

Mikko Järvi

# Anturielementtikiekon paikan vaikutus syväkui- vaetsauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Materiaali- ja pinnoitetekniikka

Insinöörityö

24.5.2018

Tekijä Otsikko	Mikko Järvi Anturielementtikiekon paikan vaikutus syväkuivaetsauksessa
Sivumäärä Aika	40 sivua + 5 liitettä 24.5.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	Materiaali- ja pinnoitetekniikka
Ohjaajat	Yliopettaja Kai Laitinen Prosessikontrolliesimies Kimmo Haring
<p>Insinööriyö käsittelee anturielementtikiekon keskitystä syväkuivaetsauskammiossa. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten kiekon paikoitus vaikuttaa etsaukseen etsausalustalla. Tutkimus tehtiin Murata Electronics Oy:lle. Yritys valmistaa piipohjaisia mikromeekaanisia (MEMS) antureita muun muassa autoihin, terveysteknologiaan ja teollisuuteen. Tutkimuksen kohteina olivat neljä kuivasyövytyskammionalustaa, joita käytetään tuotannossa päivittäin. Syväetsauskammioista otettiin tutkimusvertailuun vanhemmat laitemallit, joita on käytetty tuotannossa pitkään, ja uusimmat laitteet, jotka on valmistettu viime vuosina.</p> <p>Kuivasyövytyslaitteella DRIE:llä (Deep Reactive Ion Etch) syövytetään pääosin piitä, mutta tässä tutkimuksessa käytettiin piikiekon lisäksi oksidoituja piikiekkkoja, joista mitattiin oksidinpaksuuksia ennen ja jälkeen syövytyksen. Tutkimuksien mittalaitteina käytettiin ellipsometriä kalvonpaksuusmittauksiin, optista profilometriä syvyysmittauksiin, viivanleveysmittauslaitetta kehitetyn ja syövytetyn kuvioinnin mittauksiin sekä pyyhkäisyelektronimikroskooppia (SEM) poikkileikkauskuvien analysointiin. Edellä mainituista mittalaitteista pelkästään SEM oli manuaalinen, muiden laitteiden säädetyt ohjelmat mittasivat automatisoidusti tutkimustulokset analysoitaviksi.</p> <p>Tutkimuksessa käytettiin kahta eri kiekkotyyppiä, oksidoitua kiekkoa sekä kuviointiekkoa. Kuviointiekko valmistettiin litografisin menetelmin ennen syövytyskokeita. Kiekkojen keskityskokeissa otettiin huomioon eri syövytysalustatyypien mitat ja päätettiin kiekon keskityskokeiden paikoitukset syövytysalustalla. Tutkimuksessa keskityttiin pelkästään paikoituksen muutoksiin vaakasuunnassa syövytysalustalla. Oksidiekon tehtävänä oli määrittää tutkimuksessa syövytysalustan keskityksen epäsymmetriaa, jossa oksidin kulutuksen erot vaikuttavat eri puolella kiekkoa paikoituksen muutoksessa. Epäsymmetrialla tarkoitetaan kiekon syövytyksen aikana kuluneen oksidin määrän vaihtelua kiekon vasemman ja oikean puolen välillä. Kuviointiekkoilla keskityttiin keskityksen muutoksen keskusta ja ääripäihin, jotta saatiin tietoa syövytetyn kuvioinnin mahdollisista profiilimuutoksista ja syvyyksistä.</p>	
Avainsanat	Anturi, piikieppo, oksidiekko, kuviointiekko, DRIE, SEM

Author Title Number of Pages Date	Mikko Järvi Effect of the positioning of the sensor element wafer in deep reactive-ion etching 40 pages + 5 appendices 24 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major	Materials Technology and Surface Engineering
Instructors	Kai Laitinen, Principal Lecture Kimmo Haring, Process Control Manager
<p>The subject of this Bachelor's thesis of engineering was sensor element wafer alignment in dry etcher chamber chuck. The purpose of this thesis project was to study how wafer alignment affects etching on chuck. The project was done for Murata Electronics Oy. Company manufactures silicon based micro electrical mechanical sensors (also known as MEMS) for cars, health technology and industry. Sensors that are manufactured for silicon wafer are sum of many processes, and thousands of sensors fit on one wafer and end up to car systems around the world. The subject of the project was four dry etcher chamber chucks that are used in production daily. A comparison study was made between old models and the newest and most developed dry etcher chamber chucks.</p> <p>DRIE etchers (Deep Reactive Ion Etch) are mainly used to etch silicon, but in this project, they were used to etch silicon wafers and also oxide wafers, from which the thickness of deposited oxide was measured before and after etching. The measuring method for research were reflectometry for oxide film thickness measurements, optical profilometry for depth measurements; critical dimension (CD) equipment line width measurements for developed and etched patterns and scanning electron microscopy (SEM) for cross section figure analysis. Out of the above-mentioned measurement tools, only SEM is operated manually; other devices' programs measured automatically the research results for the analysis.</p> <p>There were used two types of wafer, oxide wafer and oxide pattern wafer. Pattern wafer was manufactured by lithographical methods before etching study. In a wafer alignment experiment, attention was paid to different chamber chuck, and a decision was made on wafer positioning on the chamber chuck. The project focused mainly on horizontal position change on the etcher's chuck. The purpose of oxide wafers in the experiments was to help in defining asymmetry in alignment tests, where differences in oxide thickness affect other sides of the wafer in alignment changes. Asymmetry is referred to as oxide consumption difference in etching between the left and right side of the wafer, because in changing the positioning oxide film consumption is never ideally symmetrical. In pattern wafers the focus was on centering change at the center and edges of the chuck to get information on an etched structure's profile variation, angle, width and depth.</p>	
Keywords	MEMS, DRIE.

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Anturielementtien valmistus	2
2.1	Piikiekon prosessivaiheet	3
2.2	Anturielementtikiekon prosessivaiheet	6
2.2.1	Optinen litografia	7
2.2.2	Syövytys	9
2.2.3	Kuivasyövytys plasmalla	10
3	Testipiikiekkojen määrittäminen ja valmistus	13
4	Mittauslaitteistot	14
4.1	Oksidinpaksuusmittauslaite ja mittausmenetelmä	14
4.2	Optinen profilometrilaitte ja mittausmenetelmä	16
4.3	Pyyhkäisyelektronimikroskooppimittaus	17
5	Kiekon keskityksen analysointi	19
5.1	Reaktiivisen ionisyyttä- ja laitteiston robottikäden toiminta ja säätö	19
5.2	Kiekkojen paikoitukset mittauksessa	21
5.3	Oksidinpaksuusmittaustulokset	26
5.4	Viivanleveysmittaustulokset	31
5.5	Profiilisyvyysmittaukset elementeiltä	33
5.6	Kampanakenteen profiilivariaatio- ja kammankulma-astetulokset	36
6	Eri mittausmenetelmien vertailu	38
7	Kokeiden suorituksen tarkastelua	39
8	Johtopäätökset	40
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. Syövytetyn oksidin kulutustulokset	
	Liite 2 Viivanleveysmittaustulokset	
	Liite 3 Optisen profilometrin syvyysmittaustulokset	

Liite 4 Profiilivariaatio ja rakenteen kulma-aste pyyhkäisyelektronimikroskooppimittaus-  
tulokset

Liite 5 Pyyhkäisyelektronimikroskooppi ja optisen profilometrin mittaustuloksien vertailu

## Lyhenteet

CD	Critical Dimension, kuvioinnin viivanleveysmittaus.
DRIE	Deep Reactive-Ion Etching. Reaktiivinen ionisyväetsaus.
MEMS	Micro Electrical Mechanical System (suomeksi mikrosysteemit). Komponentti, missä yhdistyy mekaaninen toiminta, joka muutetaan sähköiseksi signaaliksi. Yksityiskohdat ovat mikrometrin kokoluokkaa.
MFI	Murata Electronics Oy Finland. Suomessa Vantaan Martinlaaksossa sijaitseva anturitehdas.
SEM	Scanning Electron Microscope, pyyhkäisyelektronimikroskooppi.
SEMI	Semiconductor Equipments and Materials International, globaali mikro- ja nanoeletroniikkateollisuusjärjestö.
VTI	Vaisala Technologies Instruments Oy, yrityksen alkuperäinen nimi, Vaisalan konserniin kuuluva piianturiyritys, perustettu vuonna 1991

## 1 Johdanto

Vantaan Martinlaaksossa sijaitseva Murata Electronics on teknologiayritys, joka valmistaa piipohjaisia antureita moniin eri sovelluksiin ja käyttötarkoituksiin kuten liikenteeseen, terveysteknologiaan, kaivosteollisuuteen ja maatalouteen. Murata Electronics on osa japanilaista Murata Manufacturing -konsernia, joka on maailman johtava keraamipohjaisia elektroniikkakomponentteja valmistava yritys. Murata-konsernin pääkonttori sijaitsee Japanin Kiotossa [1]. Maailmanlaajuisesti konsernissa työskentelee yli 60 000 työntekijää, joista Suomessa yli 900 [2]. Murata Electronics yrityksen nimi oli alun perin VTI Technologies, joka perustettiin Vaisalan -konserniin vuonna 1991. Murata osti VTI:n vuonna 2012 ja yrityksen uudeksi nimeksi tuli nykyinen Murata Electronics [3].

Yrityksen mainosnimessä kuvassa 1 oleva englanninkielinen motto: "Innovator in Electronics" (suomeksi: uudistaja elektroniikassa) kuvastaa jatkuvaa tuotekehityskeskeisyyttä. Halu kehittää uusia innovatiivisia tuotteita sekä parantaa ihmisten turvallisuutta ja terveyttä ovat tavoitteita, joihin Murata Electronics haluaa panostaa.



Kuva 1. Murata -logo [4].

