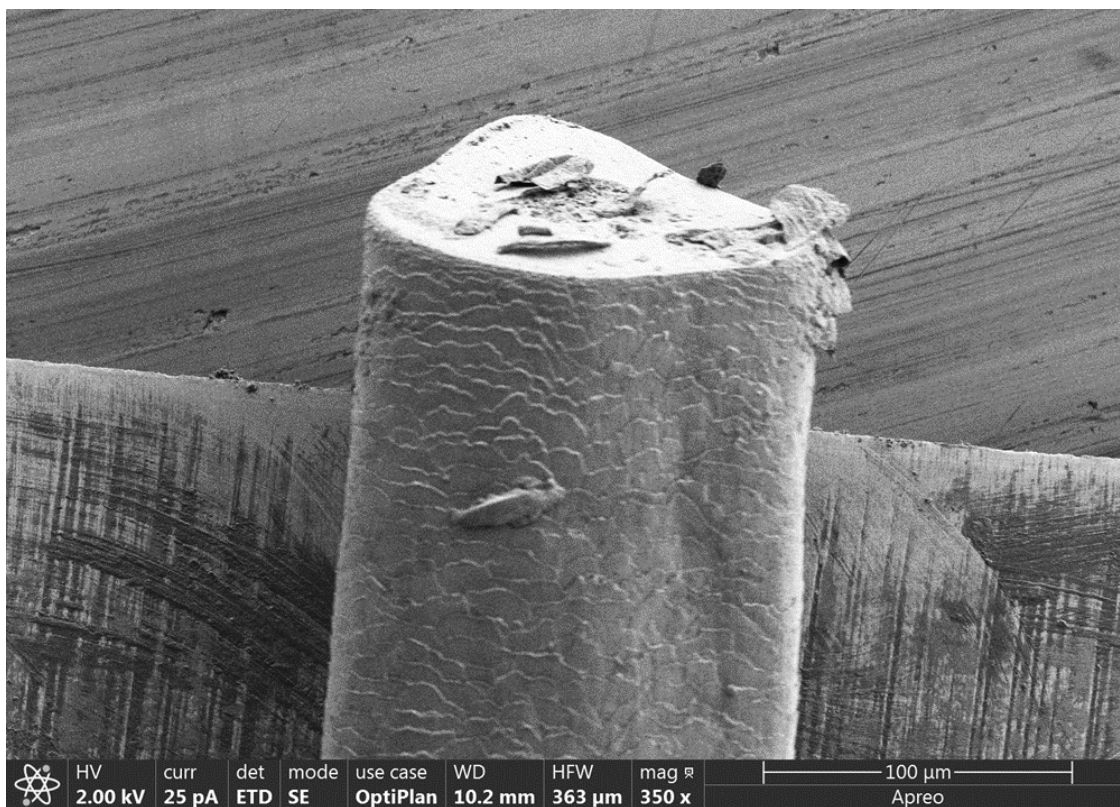
Suoritin mittaukset Turun yliopiston Thermo Fisher Scientificin Apreo S SEMillä usean päivän aikana syksyllä 2020. Käytin mittauksissa Optiplan-mittausasetusta, jossa primaarielektronit kiihdytetään ylimääräisen sähkökentän avulla.



la näytteeseen. Tämä auttaa kohdistamaan elektronit tarkemmin pienelle alalle. [18] Tein näytteistä myös EDX-analyysit alkuainekoostumuksen kartoittamiseksi. Muokkasin osaa mittauksista saaduista kuvista kuvankäsittelyohjelmalla, jotta niiden kontrasti ja kirkkaus olisi optimaalinen. Joitain kuvia yhdistelin tarpeen mukaan ja osaan lisäsin selittäviä piirroksia.

## 6 Tulokset ja pohdinta

Terien reunaa kuvannettiin SEMillä pidemmältä alueelta. Kun olin perehtynyt terän profiliin kokonaisvaltaisemmin, etsin terälle ominaisempia kohtia jotka kuvasin. Yksittäisten kohtien lisäksi kuvasin myös 200  $\mu\text{m}$  pitkä kohta reunasta yleiskuvan saamiseksi. Karvat ovat tätä aluetta pienempiä, joten koosta saa hyvän käsityksen. Partakarvojen halkaisija on tyypillisesti 100-200  $\mu\text{m}$ , kuten kuva 28 havainnollistaa. Terään aiheutuvat muutokset olivat kuitenkin yksittäistä partakarvaa huomattavasti pienempiä.



Kuva 28. Kuvassa erottuu hyvin partakarvan koko, hiussuomut sekä karvan ydin.

## 6.1 Terän alkuaineanalyysi

Selvitettäessä ruostumattoman partaterän koostumusta käytettiin EDX-analyysia. Tein tämän useasta kohtaa varmistuakseni terän koostumuksesta. Kuvassa 29 on koottuna yhden märkäterän alkuaineanalyysi. Siitä nähdään terän sisältävän rautaa, kromia, fluoria, hiiltä, happea ja piitä. Märkäterän alkuaineiden määrät on esitetty massaprosentteina taulukossa 4. Terän koostumus näyttää sopivan ruostumattomaan teräkseen. Taulukossa 5 on esitetty yhdyntyyppisen ruostumattomasta teräksestä valmistetun partaterän alkuainekoostumus. Mangaania ei tässä työssä tutkituista teristä löytynyt, vaikka sitä on ainakin joissain partaterissä, kuten esimerkiksi Sandvikin terissä taulukossa 5. On normaalia, ettei mangaani erotu EDS analyysissä, sillä sitä on todennäköisesti hyvin pieni osuus teräksestä, ja sen spektrin voimakkaimmatkin piikit saattavat peittyä raudan ja kromin spektrien alle.

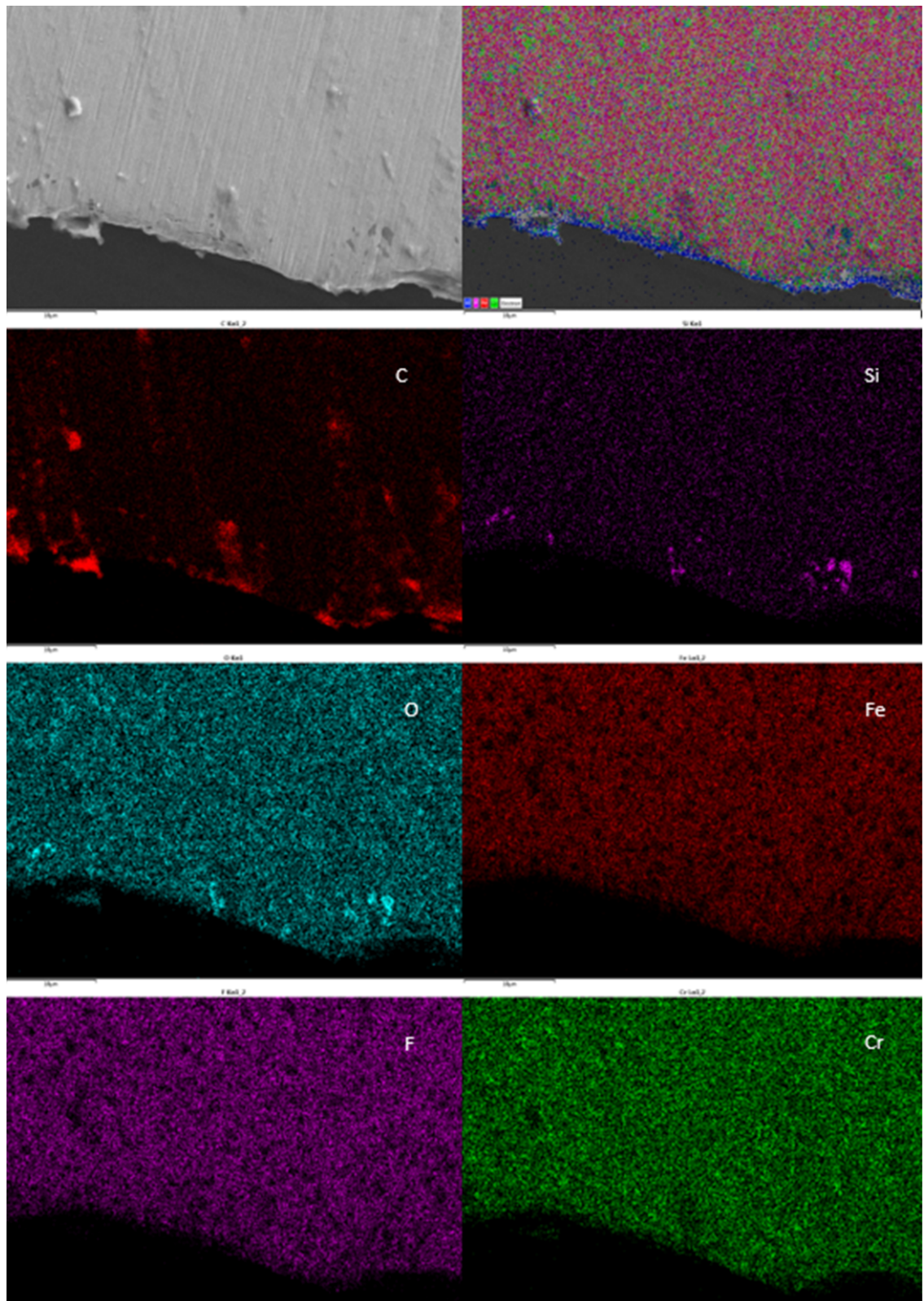
Taulukko 4. Astra superior platinum -partaterän koostumus tämän työn mittausten perusteella.

Alkuaine	Lyhenne	m-%
Rauta	Fe	38,8
Hiili	C	31,4
Kromi	Cr	24,8
Happi	O	2,2
Rauta	Fe	1,9
Kalsium	Ca	0,5
Pii	Si	0,3
Alumiini	Al	0,2

Taulukko 5. Taulukossa on esitetty Sandvikin teräslaadun 13C26 alkuainekoostumus mittaustensa perusteella. [31] Raudan koostumusta ei ole merkitty taulukkoon. Se vastaa jäljelle jäävää prosenttiosuutta.