Murata Electronicsin anturit pohjautuvat 3D MEMS (mikroelektro-mekaaninen järjestelmä) -teknologiaan. Anturit mittaavat liikkeen kiihtyvyyttä, kiihtyvyyttä, kiihtyvyyttä ja kulmanopeuksia. Murata Electronicsin suurimmat vientituotteet maailmanlaajuisesti ovat autoihin sekä sydämentahdistimiin valmistetut anturit. Tuotannosta 99 % menee vientiin [2]. Anturi on yksi osa komponenttia, ja sen yksityiskohdat ovat kokonsa puolesta mikro- tai jopa nanometrien luokkaa. Kokonaisuudessaan yhden anturin koko on muutamia millimetrejä. Anturin tehtävä auton ajonvakautusjärjestelmässä

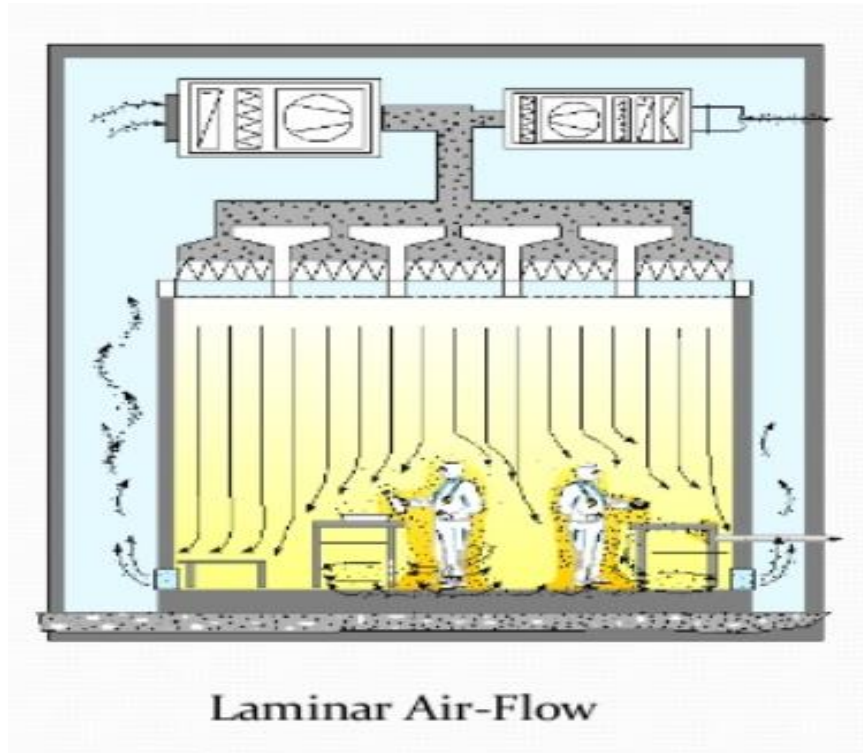
on lähettää signaaleja liikkeenmuutoksista, joita seuraamalla voidaan antaa komen-  
toja ohjausjärjestelmälle, jonka avulla auto saadaan pidettyä paremmin hallinnassa.

Tässä insinööripäättötyössä on aiheena kuivaetsauskammioiden anturielementtikie-  
kon keskityksen vaikutus syövytysalustalla. Keskityksellä on vaikutusta antureiden  
sähköisiin ominaisuuksiin. Oletettavasti elementtikiekon rakenteiden profiilit ja sy-  
vyudet muuttuvat kiekon keskityksen muuttuessa etsauskammiossa ja tätä lähdettiin  
tutkimaan tässä työssä. Keskityskokeisiin valittiin kahden tyyppisiä piikiekkoja, oksii-  
doituja piikiekkoja sekä oksidikuvioituja piikiekkoja. Eri piikiekkotyypeille tehtiin sa-  
manlaiset syövytykset, mutta mittaukset poikkesivat toisistaan selvästi. Plasmaet-  
saukukset sekä mittaukset on tehty Vantaan Martinlaaksossa Murata Electronicsin  
puhdastilassa.

## **2 Anturielementtien valmistus**

Anturi valmistetaan piistä. Pii on harmahtava puolimetalli, joka on yleisin materiaali  
puolijohdeteollisuudessa [5]. Alkuaineena pii on maakuoren toiseksi yleisin ja sen  
kemiallinen merkki on Si [6]. Piipohjaisten kiekkojen iso volyymi puolijohdeteollisuu-  
dessa selittyy sillä, että piin sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet tunnetaan ja  
ymmärretään hyvin. Prosessointimenetelmät ovat ajan saatossa kehittyneet erityi-  
sesti piin osalta hyvin pitkälle, koska niihin on vuosikymmenien ajan panostettu  
maailmanlaajuisesti suuri määrä tutkimusta. Taloudellisesti yksikiteisen piikiekon  
valmistus on halpaa [7].

Puhtaus on tärkein ominaisuus piikiekossa [8], minkä takia piikiekot sekä niistä val-  
mistetut mikroelektromekaaniset anturielementit valmistetaan tarkoin määritellyissä  
puhdastiloissa, joissa kontrolloidaan ilmasta partikkeleita, lämpötilaa sekä kosteutta.  
Kuvassa 2 nähdään, kuinka puhdistilailmankierto toimii. Ilma tulee suodattimien läpi  
katosta ja kulkeutuu lattian kautta uudelleen kierrätykseen. Tila on ylipaineistettu,  
jolla halutaan minimoida partikkeleiden sisäänpääsy puhdistilaan. Ilmasta mitataan  
partikkeleita säännöllisesti ja tietyille puhdistilaluokalle sallitut partikkelimäärät on  
määritelty taulukossa 1 esitetyllä tavalla ISO-146441-1-standardissa.



Kuva 2. Laminaarivirtaus puhdistilassa

Taulukko 1. Ilman hiukkaspuhtauden ISO-luokat

ISO-luokan numero (N)	Suurimmat hiukkaspitoisuudet (hiukkasia/m <sup>3</sup> ) hiukkasille, jotka ovat yhtä suuria tai suurempia kuin alla esitetyt koot <sup>a</sup>					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
1	10 <sup>b</sup>	d	d	d	d	e
2	100	24 <sup>b</sup>	10 <sup>b</sup>	d	d	e
3	1 000	237	102	35 <sup>b</sup>	d	e
4	10 000	2 370	1 020	352	83 <sup>b</sup>	e
5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	d, e, f
6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7	c	c	c	352 000	83 200	2 930
8	c	c	c	3 520 000	832 000	29 300
9 <sup>g</sup>	c	c	c	35 200 000	8 320 000	293 000

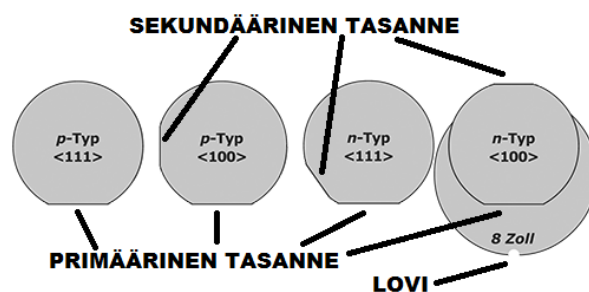
## 2.1 Piikiekon prosessivaiheet

Kvartsihiekasta puhdistamalla saadaan piikiekon raaka-aineeksi monikiteinen polypii. Sulasta polypiistä kasvatetaan kiteenkasvatusuunissa sylinterimäinen erilliskide eli piitanko. [8.] Piitanko muodostuu, kun siemenkidettä pyöritetään hitaasti ja vedetään sitä samalla ylöspäin sulasta piiseoksesta [9]. Piikiekot ovat pyöreitä ja ne val-

mistetaan sahaamalla timanttiterällä piitangosta. Kiekkojen paksuudet ovat teknologiakohtaisia, ja siksi niistä käytetään yleisesti standardoimattomia paksuuksia. [10.] Taulukossa 2 näytetään puolijohdeteollisuuden kansainväliset standardimitat kiekkoalkaisijoille.

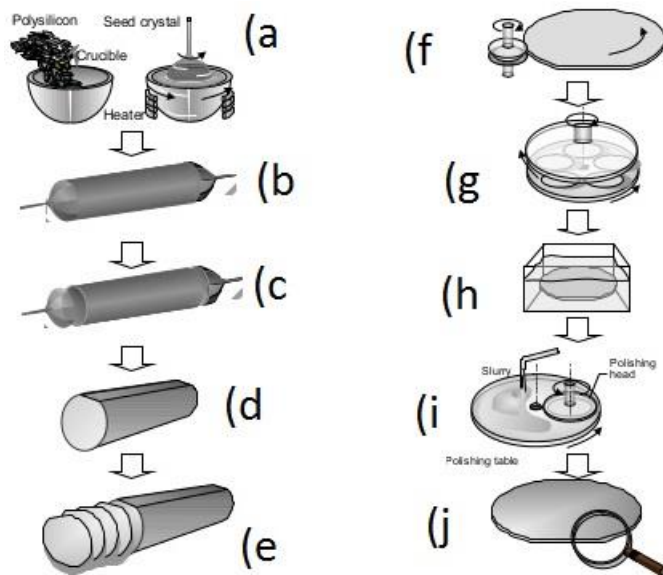
Taulukko 2. SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) standardimitat [11].

Nimellishalkaisija	100mm	125mm	150mm	200mm	300mm
Halkaisija	100+/- .5 mm	125+/- .5 mm	150+/- .2 mm	200+/- .2 mm	300+/- .2 mm
Paksuus	525+/- 20 $\mu$ m	625+/- 20 $\mu$ m	675+/- 20 $\mu$ m	725+/- 20 $\mu$ m	775+/- 20 $\mu$ m
	tai		tai		
	625+/- 20 $\mu$ m		625+/- 15 $\mu$ m		
Päätasanteen pituus	32.5+/- 2.5 mm	42.5+/- 2.5 mm	57.5+/- 2.5 mm	lovi	lovi
Sekundäärisen tasanteen pituus	18.0+/- 2.0 mm	27.5+/- 2.5 mm	37.5+/- 2.5 mm		
Primäärisen ta- santeen sijainti suhteessa kidesuuntaan	{110}+/- 1 astet- ta	{110}+/- 1 astet- ta	{110}+/- 1 astet- ta	{110}+/- 1 astet- ta	{110}+/- 1 astet- ta



Kuva 3. Kiekkotyypeittäin: piikiekkon seos, kidesuunnat sekä tasanteet. SEMI-standardi [12].

Piitankoja kasvatetaan käyttötarkoituksesta riippuen eri paksuuksiin. Suurimmissa tuotantomäärissä käytetään halkaisijaltaan 300 mm:n kiekkoja, muita piikiekkohalkaisijoita ovat 100,125, 150 sekä 200 mm [9]. Jatkoprosesseja ajatellen kiekot hiotaan ja kiillotetaan sahauksen jälkeen, jotta voidaan kasvattaa riittävän tasainen kalvo piikiekon pintaan. Valmiin piikiekon kidetasojen orientaatio kidesuuntaansa on tärkeätä sen rakenteen ja sähköisen ominaisuuksien takia. Yksikiteinen piikiekkolohkeaa tiettyihin kidesuuntiin, kun käytetään esimerkiksi sahauksessa hyväksi, kiekot sahataan mikropiirirajojen mukaan. Kuvassa 3 näytetään kiekkotyypeittäin tasanteet, jotka ilmoittavat kiekkojen kidesuunnista sekä seostuksista, joita ovat n-tyyppi ja p-tyyppi. N-tyyppin seostuksen saavuttamiseksi sulaan piimassaan lisätään usein esimerkiksi pieni määrä arseenia, vastaavasti P-tyyppin seostus voidaan tehdä muun muassa boorin avulla. Tasanteet piikiekkolla auttavat myös kohdistamaan kiekot tarkoissa prosessilaitteissa [13]. Yleisesti kiekkotyytit ovat erilaisia kuin standardissa, johtuen asiakkaan teknisistä vaatimuksista [14]. Kuvassa 4 näytetään piikiekon valmistuksen prosessivaiheet.

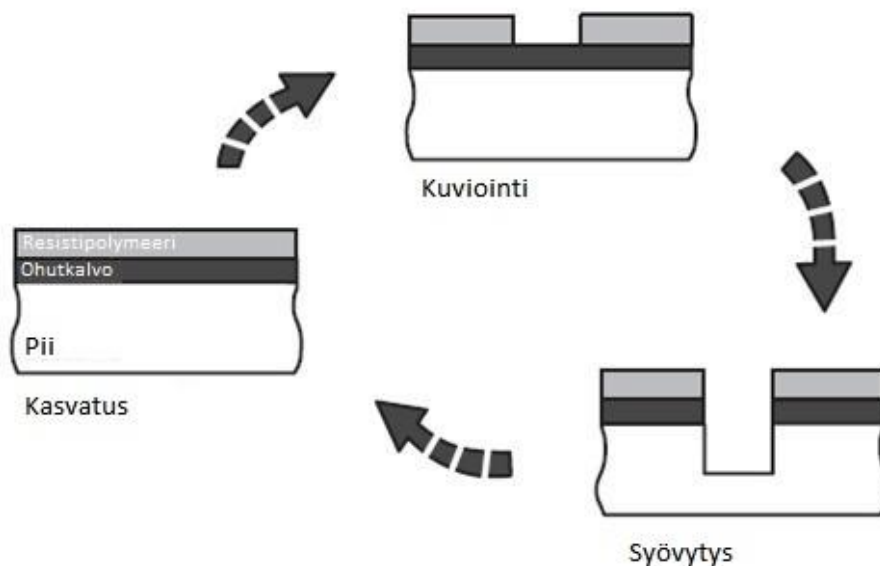


Kuva 4. Piikiekon valmistusvaiheet: a) piikiteen kasvatus tangoksi, b) piitanko, c) piitangon karkeahionta määriteltyyn halkaisijaan d) sylinterimäisen tangon tasanteen hionta e) tangon sahaus kiekkoiksi, f) reunahionta, g) kiekkopinnan hionta h) kiekon syövytyspuhdistus i) kiillotus, j) valmiin jatkoprosessoitavan kiekon tarkastus.

## 2.2 Anturielementtikiekon prosessivaiheet

Piikiekkokäy läpi useita prosessivaiheita ja samanlaisia prosesseja toistetaan, jotta saavutetaan haluttuja rakenteita kohti valmista mikroelektromekaanista anturia. Kalvon kasvatus, kuviointi ja syövytys ovat valmistusmenetelmiä, joilla saavutetaan moniulotteiset rakenteet piihin. Massatuotannossa se tarkoittaa sitä, että suurille määrille kiekkoja tehdään samat prosessit ja saman tuotteen kiekkojen välillä ei saa tapahtua isoja vaihteluja tai poikkeamia.

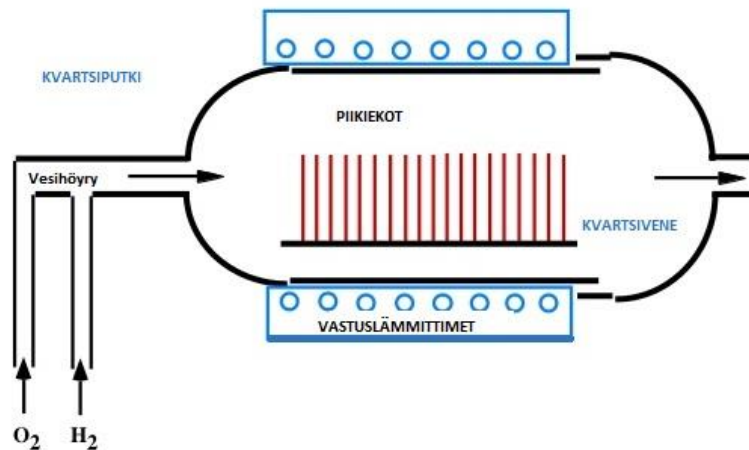
Anturielementtikiekkovalmistuksessa käytetään sanaa mikrotööstö (engl. micro-machining), johon kuuluu kolme pääkategoriaa: kuvassa 5 esiteltynä materiaalin kasvatus, kuviointi sekä syövytys.



Kuva 5. Mikrotööstön perusvaiheet

Piikiekkon pinnalle kasvatetaan erilaisia ohutkalvomateriaaleja jatkoprosesseja ajatellen. Yleisten ohutkalvoeristeiden piioksidin ( $\text{SiO}_2$ ) ja piinitridin ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) tehtävinä piikiekkon pinnalla on muun muassa eristää, suojata, sekä passivoida piitä [15]. Terminisesti kasvatetut oksidi- ja nitridikalvot vaativat korkeita lämpötiloja, noin 600–1250 °C. Kuvassa 6 näytetään terminen oksidointi, jossa on kaksi kasvatustapaa: kuiva- ja märkäoksidointi. Terminen kasvatus on hidas prosessi, kuivaoksidoinnissa

happikaasun avulla saavutetaan tunnissa noin 20 nanometrin oksidipaksuus. Märkäoksidointi, jossa käytetään vesihöyryä, kasvattaa tunnissa noin 170 nanometrin oksidikerroksen [16]. Oksidinkasvatus hidastuu prosessin edetessä piin alla.



Kuva 6. Terminen kasvatusuuni

Märkäoksidointi:  $\text{Si (s)} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \text{ (s)} + 2\text{H}_2 \text{ (g)}$

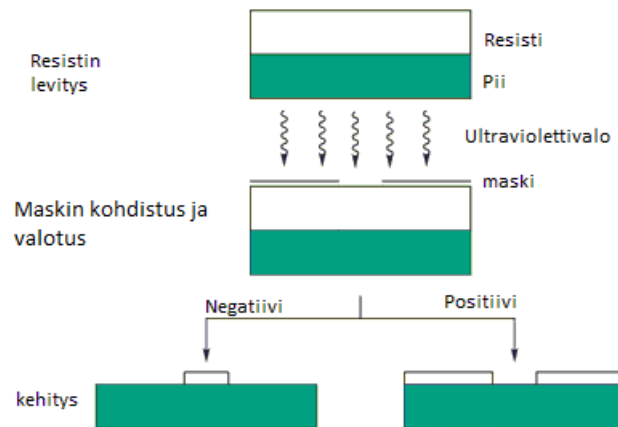
Kuivaoksidointi:  $\text{Si (s)} + \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{SiO}_2 \text{ (s)}$ (1)

Hapettumista tapahtuu piissä jopa huoneenlämmössä, mutta korkea lämpötila ja vesihöyry tai pelkkä happikaasu edistävät oksidin kasvatusprosessia ja diffuusiota pihin. [17.] [18.] Paksua oksidikerrosta käytetään eristeenä ja suojakerroksena syövytysvaiheissa. Oksidin paksuus on tyypillisesti 100–1000 nanometriä märkäoksidoinneissa [16].

### 2.2.1 Optinen litografia

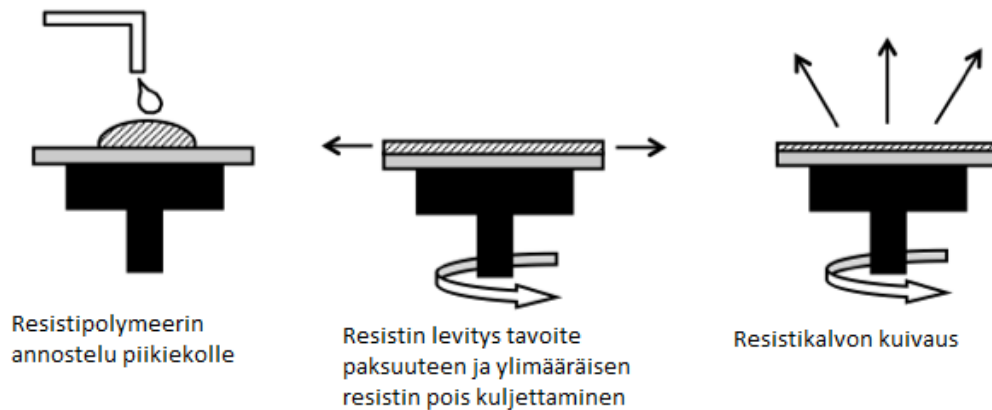
- Piikiekon ensi askeleet kohti mikroelektromekaanista anturia kulkevat litografiakuviointin kautta. Optisessa litografiassa on viisi olennaista vaihetta, resistin adheesiota parantavan prime-aineen (HMDS, heksametyylidisilatsaani) lisääminen piikiekolle, valoherkän resistin levitys piikiekon pinnalle, resistoidun piikiekon ja lasimaskin kohdistus, kuviointin valottaminen ultraviolettivalolla lasimaskin läpi resistoidulle pii-

kiekolle sekä valotetun resistikuvioinnin kehitys [19]. Kuvassa 7 on esitetty litografiaprosessin eri vaiheet.



Kuva 7. Litografian työvaiheet

Litografia on prosessi, jossa muodostetaan kuviointi piikiekon päällä olevalle kemialliselle polymeeripohjaiselle valoherkälle resistille. Kuvassa 8 näytetään resistin levitys piikiekolle pyörivällä resistointialustalla. Seuraavan vaiheen valotusprosessissa resisti altistetaan ultraviolettivalosäteilylle kromikuvioidun lasimaskin läpi. Kromikuviointi estää valosäteilyn pääsyn resistille eli suojaa tarkoituksella alueita valotukselta, jotta saavutetaan haluttu resistikuviointi. Resistä on olemassa kahdentyyppistä, positiivista resistiä ja negatiivista resistiä. Valotuksen jälkeisessä kehityksessä säteilylle altistuneet positiivisen resistin hajonneet polymeeriketjut liukenevat pois. Negatiivinen resisti käyttäytyy päinvastaisesti eli yhdistymättömät polymeeriketjut liukenevat pois kiekon pinnalta kehittäeseen. [20.] Kuvassa 7 kehityksen työvaiheessa on kuvattu negatiivisen ja positiivisen resistin erot. Yleisesti mikrosysteemien valmistuksessa positiivisen resistin tehtävä on toimia suojana syövytysprosesseissa. Resistin tulee kestää tiettyjen lämpötilojen, kemikaalien sekä kosteuden vaihteluja seuraavissa jatkoprosesseissa. [21.]