Laatu	Alkuaineet [massaprosentti]						
Sandvik	C	Si	Mn	P(Max)	S(Max)	Cr	Fe
13C26	0,68	0,4	0,7	0,025	0,010	13	noin 78,9

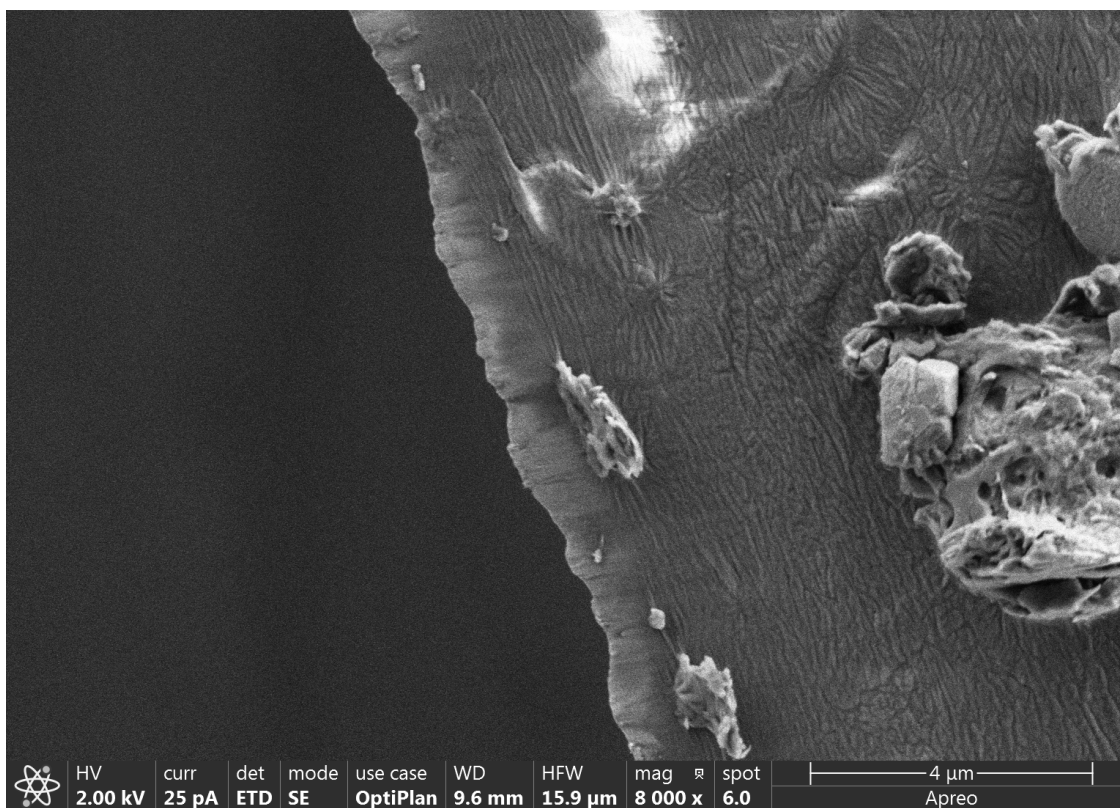
Hiiltä lisätään usein ruostumattomaan teräkseen pieniä määriä [31]. Sitä on kuitenkin myös koko terän pinnassa pintakäsittelyn vuoksi, mutta erityisesti se näkyy epäpuhtauksissa. Epäpuhtauksina esiintyvät myös pii ja happi, jotka toistuvat samoissa keskittymissä. Päätelen piin olevan hapettunut eli on muodostunut piioksidiä. Muut alkuaineet ovat tasaisemmin jakautuneet terän pinnalle. Fluoria oli näytteissä melko vähän. Erillisissä röntgenfotoelektronispektroskooppisella menetelmällä tehdyissä mittauksissa havaitsin fluorin olevan vain terien pintakerroksessa. Kuvassa 29 oikeassa yläkulmassa olevasta yhdistelmäkuvas- ta erottuu selkeästi myös terän reunassa sinisenä alumiinia. Tämä todennäköisesti johtuu hiontavälineestä tarttuneista jäämistä tai näytteen alustasta, sillä se on puhdasta alumiinia, eikä sitä muutoin havaittu terissä.



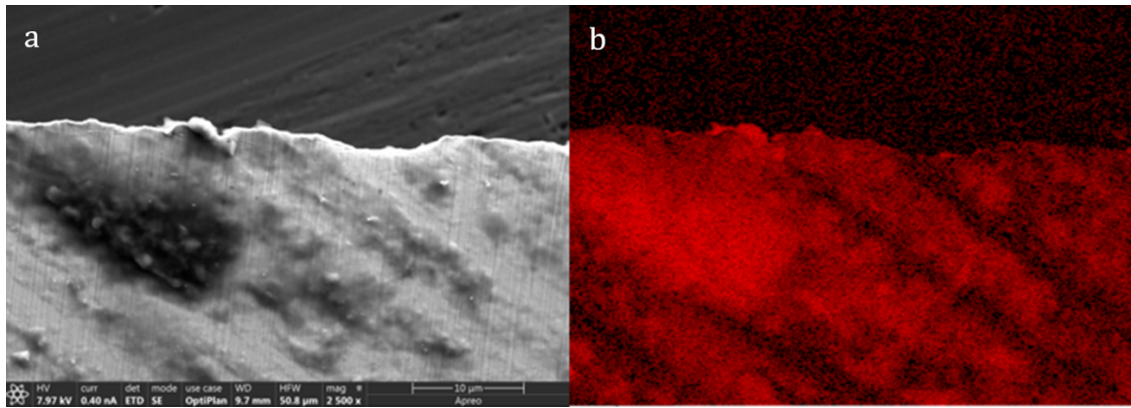
Kuva 29. EDX-analyysillä tehdyt alkuainekartat vasemmalla ylhäällä esitetyn topografiakuvan alueelta. Oikealla taas yhdistelmäkartta eri alkuaineista. Näiden alla on hiilen (C), piin (Si), hapen (O), raudan (Fe), fluorin (F) ja kromin (Cr) erilliset alkuainekartat. Näistä on tärkeää huomata alkuaineiden sijainti näytteessä sekä kohdat joissa alkuainetta on erityisen paljon. Yhdistelmäkartassa ja erillisissä alkuainekartoissa on samat värit alkuaineille.

## 6.2 Terän pinta

Terän käytöstä jää epäpuhtauksia, kuten rasvaa ja muuta orgaanista materiaalia terän pintaan. Kuvassa 30 on esitetty terän pinnasta sekä materiaaliltaan että rakenteeltaan erottuva epäpuhtaus. Epäpuhtaudet ovat alkuaineanalyysini perusteella lähes aina hiiltä ja happea sisältävää orgaanista materiaalia. Havaitsin orgaanisen materiaalin EDX-analysaattorilla joko yksittäisinä paakuina tai tasaisempina kerroksena, jossa voi selkeästi havaita enemmän hiiltä sisältävät kohdat tummentumina, kuten kuvassa 31.



Kuva 30. Terän pinnasta erottuu epäpuhtauksia. EDX-analyysillä tällaiset epäpuhtaudet todettiin orgaanisiksi sisältämänsä hiilen ja hapen perusteella.



Kuva 31. Vasemmalla (a) SEM-kuva ja oikealla (b) EDX-analysaattorilla mitattu hiilen alkuainekartta. Terän pinnasta erottuu selkeästi epäpuhtauksia. Kuvassa b on hiili esitetty punaisella. Kuvan vasemmassa reunassa erottuu kohta, jossa on paljon hiiltä. Sama alue näkyy tummana SEM-kuvassa a, joka on muodostettu ETD-ilmaisimelle tulleiden sekundaarielektronien perusteella.

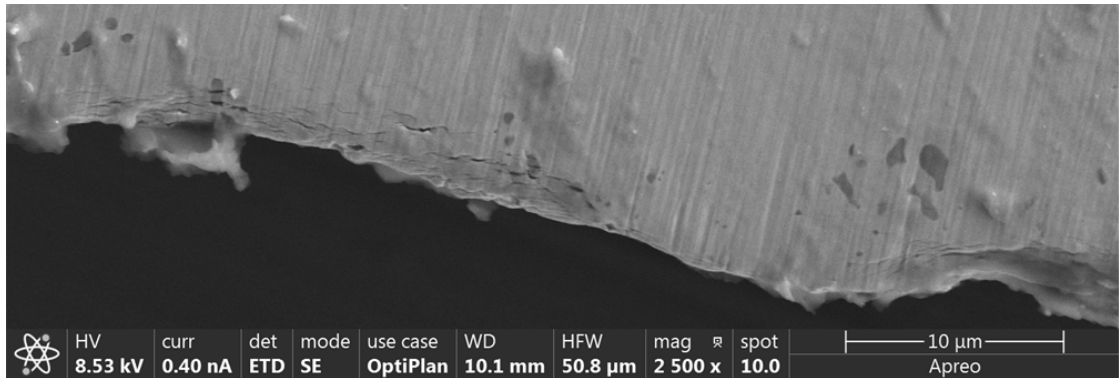
### 6.2.1 Epäpuhtaudet

Terän pinnalla oli havaittavissa selkeästi kerros ainetta, joka ei lähtenyt pelkästään etanolilla pyyhittäessä tai pitämällä terää useita minutteja ultraäänipesurissa etanolikylyyssä. Myöskään asetonin ei irrottanut sitä ilman hankausta. Orgaaninen öljy vaikuttaa todennäköiseltä aineelta, joka havaittiin mittauksissa. Terien valmistuksessa käytetään yhdessä vaiheessa tarttumisen estävää päällystettä, jonka jälkeen terää vielä käsitellään uittamalla orgaanisessa öljyssä korroosion estämiseksi. [10] Öljyissä on tunnetusti paljon hiiltä sekä vetyä ja se vaatii paremman puhdistuksen. Öljy ei välttämättä irtoa helposti edes etanolilla tai asetonillakaan pyyhittäessä.