Kuva 8. Resistin levitys resistointialustalla olevalle piikiekolle.

Massatuotantoa ajatellen saman kuvioinnin kopioiminen kiekosta toiseen on litografiassa tärkeitä; kuvioinnin tarkkuus voi olla jopa 10 nanometrin luokkaa. Samoilta kiekkoille tehdään tyypillisesti useita litografiakuvioiteja, ja kerroksien välisen kohdistuksen on oltava hyvin tarkka.

### 2.2.2 Syövytys

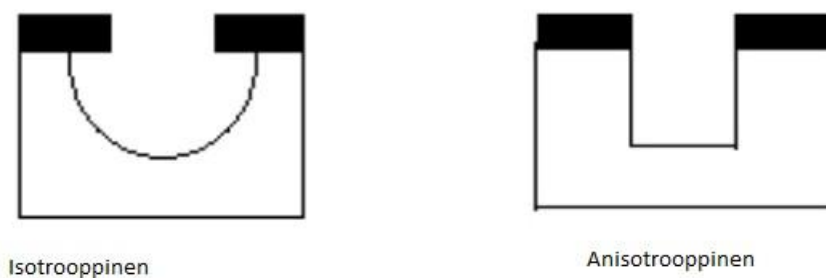
Kuvioinnin siirtyminen piikiekolle sisältää kaksi vaihetta, litografisen resistikuvioinnin ja myöhemmin jatkoprosessissa määritellyn syövytysmenetelmän, jolla syövytetään resistin alta kehityksessä paljastunut materiaali. Prosesseissa virheellisesti resistoitu kuviointi pystytään uusimaan tarvittaessa, kun taas virheellisesti syövytetyn kuvioinnin uusiminen on vaikeaa tai lähes mahdotonta [22]. Piin syövytyksessä käytetään suojana resistimaskia sekä oksidimaskia. Oksidimaski muodostetaan resistimaskilla, jolla yhtenäinen alla oleva oksidikalvo etsataan plasma-avusteisesti.

Mikroelektromekaanisten antureiden alkuaikojen syövytysprosesseissa käytettiin yksinomaan märkäsyövytystä. Nykyisin kuivasyövytysprosessit plasmalla ovat yleistyneet alalla, mikä on vähentänyt kemiallisten märkäprosessien roolia. Molemmissa märkä- ja kuivasyövytyksissä tärkeimpinä asioina on syövytysmateriaalin selektiivisyys. Selektiivisyydellä tarkoitetaan maskimateriaalin ja etsattavan materiaalin syövytysnopeuksien suhdetta. Syövytyksessä on otettava huomioon eri materiaalien syövytysnopeudet: samassa syövytystilanteessa yhden materiaalin syövyminen on nopeampaa kuin toisen. Yleisimmät märkäsyövytettävät materiaalit ovat piiksididi ja alumiini [23]. Kaikkia materiaaleja ei voi märkäsyövyttää kuten titaanikar-

bidia (TiC) tai timanttia. Näitä materiaaleja voidaan kuitenkin syövyttää kuivasyötyksessä, mutta kuivasyötyksessäkin plasmalla on omat rajoitteensa johtuen kaasun ja haihtuvan reaktiotuoteyhdistelmän puutteesta [22].

Oli kyseessä sitten märkä- tai kuivaetsaus, molemmissa menetelmissä on täytyttävä kolme ehtoa: syövytysaineen kuljettaminen pinnalle, pinnan reagoiminen sekä pinta-aineuksen poistaminen. Syövytysnopeudet ovat molemmissa prosesseissa tyypillisesti 100 - 1000 nanometriä minuutissa. Poikkeuksen tekee pii, jonka syövytysnopeus syövytysaineesta riippuen voi olla molemmissa prosesseissa 20 mikrometriä minuutissa. [22.]

Erilaisista syövytysmenetelmistä puhuttaessa tavataan puhua syövytettävän materiaalin syövytysprofiilista, ja tällöin puhutaan isotrooppisesta tai anisotrooppisesta syövytyksestä. Kemiallinen märkäsyövytys on yleensä isotrooppista. Isotrooppisessa syövytyksessä materiaali syöpyy samalla nopeudella joka suuntaan, kun taas anisotrooppisessa syövytyksessä materiaali syöpyy tiettyyn suuntaan nopeammin. [23.] Kuvassa 9 näytetään kuvitetusti isotrooppisen ja anisotrooppisen syövytysprofiilien erot. Pieniä rakenteita etsatessa käytetään yleensä anisotrooppista etsausta, joka ei etsaa isotrooppisen tapan maskin alta vaan mahdollistaa suorat seinät tarkkoihin rakenteisiin.



Kuva 9. Isotrooppisen ja anisotrooppisen syövytyksen ero

### 2.2.3 Kuivasyövytys plasmalla

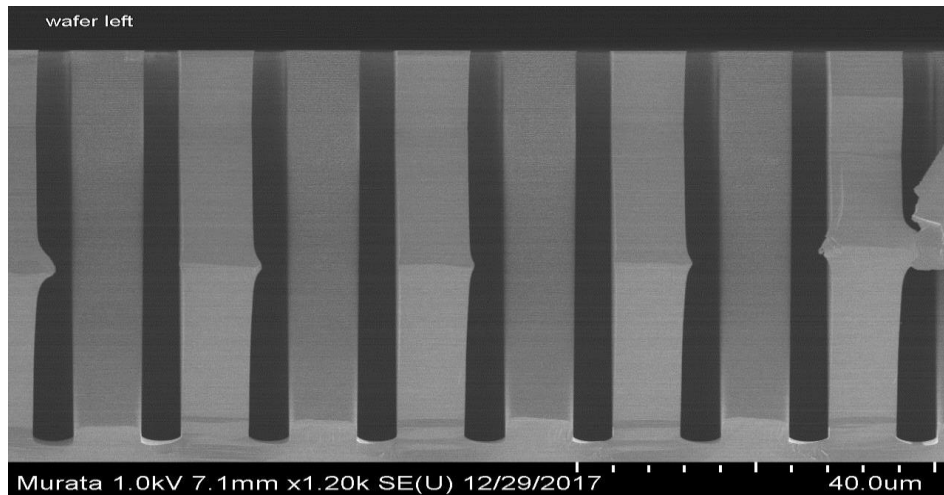
Plasmaa kutsutaan tyypillisesti ionisoituneeksi kaasuksi. Erona muihin kaasuihin, plasmalla on ainutlaatuiset ominaisuudet johtuen vapaista elektroneista, jotka eivät

ole sitoutuneet atomeihin tai molekyyliin. Elektronien varaus tekee plasmasta johtavan, joka on riippuvainen sähkömagneettikentästä. Keinotekoisesti plasma luodaan prosesseissa tasavirralla, korkeilla radiotaajuuksilla ja mikroaalloilla. Elektronit saavat energiansa sähkökentässä, jolloin niiden energiatasot ovat korkeat. Plasmaprosessissa elektronien törmäileminen etsauskaasun molekyyliin voi johtaa kaasun hajoamiseen, ionisoitumiseen tai kiihtymiseen [24].

Vertikaalisesta syövytyksestä käytetään myös nimitystä anisotrooppinen plasmasyövytys. Syövytys tapahtuu tyhjiössä, jossa reaktiivinen kaasu muodostetaan plasmaksi voimakkaassa RF-jännitekentässä (engl. radio frequency voltage fields). Anisotrooppisessa syövytyksessä tapahtuu ionipommitusta etsauskammiossa. Plasmaetsauksessa radikaaliset ja ionisoituneet molekyylit ovat tärkeitä. Nämä molekyylit kiihdytetään RF-jännitekentän avulla, jolla ne saavat energiansa iskeytyä suoraan etsattavaan pintaan. Plasmaetsaus on yhdistelmä kemiallista (reaktiiviset molekyylit) ja fysikaalista (ionipommitus) syövytysprosessia. [25.]

Reaktiivinen ionisyväetsaus -laite (DRIE Deep Reactive Ion Etching)

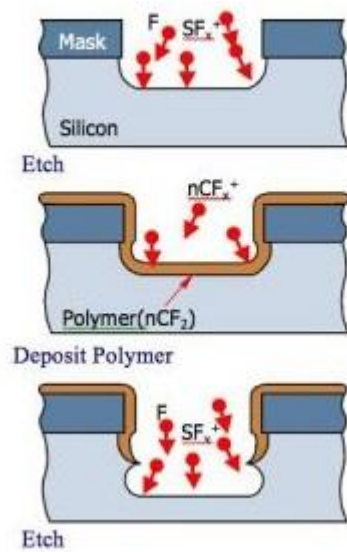
Reaktiivinen ionisyväetsaus (engl. Deep reactive ion etching) on menetelmä, jota kutsutaan Bosch-prosessiksi. Prosessi on yksi yleisimpiä menetelmiä reaktiivisessa ionisyväetsauksessa, jonka on kehittänyt ja patentoinut saksalainen Robert Bosch GmbH [26]. Prosessissa etsataan piitä ionisoituneella kaasuseoksella voimakkaassa radiotaajuuskentässä, jonka taajuus on yleensä 13,56 MHz. Kuvassa 10 näytetään pystysuorat sivuseinät, jotka laitteiston etsauskyky mahdollistaa.



Kuva 10. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva reaktiivisen ionisyväetsatun piikiekon poikkileikkauksesta.

Prosessi koostuu etsausvaiheesta, jossa etsauskaasu sytytetään kammiossa plasmaksi, joka ionipommittaa ja kemiallisesti etsaa selektiivisesti oksidimaskin avulla piitä pois. Etsatut seinäpinnat suojataan ohuella teflonin kaltaisella polymeerikalvolla. Prosessi alkaa tyypillisesti etsauksella, jonka jälkeen laite pinnoittaa etsattavan alueen ohuella polymeerillä. Kuvassa 11 etsauksen jälkeen polymeerinkalvon kasvatuksen tarkoituksena on suojata sivuseiniä seuraavassa etsausvaiheessa. Edellä mainitut etsaus- ja kasvatusvaiheet muodostavat yhdessä käsittelyvaiheen. Reseptit kokonaisuudessaan koostuvat peräkkäisistä käsittelyvaiheista (engl. blocks), joissa kiekkoa etsataan prosessissa määriteltyyn syvyyteen. Laite kykenee etsaamaan syviä suorakulmaisia 90-asteisia seinämärakenteita.

## Deep Reactive Ion Etching (DRIE)



Kuva 11. Syväkuivaetsauksen prosessivaiheet

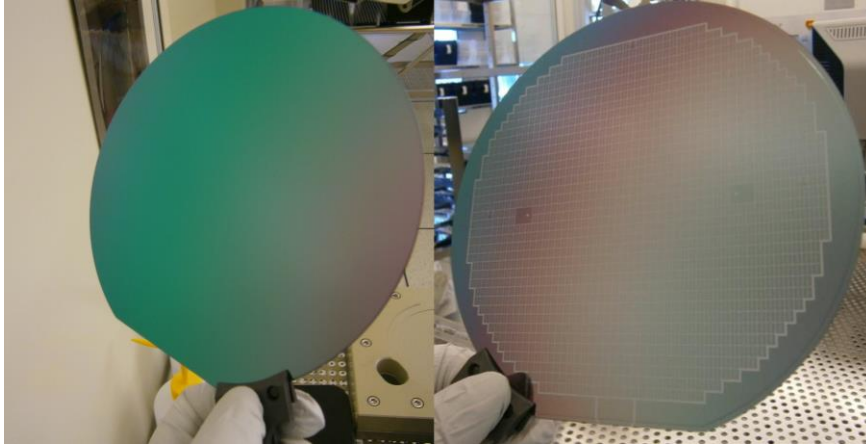
### 3 Testipiikiekkojen määritys ja valmistus

Keskityskokeisiin valittiin kahdentyyppisiä piikiekkoja, 28 kpl oksidoituja kiekkoja, joilla tutkittiin oksidin etsauskulutuksen eroa kiekon vasemmalla ja oikealla puolella. Tutkimuksiin valmistettiin lisäksi 12 kuvioitua oksidimaskipiikiekkkoa, joihin tehtiin resistikuviointi litografiassa, jonka jälkeen etsattiin resistimaskilla oksidikerroksen läpi piihin kuviointi. Kuvioitua oksidimaskipiikiekkkoa käytettiin tutkimuksissa etsattujen rakenteiden syvyyksien, leveyksien ja profiilien mittauksiin.

Oksidipiikiekoille kasvatettiin 800 nanometrin oksidikerros termisessä kasvatusuunissa. Kasvatuksen jälkeen kiekkoille laserkaiverrettiin tunnistekoodit ja kiekot olivat tämän jälkeen valmiina keskityskokeisiin. Kuvassa 12 on 800 nanometriä oksidoitu kiekko.

Litograafisesti kuvioituille piikiekoille kasvatettiin 1570 nanometrin oksidikerros termisessä kasvatusuunissa ja niihin laserkaiverrettiin tunnistekoodit, minkä jälkeen kiekkoille tehtiin resistikuviointi. Resistikuvioinnin avulla syövytettiin alta paljastunut oksidikerros piihin asti plasmasyövytyksessä. Ennen piin syväkuivaetsauskoikeita

resistikalvo poistettiin happiplasmalla. Kuvassa 12 on tutkimuksiin valmistettu kuvioitukieppo oksidimaskilla.

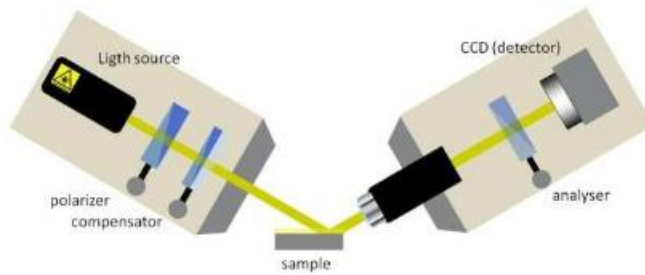


Kuva 12. 800 nanometrin Oksidoitu piikieppo (vasen) ja kuvioitu kiekko 1570 nanometrin oksidimaskilla (oikea)

## 4 Mittauslaitteistot

### 4.1 Oksidinpaksuusmittauslaite ja mittausmenetelmä

Oksidinpaksuusmittauksessa käytetään yleensä optista ellipsometriä. Optiset menetelmät ovat tarkkoja, nopeita eivätkä koske kiekon pintaan. Menetelmä sopii tutkimukseen ja tuotevalmistuksen kontrolliin. Ellipsometri mittaa polarisaation muutosta, kun valo heijastuu tai välittyy materiaalin rakenteesta. Kalvon paksuus substraatin päällä voidaan määrittää polarisaation muutoksella amplitudin suhteen. Kuvassa 13 näytetään tavallisen ellipsometrilaitteiston koostuvan valonlähteestä (engl. light source), optisista polarisaation tasaajista (engl. polarizer compensator), heijastuvan valon analysoijasta (engl. analyser) sekä detektorista (engl. detector).

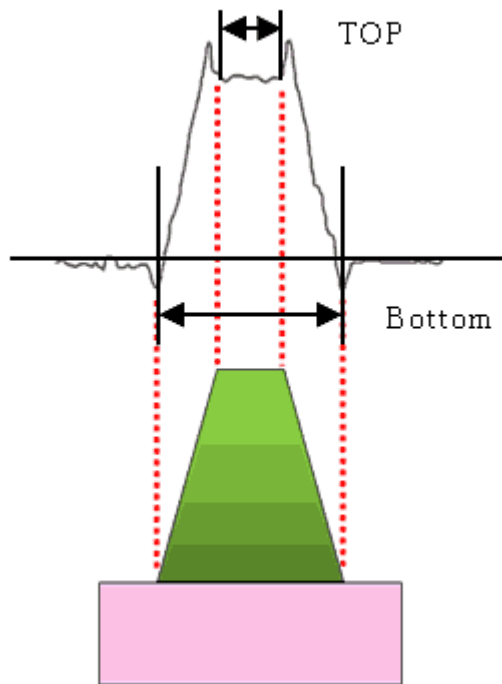


Kuva 13. Ellipsometrimittauslaitteisto

### Viivanleveysmittauslaite ja mittausmenetelmä

Viivanleveysmittaus, jota usein kutsutaan kriittiseksi mitaksi (engl. Critical dimension, CD) perustuu optisen viivan tai aukon mittaukseen kameralla, joka lampun valotehon säädön avulla tunnistaa mitattavan reunan. Kuvassa 14 näytetään viivanleveysmittauksen reunantunnistus profiilista. Laite voi mitata pystysuuntaisia ja sivusuuntaisia mittoja, mutta ei sovellu syvyysmittauksiin, johon on olemassa oma mittauslaite. Tarkkuus viivanleveydelle valmistustoleranssissa saa poiketa usein ainostaan 10 %. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi yhden mikrometrin rakenteessa saa olla maksimissaan  $\pm 100$  nanometrin virheheitto [27]. Tyypillisiä mittauksia ovat kuvioinnin viivanleveys, päällekkäisten kuviointikerrosten kohdistustarkkuus ja syövytetyn kuvioinnin uranleveys.

## Line profile

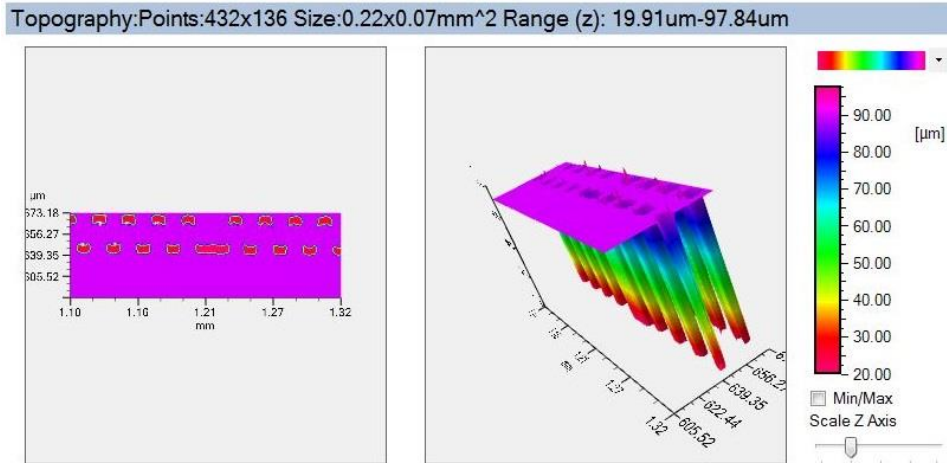


A schematic cross-sectional view

Kuva 14. Optisen reunatunnistuksen toimintaperiaate [28].

### 4.2 Optinen profilometrilaitte ja mittausmenetelmä

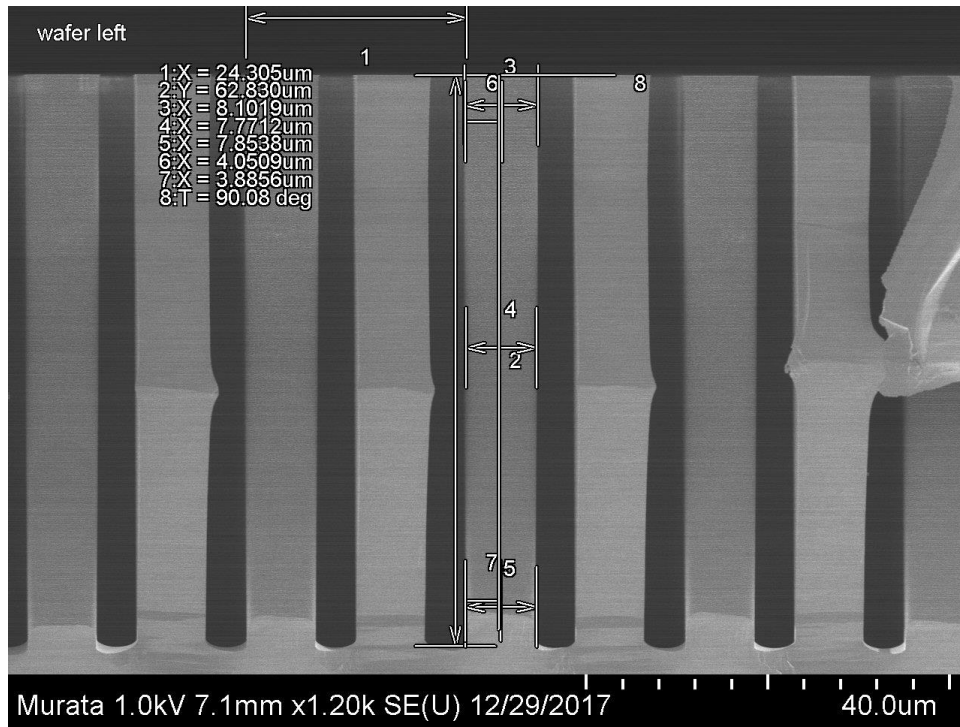
Optinen profilometri mittaa kiekon pinnan korkeusprofiileja määrittämällä pinnankarheuksia ja -muotoja. Tyypillisesti profilometriä käytetään muodostuneiden rakennelmien portaiden, harjanteiden ja urien korkeusprofiilien tarkastukseen. Kuvassa 15 on 3-ulotteisen kamparakenteen topografia. Pystysuuntainen mittausresoluutio on nanometrin luokkaa, kun taas sivusuuntainen mittausresoluutio on yleensä heikompi, noin muutama mikrometri. Optisen profilometrin etuja ovat näytteen tarkastuksessa koskemattomuus, nopeus ja resoluutio [29].