### 6.2.2 Piilaikut

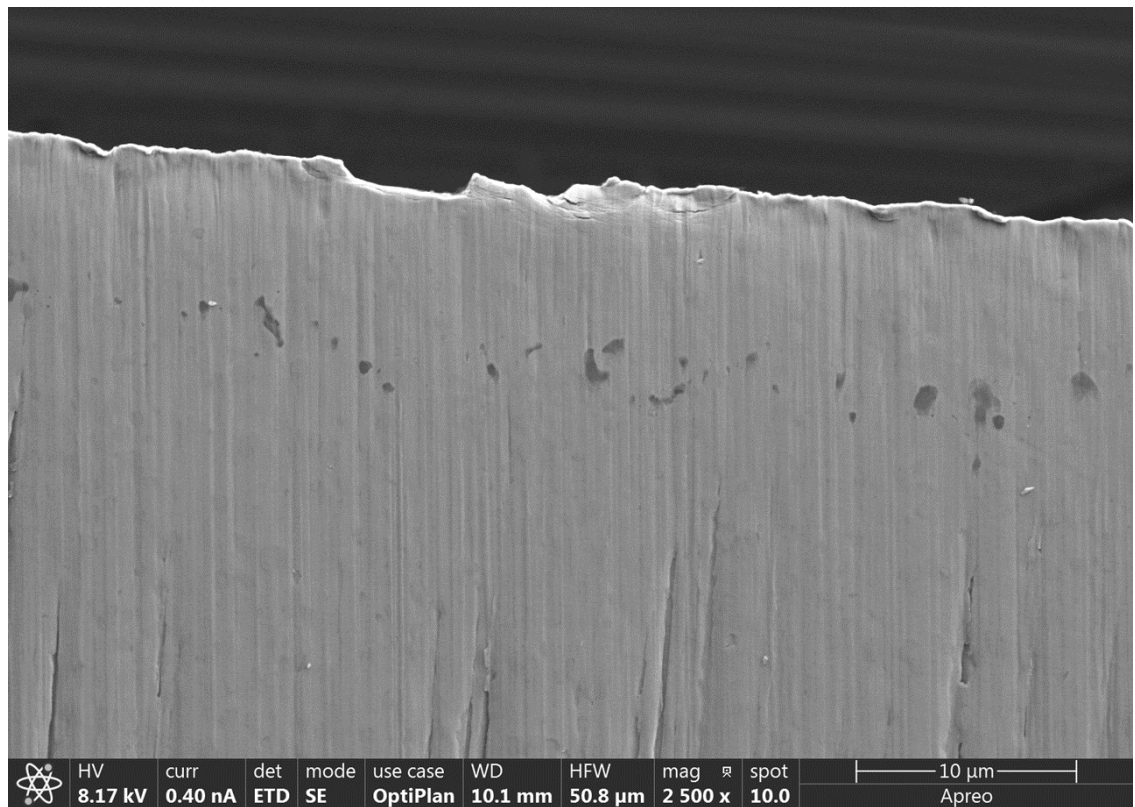
Teriä tutkiessa reunan tietämällä löytyi muista pinnanmuodoista eroavia laikkuja, jotka eivät kohoa terän pinnasta. Laikut ovat muodoltaan sekä kirkkaudeltaan selkeästi erottuvia. Kuvassa 32 näkyy hyvin monta tällaista laikkuja. Alkuaineanalyysini perusteella nämä ovat piioksidia, kuten kuvassa 29. Nämä laikut voivat olla osasyynä terän murtumiseen, mutta asia kaipaisi lisätutkimusta. Kuten kuvassa 32

huomataan, usein piilaikut ovat murtumien läheisyydessä. Tämä voisi merkitä terän materiaalin epätasaista alkuainejakaumaa, joka aiheuttaa heikentymiä kohdissa joissa piilaikkuja esiintyy. Kuvassa 33 havaitaan, että piilaikkuja esiintyy myös kauempana reunasta eikä suoraan murtumien läheisyydessä. Todennäköisesti kauempana reunasta terä ei ole tarpeeksi ohut, jotta piilaikuilla olisi vaikutusta. Koska terä kapenee reunaa kohti on näkyvien piilaikkujen vieressä murtumakohtia. Piilaikut saattavat olla myös joka puolella terässä esiintyviä epäpuhtauksia, jotka hapettuneena ja tarpeeksi ohuessa terän kohdassa saavat terän murtumaan.



Kuva 32. Kuvassa erottuvat selkeästi piilaikut murtumakohtien ja lohkeaman vieressä märkäterässä. Lohkeama ei ole teräväreunainen, joten se on todennäköisesti vanhempi.





Kuva 33. Kuvassa erottuvat selkeästi piilaikut hieman kauempana kuivaterän hui-pusta.

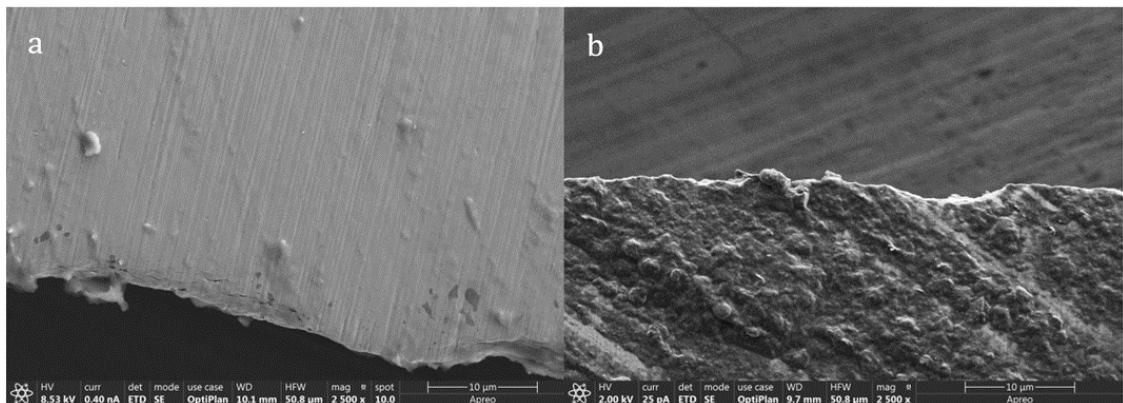
### 6.2.3 Platina

Tutkimieni partaterien valmistajan mukaan terissä on platinapinnoite. En kuitenkaan onnistunut havaitsemaan tätä EDX-analyysin avulla. Oletan, että EDX-analyysillä mitattaessa todennäköisesti hyvin ohut platinakerros läpäistiin ja signaali tuli näytteestä syvemmältä. Platinakerroksen tutkimiseen tarvitaan siis luultavasti pintaherkempi menetelmä.

### 6.2.4 Ruoste

Alunperin epäilin, että märkäterään muodostuu ruostetta käytön aikana. Ruostetta ei kuitenkaan näkynyt silmin havaittavasti. SEMin avulla havaitsin kuitenkin muutoksen märkäterän pinnassa noin kuukauden aikana eli mittausten välissä. Tämä on

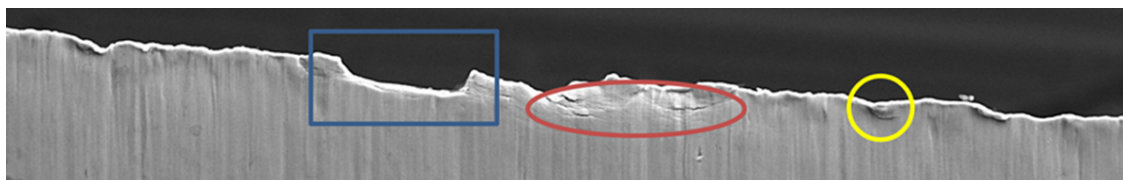
esitetty kuvassa 34. Ruoste ei kuitenkaan ole tunnistettavissa EDX-analysaattorilla. EDX-analysaattori ei ole kovin pintaherkkä ja mahdollista ruostetta olisi hyvin ohut kerros. Isoin ongelma tunnistamisessa on kuitenkin, että ruoste koostuu samasta raudasta, jota löytyy jo terästä, sekä hapesta, jota löytyy pinnasta hiilen ja muiden hapettuneiden alkuaineiden yhteydestä. Näin ollen mahdollista ruosteen muodostumista ei voida näyttää toteen tai poissulkea EDX-analyysilla. Terän muutoksen voisi myös aiheuttaa rasva, mutta näytettä on käsitelty vain nitrilihansikkain. Rasva ei siis ole todennäköinen vaihtoehto. Kuiva puhdas terän pinta on epäedullinen tai jopa mahdoton kasvualusta bakteereille ja muille pienorganismeille ravinnon puutteen vuoksi. Näin ollen nekään eivät ole todennäköinen vaihtoehto. Märkäterää on kuitenkin säilytetty suojassa vahapaperissaan, joka on ollut polystyreeni-pakkauksen sisällä. Pakkaus on toiminut vain laatikkona ja sitä on voitu käsitellä ilman nitrilihansikkaita. Pakkauksen pesu ennen mittauksia on voinut olla myös puutteellista ja siihen on voinut jäädä rasvaa. On mahdollista, että jossain kohtaa käsittelyä terä on pudonnut pakkaukseen ilman suojapaperia ja siihen on tarttunut rasvaa ja muita epäpuhtauksia silloin.



Kuva 34. Vasemmalla on aiemmin otettu kuva a märkäterästä. Oikeanpuolimmainen kuva b on otettu kuukautta myöhemmin ja märkäterän pintaan on tullut huomattavasti enemmän rakennetta ja epäpuhtauksia.

### 6.3 Terien muodot ja kuluminen

Tutkituista teristä pyyhkäisyelektronimikroskoopilla otetuista kuvista voidaan löytää useita toistuvia rakenteita. Tähän listaukseen ne on nimetty tunnistettavasti, jotta terien kuvailu olisi helpompaa. Kuvassa 35 on esitetty nimetyt rakenteet.