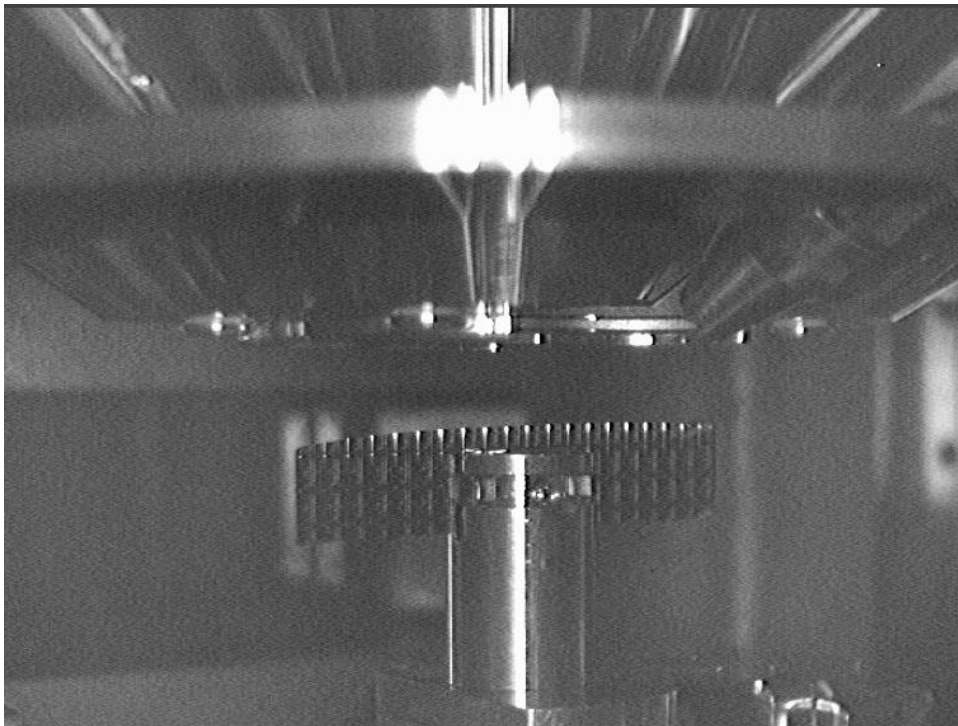
Kuva 15. 3-ulotteinen kuva, topografiset syvyysprofiilit

#### 4.3 Pyyhkäisyelektronimikroskooppimittaus

Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (engl. Scanning Electron Microscopy, SEM) perustuu elektronisuihkuun, joka kohdistetaan analysoitavan materiaalin pintaan. Minimi kuvaresoluutio on 5 nanometriin asti, joka mahdollistaa melkein kaikenlaisen mikrovalmistetun rakenteen tutkimisen. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin hyödyt tulevat tarkasteltaessa vino- ja poikkileikkauksuvia. Kuvassa 16 esitetyn kaltaisesta poikkileikkauksuvasta voidaan määrittää topografisia tietoja, seinämärakenteen kulmia ja syvyyksiä. Heikkoutena on se, että mitattavan näytteeseen joudutaan tekemään poikkileikkauksia, eli halkaisemaan näyte mittausta varten käyttökelvottomaan kuntoon [30]. Kuvassa 17 kuviointikiekon näytepala on asetettuna pyyhkäisyelektronimikroskoopin kammiossa näytteenpitimeen.



Kuva 16. Pyyhkäiselektronimikrooppimittaus poikkileikkaukuvasta



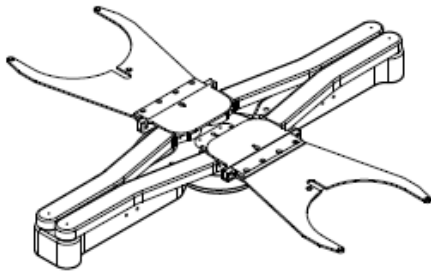
Kuva 17. Kiekonpalanäyte pyyhkäiselektronimikrooppikammiossa

## 5 Kiekon keskityksen analysointi

Kiekon keskityksen periaatteena oli muuttaa kiekon paikoitusta etsausalustalla ja vertailla etsattujen kiekkojen profiiliin ja oksidin paksuuden muutoksia. Tutkimuksessa kiekkoja mitattiin ennen ja jälkeen etsauksen, jolla pystyttiin määrittelemään lähtötilanne ja lopputulos, jonka avulla pystyttiin vertailemaan kiekkojen paikoituksen vaikutus etsauskammiossa. Kuviointikiekoilta viivanleveydet mitattiin oksidimaskista ja etsauksen jälkeen paljaasta piistä jolloin pystyttiin vertailemaan kuvioinnin ja etsatun kuvioinnin leveyseroja. Etsauksen jälkeen kuviointikiekolla muodostuneiden rakenteiden syvyydet ja profiilivariaatiot mitattiin.

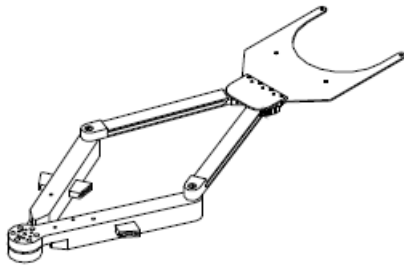
### 5.1 Reaktiivisen ionisyyäetsaus-laitteiston robottikäden toiminta ja säätö

Robottikädet kuvissa 18 ja 19 ovat kolmiakselisia ja ne operoivat DRIE-laitteistojen syövytyskammioihin liitetyissä kuljetuskammioissa kuvassa 20. Robotti prosessoi maksimissaan 25 kiekon kasetin. Kasetti sijaitsee latauskammiossa. Latauskammio sekä kuljetuskammio ovat samassa tyhjiöpaineessa, ja robotti käsittelee yhtä kiekkoa kerrallaan [31]. Robottikäden toimintaa hallitaan Control/Display Module (CDM) -ohjaimen avulla ja vanhemmilla laitteistoilla robottikättä hallitaan käyttöliittymästä. Kiekon paikoitus syövytysalustalla säädetään laitteen asetuksesta, jossa on määriteltä robottikäden asennonmuutos. Tätä työtä aloitettaessa oli jo yleisesti tiedossa, että uusimmissa kuivaetsauslaitteissa robottikäden asennon muutos oli tarkempi ja hienovaraisempi kuin vanhojen laitteiden muutosasetukset, mikä johtuu uusien ja kehittyneempien laitteistojen ja syövytysalustojen ratkaisuksista.



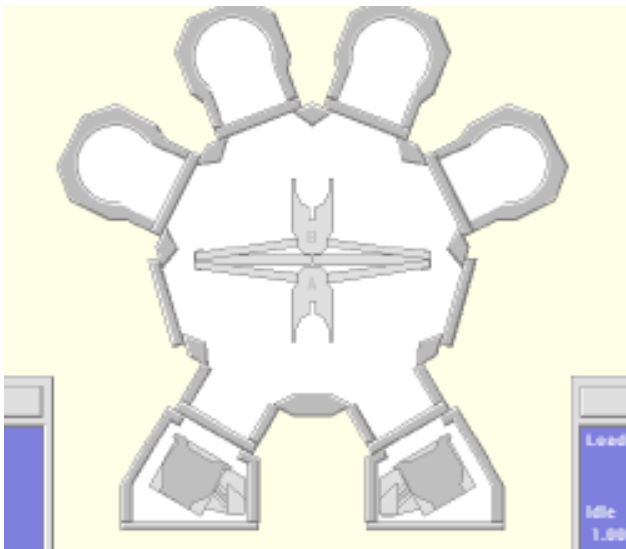
BiSymmetrik Dual Pan Arm Set

Kuva 18. DRIE-laitteistojen kahden otteen robottikäsi -tyyppi



Frogleg Single Pan Arm Set

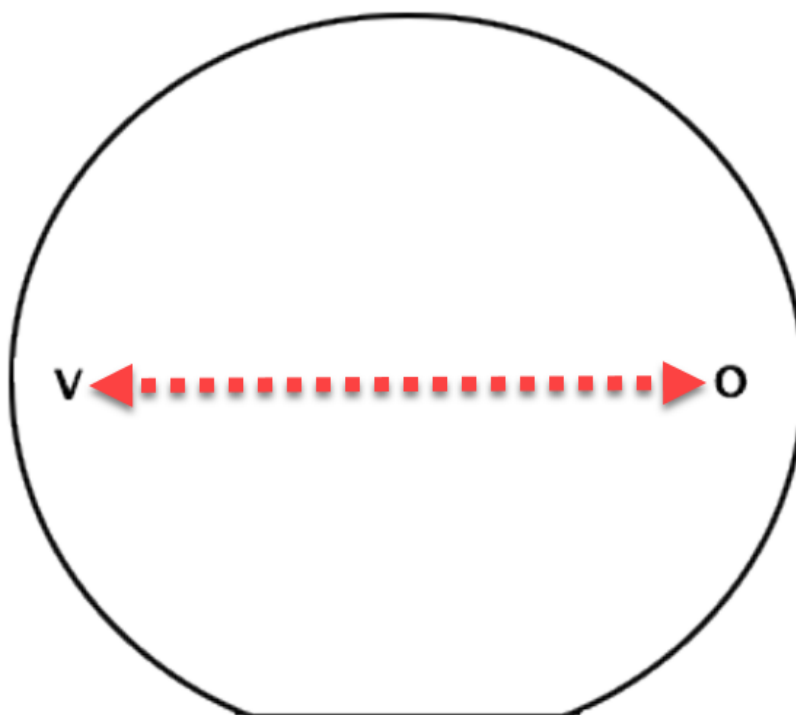
Kuva 19. DRIE-laitteistojen yhden otteen robottikäsi -tyyppi