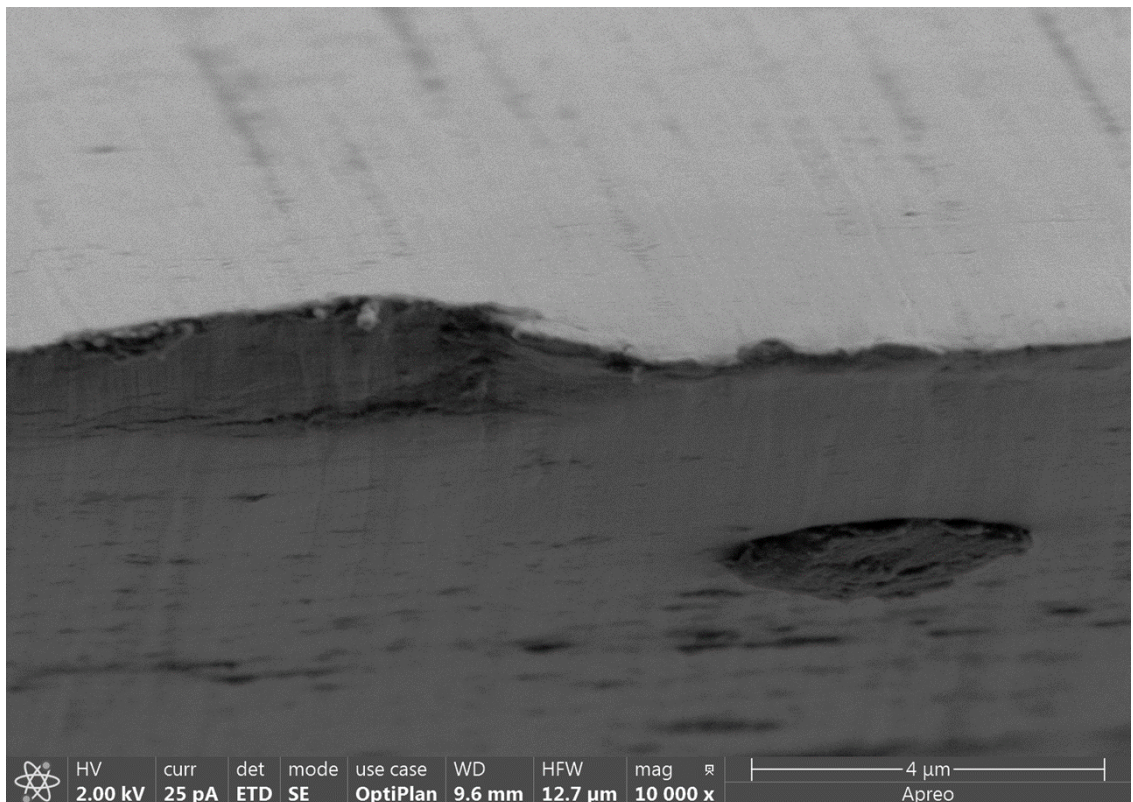
Kuva 35. Erilaiset kuvan elementit eriteltyinä. Sinisessä suorakulmiossa on “lohkeama”, punaisessa soikiossa on “railo” ja keltaisessa ympyrässä on “aalto” jonka alta löytää “ryppyn”. Koko terän alueella kulkee “uurteita”.

“Lohkeamat” ovat kohtia, joista ikään kuin puuttuu palanen. Usein lohkeamien reuna saattaa olla terävä. Mikäli lohkeaman reunat eivät ole terävät voi siinä olla epäpuhtauksia tai lohkeama voi olla tapahtunut aiemmin ja sen reunat ovat alkaneet kulumaan tai pyöristymään.

“Aallot” ovat pehmästi taipuneita kohtia joista voi erottaa taipumisen terän jommalle kummalle puolelle. Aaltojen juurella saattaa esiintyä “ryppyjä”, kuten kankaassa. Ne ilmestyvät usein sille puolelle, jonne aalto on taittumassa terän suuntaisesti. Aallot ovat todennäköisesti lohkeamien esiasteita. On oletettavaa, että terään ilmestyi jotain kulutuksen aiheuttamia merkkejä ennen lohkeamista. Kun otetaan huomioon aaltojen koko, sijainti ja suuntaus terän suhteen, vaikuttaa tämä hypoteesi hyvin mahdolliselta.

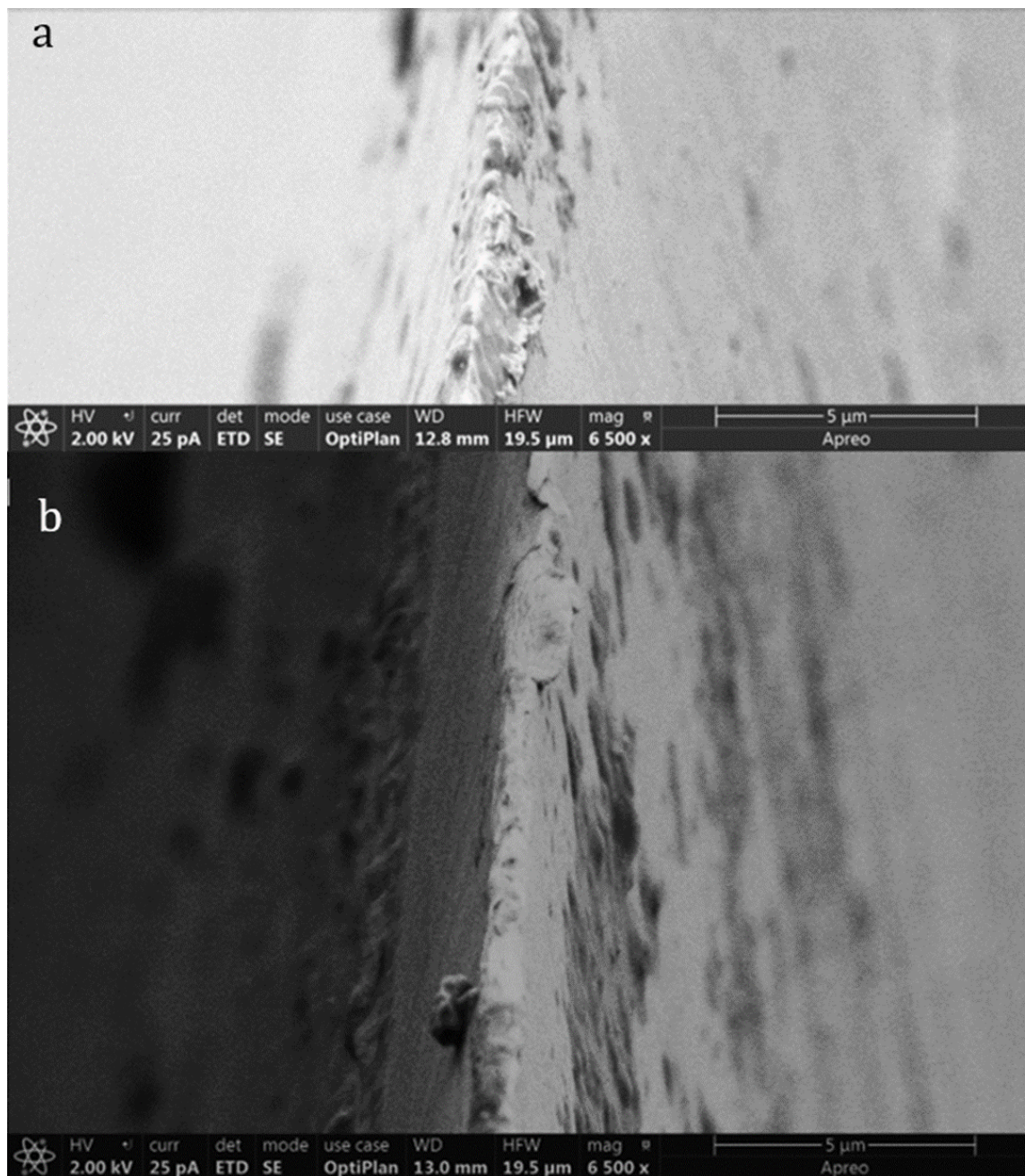
Tiedetään myös, että terät kuluvat pidemmällä aikavälillä taipumalla pyöreästi toiselle sivulle isommassa mittakaavassa [7]. Aaltoja ei tule sekoittaa tähän suurempaan taipumiseen, joka on terien normaali kulumistapa. Pidän kuitenkin aaltoja indikaattorina sille kummalle sivulle terä taipuu ja myös mahdollisena esiasteena taipumiselle. Asia vaatii kuitenkin lisätutkimusta.

“Railot” ovat suunnilleen terän suuntaisesti muodostuneita syvempiä uria. Kuvassa 36 näkyy railo. Railot esiintyvät usein aaltojen yhteydessä, kuitenkin ryppyjä vastaavasti terän toisella puolella. Oletetankin railojen olevan aaltojen vastinpari toisella puolen terää. Nimesin nämä erikseen, jotta suunnat hahmottuvat paremmin. Railoja löytyy myös tietynlaisten piilaikkujen läheisyydestä. Railoja ei pidä sekoittaa “uurteisiin”, jotka ovat koko terän pinnassa kulkevia samansuuntaisia uria, jotka eivät kulje terän suuntaisesti ryhmänä. Uurteet kulkevat ryhmänä samaan suuntaan, mutta voivat olla terän pinnassa miten vain. Ne ovat muodostuneet valmistuksessa tai valmistuksen pintakäsittelyssä. Esimerkiksi kiillotuksessa voisi syntyä uria tai liukuvuutta parantava pinnoite voisi muodostaa myös uria. Railot esiintyvät sattunnaisempina ryhminä lähellä terän reunaa ja muistuttavat enemmän kanjoneita. Niiden muoto ei ole myöskään niin säännöllinen, kuin urien.



Kuva 36. Vasemmalla näkyy iso aalto, jonka alapuolella on railo. Oikealla näkyy myös kaksi pientä aaltoa ja niiden alapuolella epäpuhtaus.

Yleisemmin kuvaan pinnan rakennetta rosoisuuden ja tasaisuuden kautta. Kuvasin terää myös ylhäältä sivusta, saadakseni käsityksen terän kulumisesta kolmiulotteisemmin. Terää tarkasteltaessa havaitaan kuvasta 37 ylemmän verrokkiterän olevan todella rosoisen näköinen. Verrokkiterästä erottuu selkeästi etualalta ryppy ja muita epämuodostumia. Alempana kuvassa (b) olevasta kuivaterästä nähdään yläosasta kaksi selkeää aaltoa sekä koko terän hienoista taipumista. Kuivaterän profiili on myös selkeästi terävämpi syvyysuunnassa, mikä nähdään aivan terän kärjen tummuusvaihtelusta.

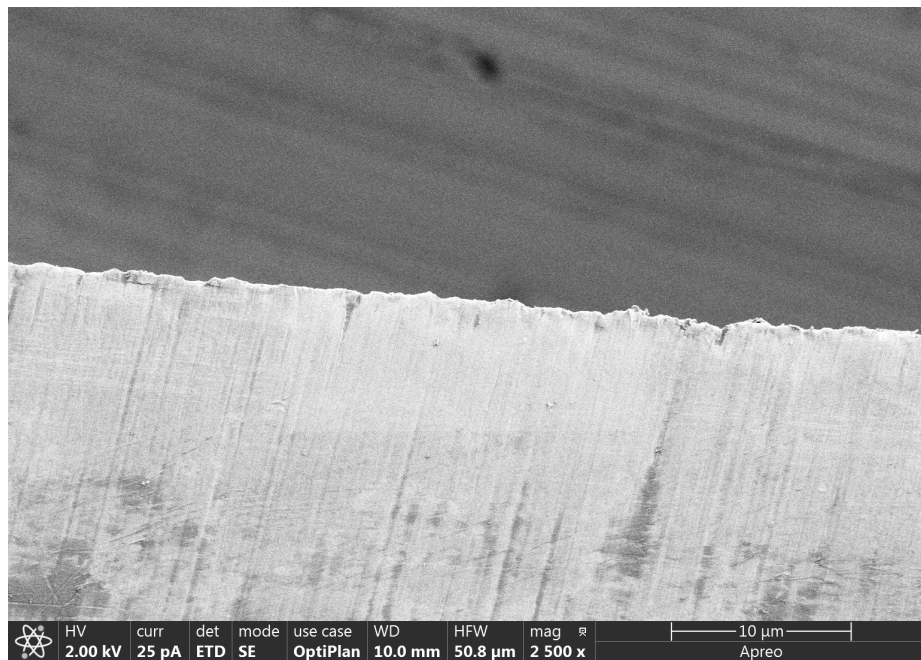


Kuva 37. Ylempänä kuvassa a on verrokkiterän ETD-kuva ja alempana kuvassa b on kuivaterän ETD-kuva. Sivuprofileja vertaamalla voidaan havaita käytön aiheuttama muutos.

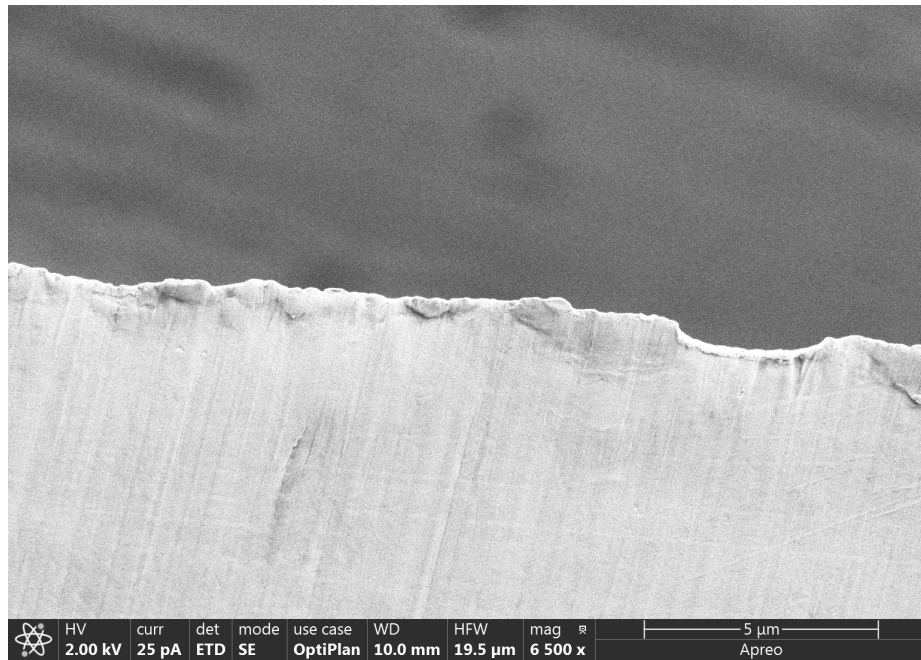
### 6.3.1 Verrokkiterä

Verrokkiterän tyypillinen piirre on pehmeästi rosainen reuna. Kuvassa 38 näkyy hyvin terän sivuprofiili. Havaitsen kuitenkin, ettei terän reunassa ole teräviä lohkeamia ja rosoisuus on pienempää, kuin noin 3  $\mu\text{m}$  levyisen huipun luokkaa. Vielä tarkemmasta kuvasta 39 rosoisuus erottuu paremmin. Alkuolettamustani vastoin huomaan käyttämättömän verrokkiterän olevan varsin epätäydellinen. Jopa kuvan 39 lohkeamassa on aaltoa.

Terän pinta on huomattavan tasainen. Verrokkiterän pinnassa ei ole nähtävissä huomattavan suuria terän suuntaisia uurteita. Terää vastaan kohtisuorassa havaittavat, teroittamisesta ja hiomisesta aiheutuneet, uurteet erottuvat kuitenkin todella selkeästi.



Kuva 38. Verrokkiterän reuna kauempaa esitettynä.



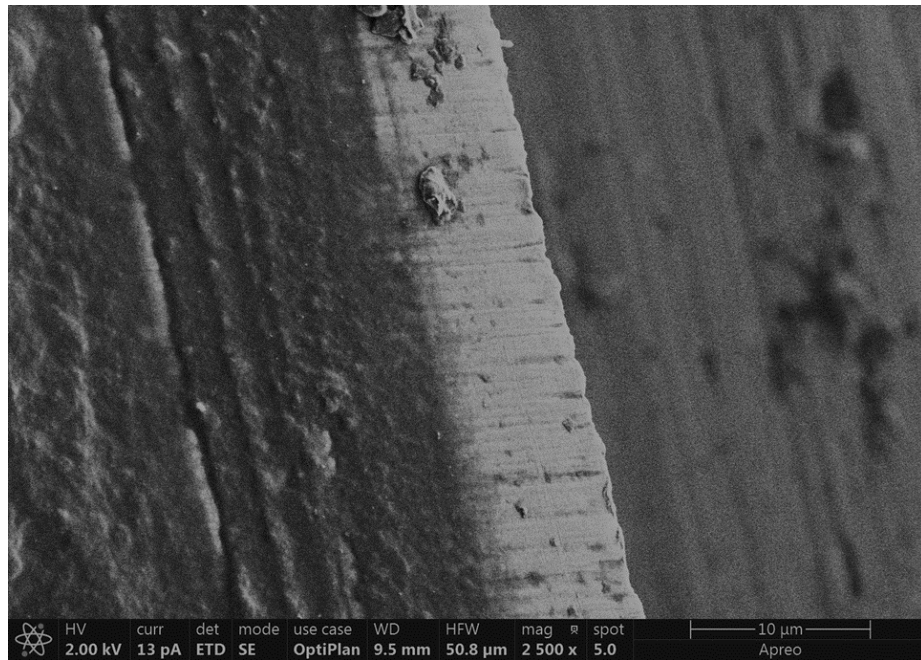
Kuva 39. Verrokkiterä ei näytä läheltä terävältä. Terässä nähdään vasemmalla lohkeama, jossa näkyy aaltoa.

### 6.3.2 Normaaliterä

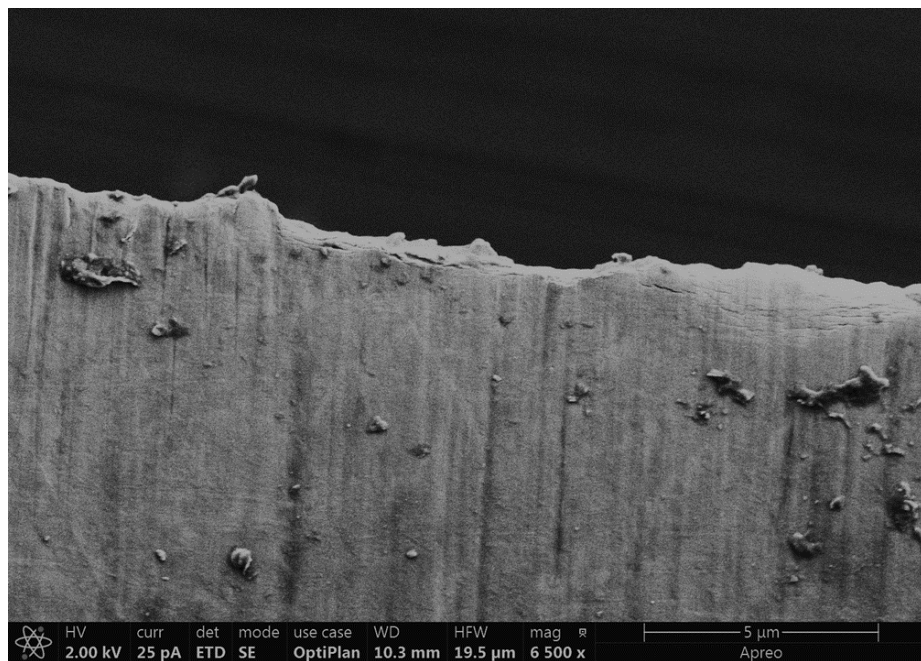
Normaaliterän profiili on tasaisempi kuin verrokkiterän, mutta siinä näkyy selkeää muutosta verrokkiterään nähden. Rosoisuudet ovat tasoittuneet loivilla lohkeamilta ja yleisilme on rauhallisempi, kuten kuvasta 40 huomataan. Terässä näkyy myös paikoitellen suurempia railokohtia. Kuvassa 41 nähdään selvästi loivan profiilin yksityiskohdat. Railot sekä epäpuhtaudet erottuvat hyvin. Kuvassa näkyy myös lohkeamien yhdistyminen keskellä. Kahden lohkeaman välissä oleva huippukohta on kuin alleviivattu tummilla railoilla.