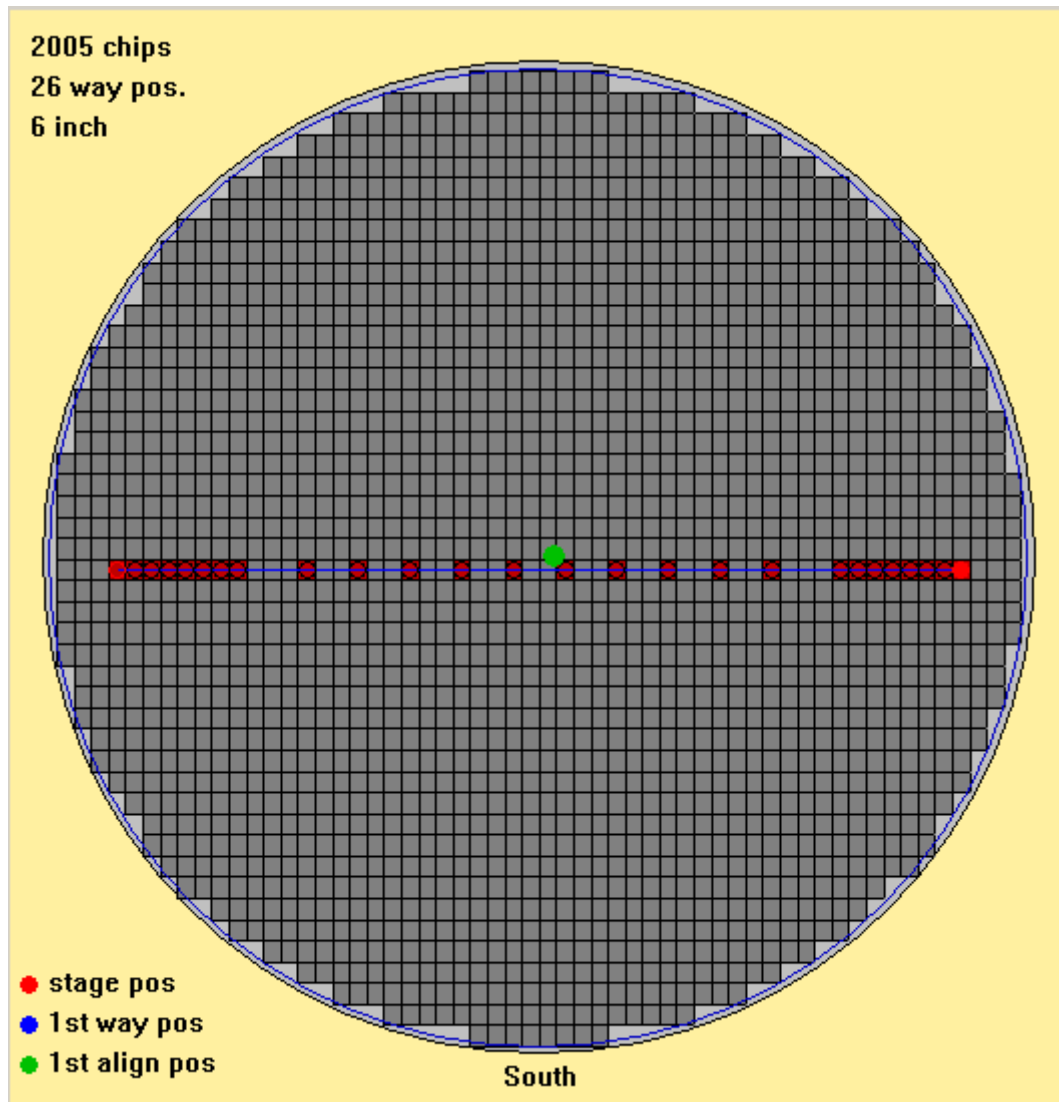
Kuva 20. Käyttöliittymän kuvitteellinen DRIE-laitteisto. Kuvassa on neljä kuivasyövytykskammiota ylhäällä ringissä ja kaksi latauskammiota alhaalla. Keskellä kuljetuskammiota on kiekkoja operoiva robottikäsi.

## 5.2 Kiekkojen paikoitukset mittauksessa

Kiekkojen analysoinnissa kaikki mittaukset tehtiin kiekon vaakasuuntaan (kuva 21). Ensimmäisenä suoritettiin oksidoitujen kiekkojen kalvonpaksuusmittaukset, jotka tehtiin automatisoidulla ellipsometrilaitteella. Kalvonpaksuusmittaukset tehtiin ennen kiekon syövytystä ja syövytyksen jälkeen. Kuvioidun kiekon mittaukset poikkesivat oksidoidun kiekon mittauksista ja olivat laajemmat. Kuvassa 22 on kuvioitujen kiekkojen mitattavien elementtien mittauskartta, jonka jokaisen mitattavan elementin kohdalta mitattiin elementtikuvioinnin viivanleveydet ennen etsausta ja etsauksen jälkeen. Viivanleveysmittauksien jälkeen kuvioidun kiekon elementtien korkeusprofiilit mitattiin profilometrillä kiekoilta ja viimeisenä analysoitiin kuvioidun kiekon poikkeileikkaukset pyyhkäisyelektronimikroskoopilla.

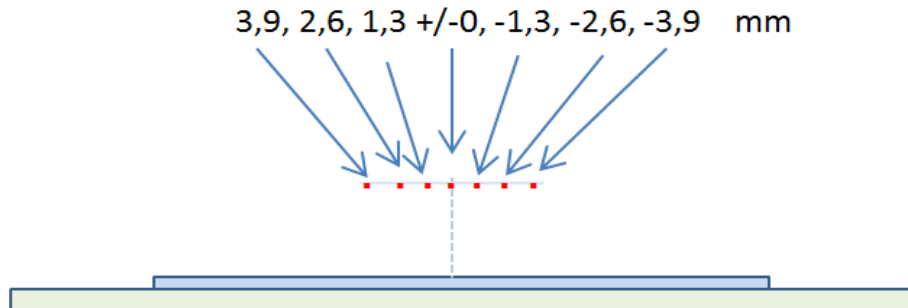


Kuva 21. Kiekon mittaukset vaakasuunnassa



Kuva 22. Viivanleveysmittausohjelman kiekkokartta

## DRIE 2A/B



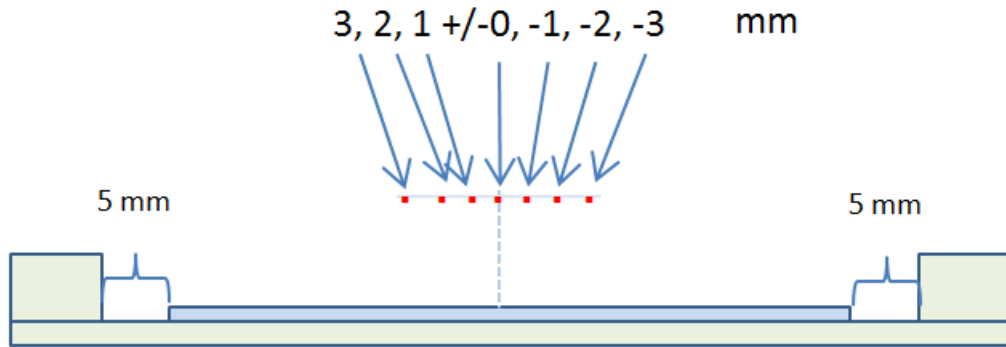
Kuva 23. DRIE\_02A/DRIE\_02B-etsausalustojen kiekonkeskeytyksen muutokset

Kuvassa 23 havainnollistetaan DRIE\_02A/DRIE\_02B etsausalustojen kiekon siirto punaisien paikoituspisteiden avulla etsausalustan keskipisteestä, taulukossa 3 on tutkimuskiekkojen ajo-järjestys.

Taulukko 3. DRIE\_02A/B-etsauskammioiden tutkimuskiekkojen ajot

DRIE_02A/B kammio ajot			
Ajo	Kiekkotyyppi	Paikoitus	Kammio
1	Oksidoitu kiekko	-3.9mm	A
2	Oksidoitu kiekko	-3.9mm	B
3	Kuvioitu kiekko	-3.9mm	A
4	Kuvioitu kiekko	-3.9mm	B
5	Oksidoitu kiekko	+2.6mm	A
6	Oksidoitu kiekko	+2.6mm	B
7	Oksidoitu kiekko	-2.6mm	A
8	Oksidoitu kiekko	-2.6mm	B
9	Oksidoitu kiekko	+3.9mm	A
10	Oksidoitu kiekko	+3.9mm	B
11	Kuvioitu kiekko	+3.9mm	A
12	Kuvioitu kiekko	+3.9mm	B
13	Oksidoitu kiekko	+1.3mm	A
14	Oksidoitu kiekko	+1.3mm	B
15	Oksidoitu kiekko	-1.3mm	A
16	Oksidoitu kiekko	-1.3mm	B
17	Oksidoitu kiekko	keski	A
18	Oksidoitu kiekko	keski	B
19	Kuvioitu kiekko	keski	A
20	Kuvioitu kiekko	keski	B

## DRIE 4 158 x 5 UR



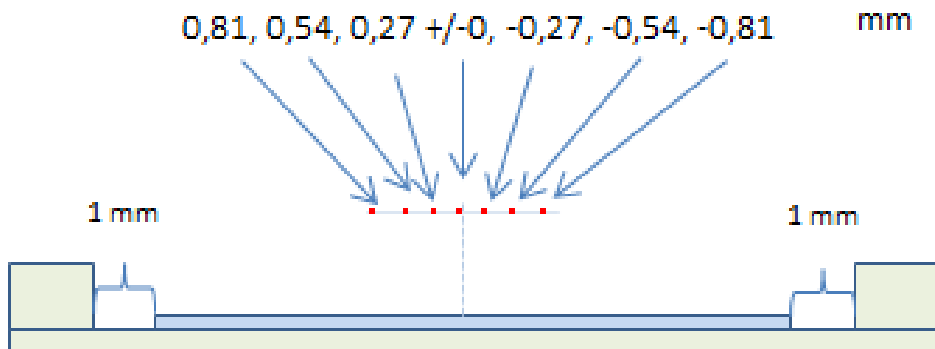
Kuva 24. DRIE\_04D-etsaussalustan (158x5) yhdenmukaisen kehän (engl. uniformity ring) kiekonkeskityksen muutokset

Kuvassa 24 havainnollistetaan DRIE\_04D-etsausalustan kiekon siirto punaisien paikoituspisteiden avulla etsausalustan keskipisteestä, taulukossa 4 on tutkimuskiekkojen ajo-järjestys