Normaaliterän pinta eroaa verrokkiterän pinnasta. Siinä on nähtävissä suuria uria terän suuntaisesti (kuva 40) ja myös ikään kuin pyyhkäisyjä vinottain kohti reunaa. Normaaliterä on myös selkeästi likaisempi kuin verrokkiterä.





Kuva 40. Normaaliterä näyttää verrokkiterään verrattuna likaisemmalta ja siinä on terän suuntaisia suuria uria.

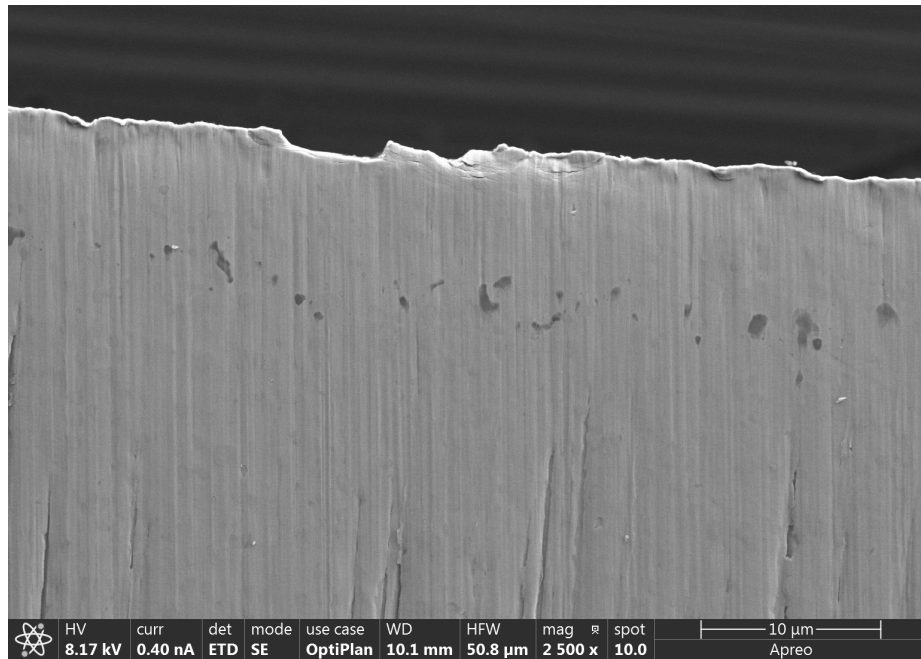


Kuva 41. Normaaliterässä erottuvat hyvin orgaaniset epäpuhtaudet, loivat lohkeamat sekä railot. Terän keskellä näyttäisi näkyvän myös lohkeamien yhdistyminen.

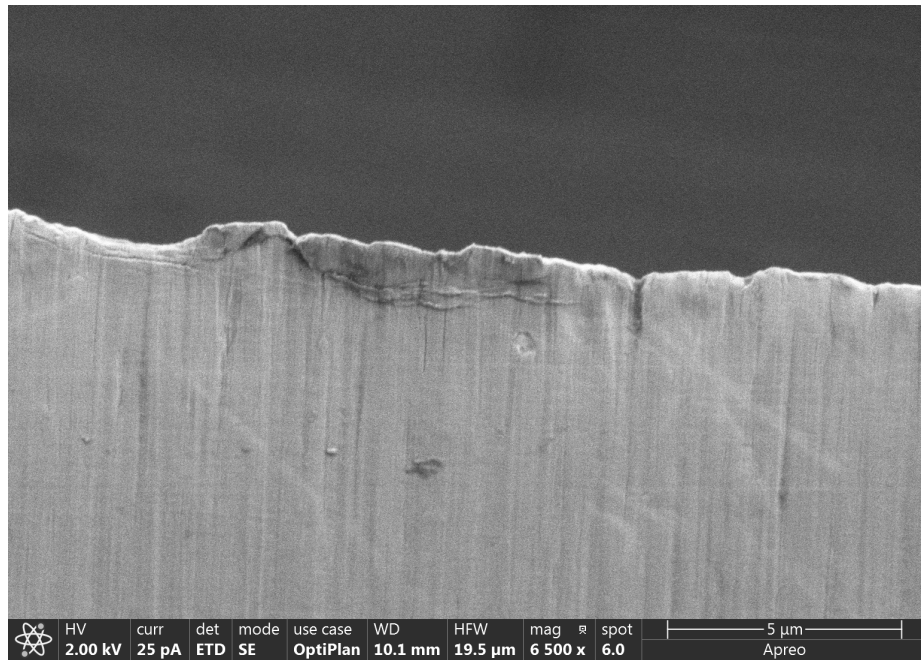
### 6.3.3 Kuivaterä

Kuivaterä on selvästi terävin profiililtaan kuten kuvasta 42 nähdään. Terävässä profiilissa lohkeamat eivät ole vielä kuluneet. Terässä näkyy paljon lohkeamia ja aaltoja verrattuna muihin teriin. Erityisen hieno aalto ja ryppyjä näkyy kuvassa 43. Kuivaterä eroaa muista teristä terän muodon suhteen merkittävästi.

Esimerkkikuvissa kuivaterän pinta näyttää yhtä siistiltä kuin verrokkiterän. Tämä on huomattava ero normaali- ja märkäterään. Kuivaterän pinta ei kuitenkaan ole kovinkaan siisti verrattuna muihin teriin märkäterää lukuun ottamatta, kun verrataan terää laajemmin myöhemmin tutkielmassa kuvassa 46. Tämä saattaa johtua sen käsittelystä mitattaessa ja pidempiaikaisesta säilytyksestä molekyylliseulassa, josta on voinut irrota pintaan partikkeleita. Terän puhdistus ennen laajemman alueen kuvausta on todennäköisesti ollut puutteellista.



Kuva 42. Kuvassa erottuvat kaikki eri tyyppiset kulumat kuivaterässä. Siinä näkyy myös rivi piilaikkuja.

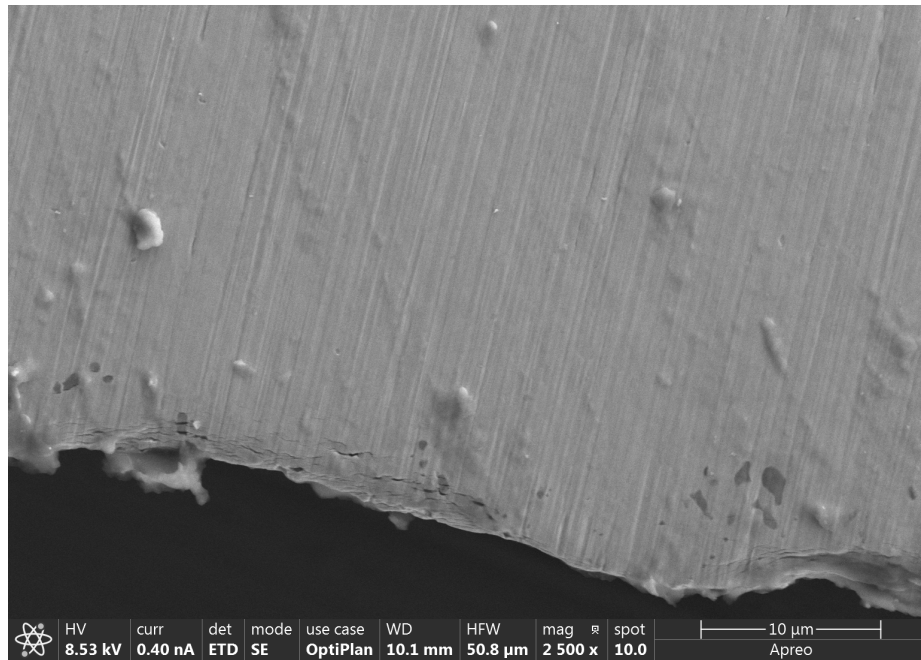


Kuva 43. Tarkemmassa tarkastelussa (eri kohta kuin kuvassa 42) kuivaterästä erottuu hienosti aalto ryppyineen. Myös vieressä vasemmalla näkyy lohkeama, jonka alta voi löytää vielä himmeän railon.

#### 6.3.4 Märkäterä

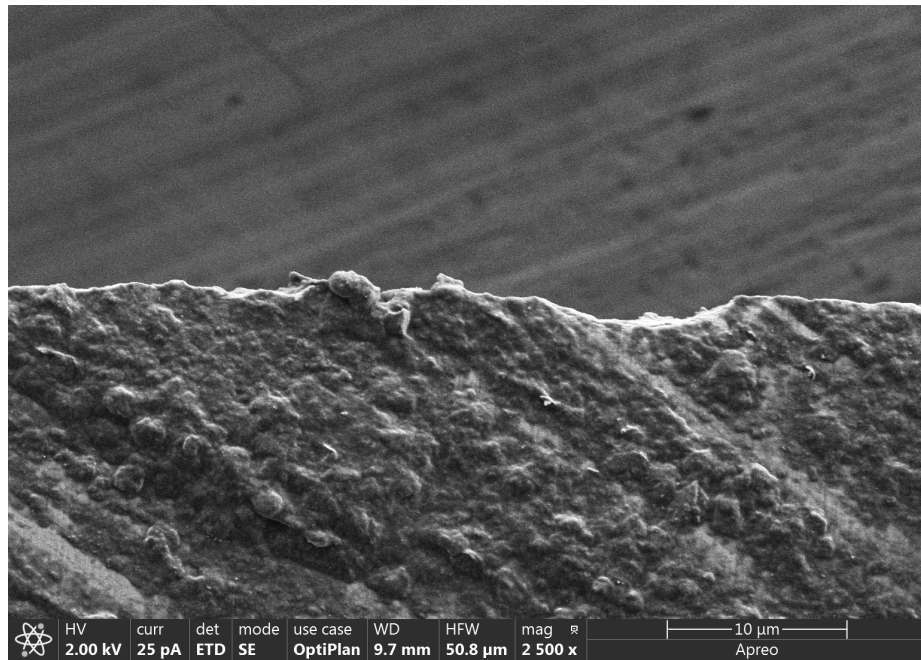
Märkäterän kuluminen on huomattavasti näkyvämpää kuin muiden terien. Terän profiili on pehmeä. Lohkeamat ovat suurempia ja pehmeämpiä reunoiltaan. Terässä voi havaita kymmenien mikrometrien kulumia, jotka voivat olla muodostuneet lohkeaman kulumisesta ja yhdistymisestä toisiin lohkeamiin. Koehenkilön mukaan märkäterän tuntuma muuttui ja se kului nopeimmin teristä.

Märkäterän tunnistaa rosoisesta pintarakenteestaan. Se on huomattavasti karkeamman ja likaisemman näköinen muihin teriin verrattuna, kuten kuvassa 44 on esitetty. Terässä on huomattavasti enemmän rakennetta ja epäpuhtauksia. Tämä on erityisen selvää, kun vertaa märkäterää kuivaterään.



Kuva 44. Märkäterässä muodot ovat todella pehmeät, joka näkyy myös suurina kulumina. Kuvasta erottuvat kaikki kulumatyypit, sekä epäpuhtauksia ja piilaikkuja.

Kun kuvasin yli kuukauden päästä uudelleen muutamasta uudesta mittauskohdasta, oli terä huomattavasti likaisemman näköinen. Tämä voi johtua siitä, että olin kuvannut terän eri puolta, säilytyksessä on käynyt jotain erikoista tai epäonnistuin näytteen käsittelyssä ennen kuvantamista. On myös mahdollista, että terän pintaan kehittyi ruostetta, joka ei EDX-analyysillä ole tunnistettavissa. Sitä ei voida tunnistaa, koska sitä on ohut kerros ja alkuaineet ovat ruosteessa samat kuin muutenkin näytteessä. Kuvassa 45 näkyy edellä kuvattu muutos kuvaan 44 verrattuna.



Kuva 45. Kuvassa on märkäterä kuvattuna uudelleen reilu kuukausi ensimmäisten mittauksien jälkeen. Pinta on aiempaa muhkuraisemman näköinen. Kuvailu pätee kuitenkin muutoin.

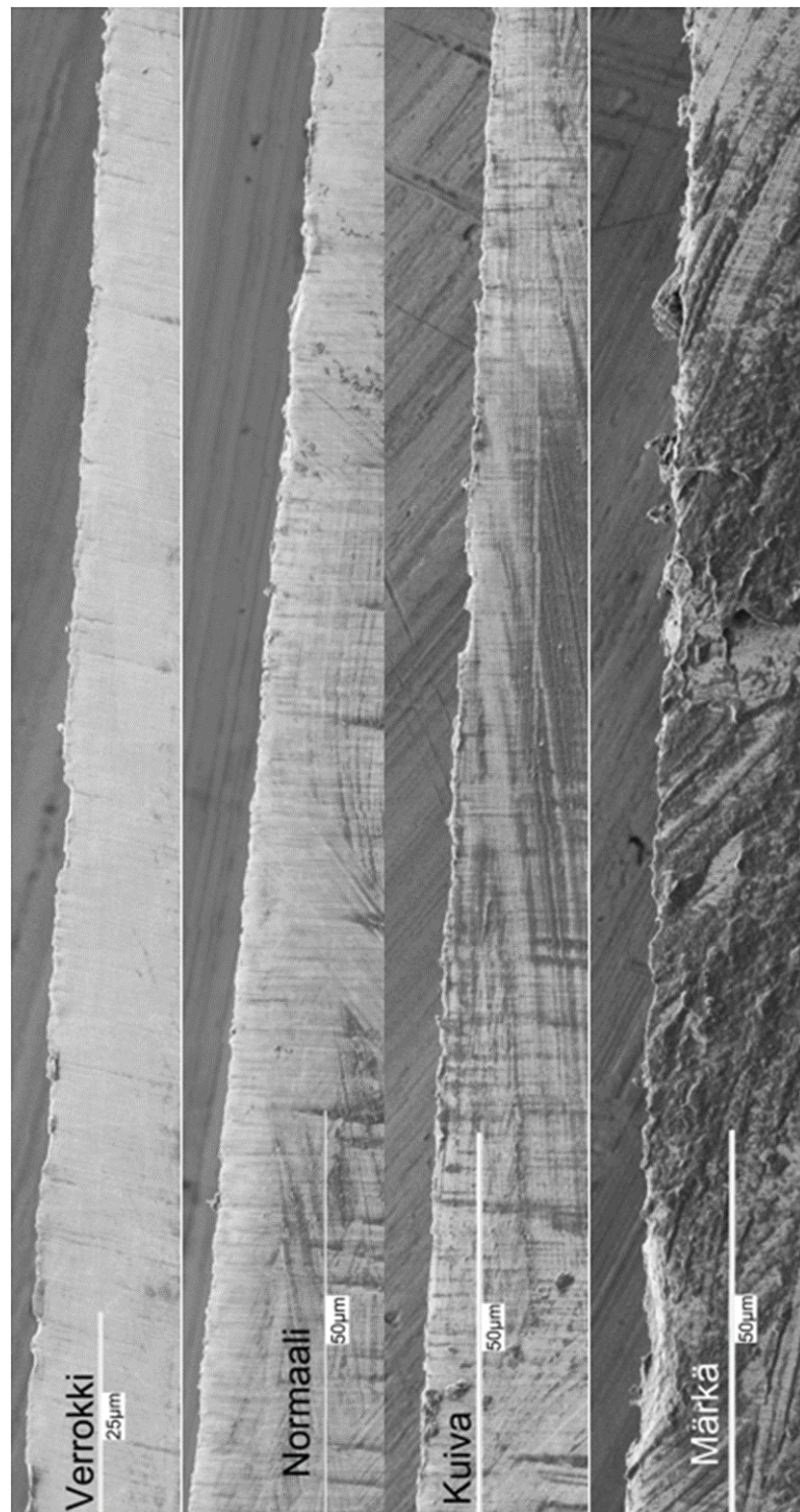
### 6.3.5 Yleisvertailu tylsymisestä

Käytössä terän profiili muuttuu suhteessa verrokkiterään, ja käytetyissä terissä nähdään suurempia kuluneita alueita terän reunassa. Tämä on esitetty kuvassa 46. Kuivassa terässä on selkeästi havaittavissa aalto sekä lähes koko terän kaartuminen toiselle reunalle. Yleisin metodi tylsymiselle ovat aallot, jotka johtavat paikallisesti terästä lohkeaviin palasiin. Lohkeaviin palasiin viitattiin artikkelissa "How hair deforms steel" [7].

Terien profileissa havaitaan selkeä muutos, kun verrataan verrokkiterää muihin, joissa terän pinta on aivan eri luokkaa. Terät ovat huomattavasti epätasaisempia ja muuttuneita. Pinnan rakenne vaihtelee terissä myös huomattavasti. Yksi merkittävä syy terän tylsymiselle voi olla terän pintaan kiinnittyvä ihon rasva, karvan palaset sekä partavaahto, jotka eivät lähde huuhtelemalla. Arvelen, että ne estävät karvojen liukumisen terää pitkin niiden leikkaantuessa. varmistin tämän puhdistamalla

normaalikäytössä olleen terän varovasti etanolilla ja palauttamalla se koehenkilölle, joka arvioi terävyyden parantuneen. Asiaa tulisi kuitenkin tutkia tarkemmin asian todentamiseksi.

Joidenkin käyttäjien mielestä partaterä on parhaimmillaan parin käytön jälkeen. Tämä voisi selittyä profilin terävöitymisestä käytössä. Ajan kanssa terän pintaan tulee enemmän rakennetta sekä suuria lohkeamia, jotka tekevät terästä tylsän. Väitety käyttäjien kokemus terävimmästä terästä ensimmäisen käytön jälkeen vaatisi lisää tutkimusta.



Kuva 46. Kuvassa on vertailtuna eri terien yleisprofileja. Koko kuvassa näkyvä terän leveys olisi hieman reilu partakarvan halkaisija.

## 7 Yhteenveto

Tylsyminen on ilmiö, jota tunnetaan yllättävän vähän. Partaterän suhteen erikoista on miten 50-kertaa pehmeämpi partakarva voi tylsyttaa ruostumattomasta teräksestä valmistettua partaterää [7]. Elokuussa 2020 julkaistussa artikkelissa [7] tutkittiin karvojen aiheuttamaa partaterän tylsymistä. Artikkelissa loppupäätelmänä oli, että tylsyminen aiheutuu lohkeamien irtoamisesta. Lohkeamat aiheutuvat railoista. Tämä on yhteneväistä tulosteni kanssa. Artikkelin mukaan kolme asiaa vaikuttaa terän tylsymiseen: leikkauskulma, terän mikrorakenteen tasajakoisuus sekä valmistuksen hionnassa syntyneet mikrosäröt aivan terän reunaan, noin  $5 \mu\text{m}$  alueelle. Nyt artikkelin pohjalta tiedetään, että terän reunan rakenne tulisi saada homogeeniseksi esimerkiksi nanorakenteisten seosten avulla. Näin terä pysyisi terävänä pidempään, sillä yksittäinen partakarva voi aiheuttaa lohkeaman terän molempiin reunoihin. Pitää kuitenkin muistaa, ettei lohkeaminen ole tavallista. Karvoja on kuitenkin paljon ja terät kestävät useamman käyttökerran. Lohkeamista tapahtuu vain, kun tietyt ehdot täyttyvät samanaikaisesti. Karvan täytyy taipua tarpeeksi, terän mikrorakenteen ja leikattavan mikrorakenteen pitää olla tarpeeksi eroavat sekä karvan ulomman kohdan pitää olla railon kohdalla heikommalla puolella. Lohkeaman muoto riippuu kriittisen kulman suuruudesta, joka kuvaa kulmaa, jossa partaa ajetaan. Suuri kriittinen kulma johtaa kapeisiin sekä mataliin lohkeamiin ja pieni kriittinen kulma johtaa leveämpiin sekä syvempiin lohkeamiin. [7]

Aiemmin ajateltiin terän tylsymisen johtuvan reunan pyöristymisestä sekä päällysteen säröilemisestä. Nämä peruskulumismenetelmät eivät kuitenkaan riitä selittämään terän nopeaa kulumista, sillä ne eivät ota huomioon leikkaustilanteen rakenteellista monitahoista luonnetta tai tilanteessa tapahtuvaa yhtäaikaista kulumista. [7] Aallot kuitenkin ovat pyöristymistä pienessä mittakaavassa ja sen mahdollisia esiasteita. Tutkielmani pohjalta vaikuttaisi, että yksittäiset aallot yhdistyvät toisiin, mikä saattaisi saada aikaan terän laajempaa pyöristymistä. Tämä vaatisi kuitenkin



jatkotutkimuksia.

Terän tylsytymiseen vaikuttavat yleisesti materiaalit(terä, leikattava asia ja alusta), leikkuukulma sekä leikkuutapa. Artikkeleihin [7] nähden tämä tutkielma toi lisää informaatiota: itse teristä laajemmalla alueella sekä pinnasta SEMillä tarkasteltuna, alkuaineiden jakautumisesta terässä sekä säilytyksen vaikutuksesta terään. Alkuainetarkastelu paljasti terän heterogeenisuuden materiaalin osalta, jota artikkelissa [7] ei tutkittu. Erityisesti pitää mainita piilaikut murtumien läheisyydessä. Säilytystapa vaikutti merkittävästi terän pintaan. Itse terän laatukin vaihteli säilytyksen mukaan. Tietenkin on huomioitava mittaustavan jälkiperäisyys ja sattuman vaikutus näin kompleksisessa mittauksessa.

Terän tylsistymistä on vaikea päätellä pelkästään terän ulkonäöstä ilman lähempää tarkastelua. Käytännössä on olemassa monia tapoja testata terän tylsytymistä, mutta tieteellisesti luotettavan testaustavan kehittäminen on moninainen ongelma. Arjen käytännön testeissä terää pitkin kuljetetaan kynttä. Kynsitetesti ei kerro kuitenkaan yleisesti vertailukelpoisia tuloksia tai anna edes terän tylsyydestä tietoa kuin selkeästi tylsyneistä suuremmista veitsistä. Partaterään kynnellä tehtävä testi ei toiminut, sillä kaikki teristä upposivat kynteen sulavasti eikä rosoisuutta tuntenut. Keittiöveitsiin metodi on kuitenkin toimiva. Käytännössä kuitenkin jokainen tietää millainen on terävä terä ja siihen siksi onkin muodostunut erilaisia arjen näkemyksiä. On kehitetty myös vertailukelpoisempia tapoja tutkia terävyyttä, kuten leikkaaminen haastaviin kimmoisiin materiaaleihin, esimerkiksi märkään paperiin [4, 10]. Tavat eivät kuitenkaan ole saavuttaneet standardin asemaa [4]. On silti tärkeää ymmärtää prosessia paremmin. Tylsytymisen aiheuttavien tekijöiden tunnistaminen on välttämätöntä, jotta saadaan aikaiseksi pidempään terävänä pysyviä teriä.

Mittausten pohjalta vaikuttaa, että partaterän käyttöön pidentämiseksi kuluttaja itse voi

1. säilyttää terää kuivassa

2. muistaa käsitellä terää varoen ja sitä suojaten
3. puhdistaa terän esimerkiksi etanolilla tai asetonilla

Klassisten yksiteräisten partaterien säästeliäs ja kierrätettävä luonne yhdistettynä niiden käyttöään pidentämiseen edellä mainituin keinoin ovat linjassa järkevän kuluttamisen ja tuhlailemattoman luonnonvarojen käytön kanssa.

## Viitteet

- [1] J. D. Verhoeven, A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy, (Vierailtu 1.9.2004).
- [2] J. Karlton, K. Vogel, M. Bergstrand ja J. Eklund, Applied Ergonomics **56**, 92 (2016).
- [3] R. W. McGorry, P. C. Dowd ja P. G. Dempsey, Applied Ergonomics **34**, 375 (2003).
- [4] C. McCarthy, M. Hussey ja M. Gilchrist, Engineering Fracture Mechanics **74**, 2205 (2007).
- [5] R. Picker, University of Chicago Law Review **78**, (2010).
- [6] Safety razor history, Gillette, <https://gillette.com/en-us/shaving-tips/how-to-shave/safety-razor>, (Vierailtu 31.1.2021).
- [7] G. Roscioli, S. M. Taheri-Mousavi ja C. C. Tasan, Science **369**, 689 (2020).
- [8] About Us, Astra, <http://astrarazorblades.com/aboutus.php>, (Vierailtu 1.8.2020).
- [9] M. L. The Gillette Company: Xu, RAZOR BLADE STEEL United States Patent Application 20160361828, , <https://www.freepatentsonline.com/y2016/0361828.html>, (Julkaistu 15.12.2016).
- [10] How It's Made - Traditional Razor Blades, How it's made, [https://www.youtube.com/watch?v=1-rg4D8QJ48&ab\\_channel=HowIt%27sMadeShow](https://www.youtube.com/watch?v=1-rg4D8QJ48&ab_channel=HowIt%27sMadeShow), (Vierailtu 29.12.2021).
- [11] A. Ul-Hamid, *A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy* (PUBLISHER, 2018).
- [12] J. I. Goldstein *et al.*, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (Springer, 2018), s. VII – XIV.
- [13] What is Casino?, Sherbrooken Yliopisto, <https://www.gel.usherbrooke.ca/casino/What.html>, (Vierailtu 13.4.2020).
- [14] D. E. Newbury ja R. L. Myklebust, Ultramicroscopy **2**, 391 (1979).
- [15] L. Reimer *et al.*, *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*, *Springer Series in Optical Sciences* (Springer, 1998).
- [16] N. Erdman, D. C. Bell ja R. Reichelt, *Handbook of Microscopy* (PUBLISHER, 2019), Luku 5. Scannin, s. 229–318.

- [17] Datasheet - Apreo 2 SEM, ThermoFisher Scientific, <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Datasheets/Apreo-SEM-Datasheet.pdf>, (Vierailtu 5.5.2020).
- [18] Aineen mikro- ja nanorakenteen kuvantamismenetelmät, Lectures in University of Turku.
- [19] Apreo SEM Datasheet, Thermofisher Scientific, <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Datasheets/Apreo-SEM-Datasheet.pdf>, (Vierailtu 29.1.2021).
- [20] Electron Microscope Filaments / Cathodes Overview, Ted Pella Inc., [ElectronMicroscopeFilaments/CathodesOverview](https://www.tedpella.com/ElectronMicroscopeFilaments/CathodesOverview), (Vierailtu 20.4.2020).
- [21] MyScope - Electron column, Microscopy Australia, <https://myscope.training/legacy/tem/background/whatistem/column.php>, (Vierailtu 19.12.2021).
- [22] Pinhole Lens as Objective Lens in SEMs - Practical Electron Microscopy and Database - An Online Book, Yougui Liao, <https://www.globalsino.com/EM/page3597.html>, (Vierailtu 21.5.2020).
- [23] A. Khurseed, *Scanning Electron Microscope Optics and Spectrometers* (World Scientific, 2011), Luku 1. Convent, s. 402.
- [24] S. Wischnitzer, in *Introduction to Electron Microscopy: Edition 2*, editointi S. B. T. I. t. E. M. S. E. WISCHNITZER (Pergamon, 1970), s. 340.
- [25] Components in a SEM, Nanoscience Instruments, <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/components>, (Vierailtu 11.5.2021).
- [26] N. Brodusch, H. Demers ja R. Gauvin, *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (PUBLISHER, 2018), s. 1–137.
- [27] Pyyhkäisyelektronimikroskoopi SEM (+EDS/WDS/EBSD), TOPANALYTICA, [https://www.topanalytica.com/Elektronimikroskopia-\(SEM-EDS/WDS/EBSD\)#WDS](https://www.topanalytica.com/Elektronimikroskopia-(SEM-EDS/WDS/EBSD)#WDS), (Vierailtu 21.5.2020).
- [28] Apreo 2 SEM - Brochure, ThermoFisher Scientific, <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/brochures/apreo-2-sem-brochure-br0120.pdf>, (Vierailtu 19.12.2020).
- [29] A. Gucsik *et al.*, *Meteoritics and Planetary Science* **38**, 1187 (2003).
- [30] MAOL-taulukot, 2019 - 2019.
- [31] Stainless chromium steel for razor blades, Sandvik, [https://www.materials.sandvik/globalassets/global/downloads/products\\_downloads/strip-steel-and-strip-based-products/razor-blade-steels-3332-eng-021210.pdf](https://www.materials.sandvik/globalassets/global/downloads/products_downloads/strip-steel-and-strip-based-products/razor-blade-steels-3332-eng-021210.pdf), (Vierailtu 28.1.2021).