Taulukko 4. Drie\_04D etsauskammion tutkimuskiekkojen ajot

DRIE_04D kammioajot		
Ajo	Kiekkotyyppi	Paikoitus
1	Oksidoitu kiekko	keski
2	Kuvioitu kiekko	keski
3	Oksidoitu kiekko	+1mm
4	Oksidoitu kiekko	-1mm
5	Oksidoitu kiekko	+3mm
6	Kuvioitu kiekko	+3mm
7	Oksidoitu kiekko	+2mm
8	Oksidoitu kiekko	-2mm
9	Oksidoitu kiekko	-3mm
10	Kuvioitu kiekko	-3mm

## DRIE 5 152x2 UR



Kuva 25. Drie\_05A-syövytysalustan (152x2) yhdenmukaisen kehän (engl. uniformity ring) kiekonkeskityksen muutokset

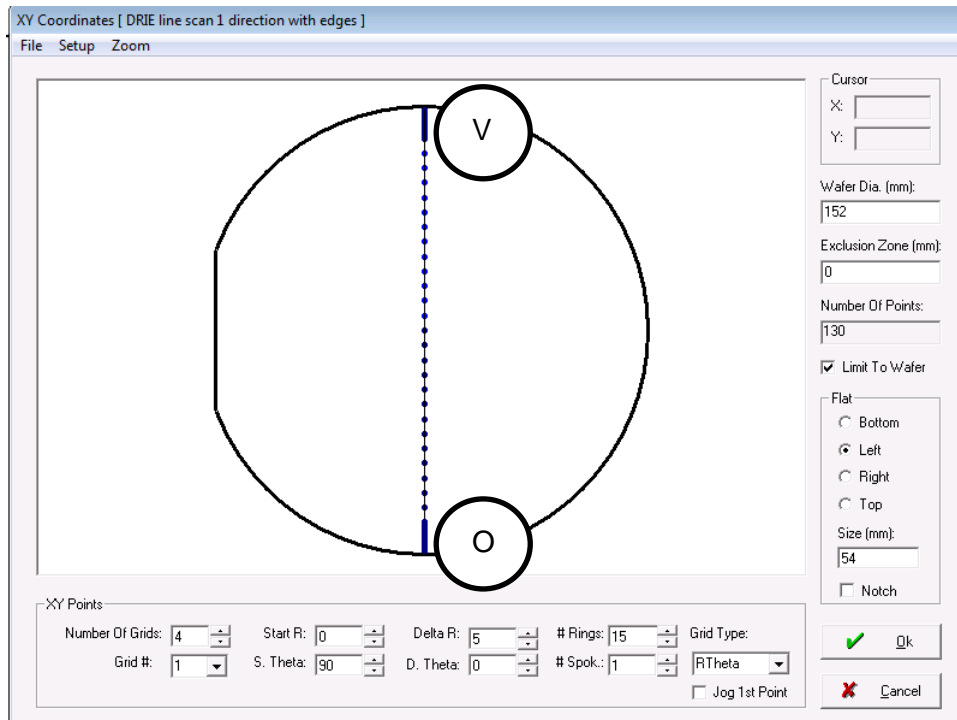
Kuvassa 25 havainnollistetaan DRIE\_05A-etsausalustan kiekon siirto punaisien paikoituspisteiden avulla etsausalustan keskipisteestä, taulukossa 5 on tutkimuskiekkojen ajo-järjestys

Taulukko 5. DRIE\_05A etsauskammion tutkimuskiekkojen ajot

DRIE_05A kammioajot		
Ajo	Kiekkotyyppi	Paikoitus
1	Oksidoitu kiekko	-0,81mm
2	Kuvioitu kiekko	-0,81mm
3	Oksidoitu kiekko	+0,54mm
4	Oksidoitu kiekko	-0,54mm
5	Oksidoitu kiekko	+0,81mm
6	Kuvioitu kiekko	+0,81mm
7	Oksidoitu kiekko	+0,27mm
8	Oksidoitu kiekko	-0,27mm
9	Oksidoitu kiekko	keski
10	Kuvioitu kiekko	keski

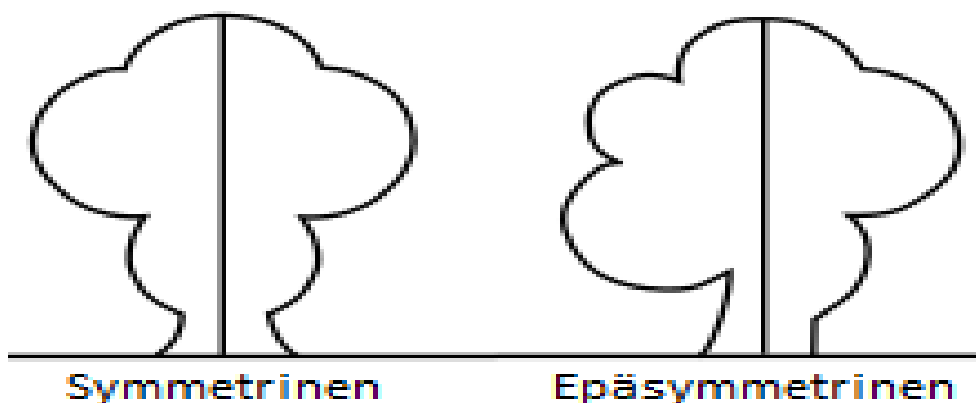
### 5.3 Oksidinpaksuusmittaustulokset

Oksidinpaksuusmittaukset tehtiin pelkästään oksidikiekoille. Kuvassa 26 näytetään mittapisteiden avulla kiekon mittaukset vaakasuunnassa ellipsometrin ohjelmalla, joka mittasi 130 pistettä kiekon laidasta laitaan. Ohjelma mittasi tiheästi kiekon reunoilla ja harvakseltaan kiekon keskeltä.



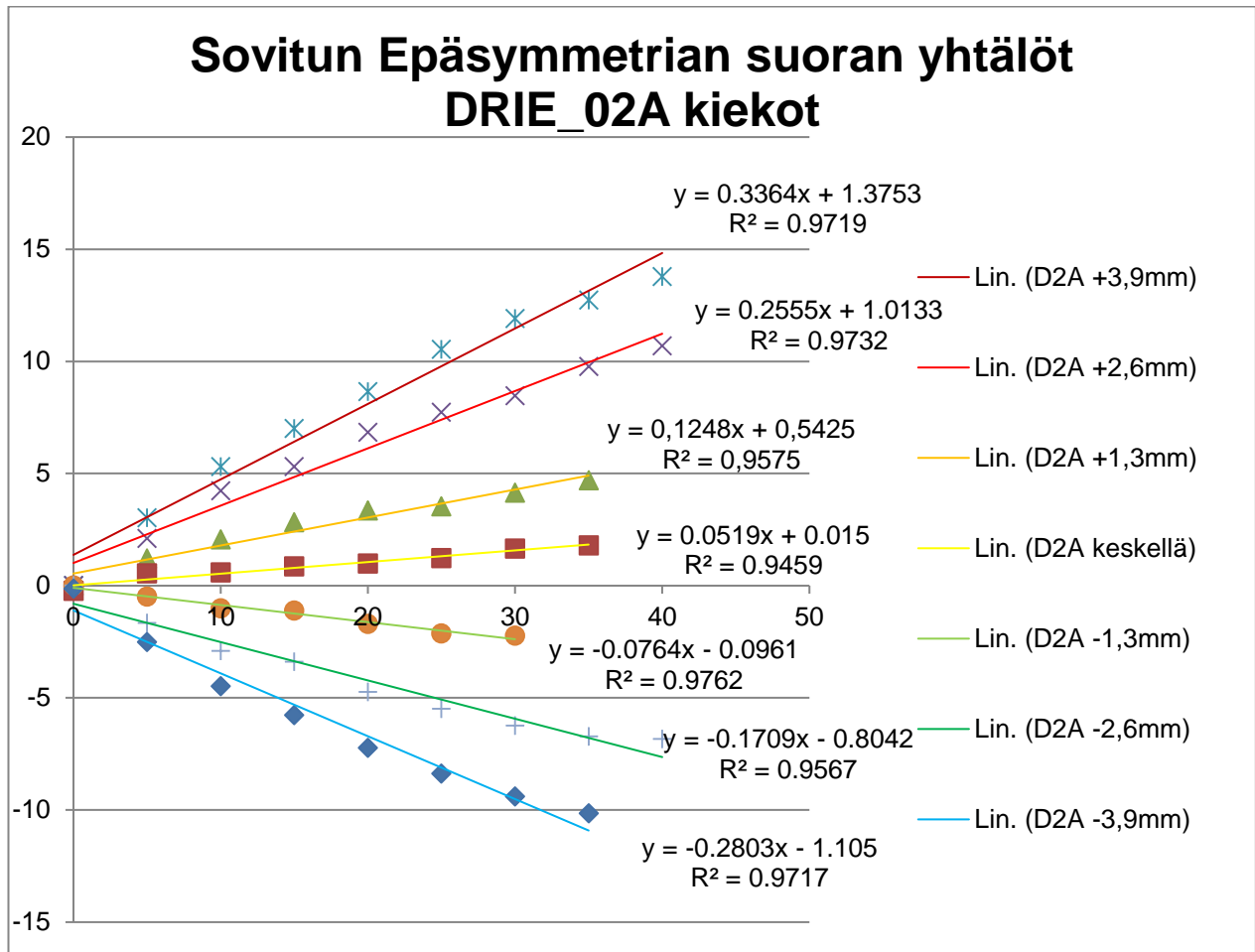
Kuva 26. Mittausohjelman mittapisteet kiekolta. Kuvasta katsottuna kiekon vasen reuna ylhäällä ja oikea reuna alhaalla.

Oksidikerroksen paksuuden epäsymmetrian määrittäminen on olennaista oksidoidun kiekon keskitystutkimuksessa. Kiekoilta laskettiin epäsymmetria oikean puolen mittauspisteiden etäisyys keskipisteestä vähennettynä samalla etäisyydellä olevan vasemmanpuolen mittauspisteiden etäisyys keskipisteestä. Kiekon paikoituksen muutos vaikuttaa etsatun oksidipaksuuden epäsymmetriaan, kun kiekon paikoitusta muutetaan alustalla keskipisteestä. Etsatun oksidin paksuudessa on aina eroa eri puolilla eli epäsymmetriaa, eikä siksi ole koskaan täysin symmetrinen. Kuvassa 27 havainnollistetaan symmetrian ja epäsymmetrian ero.

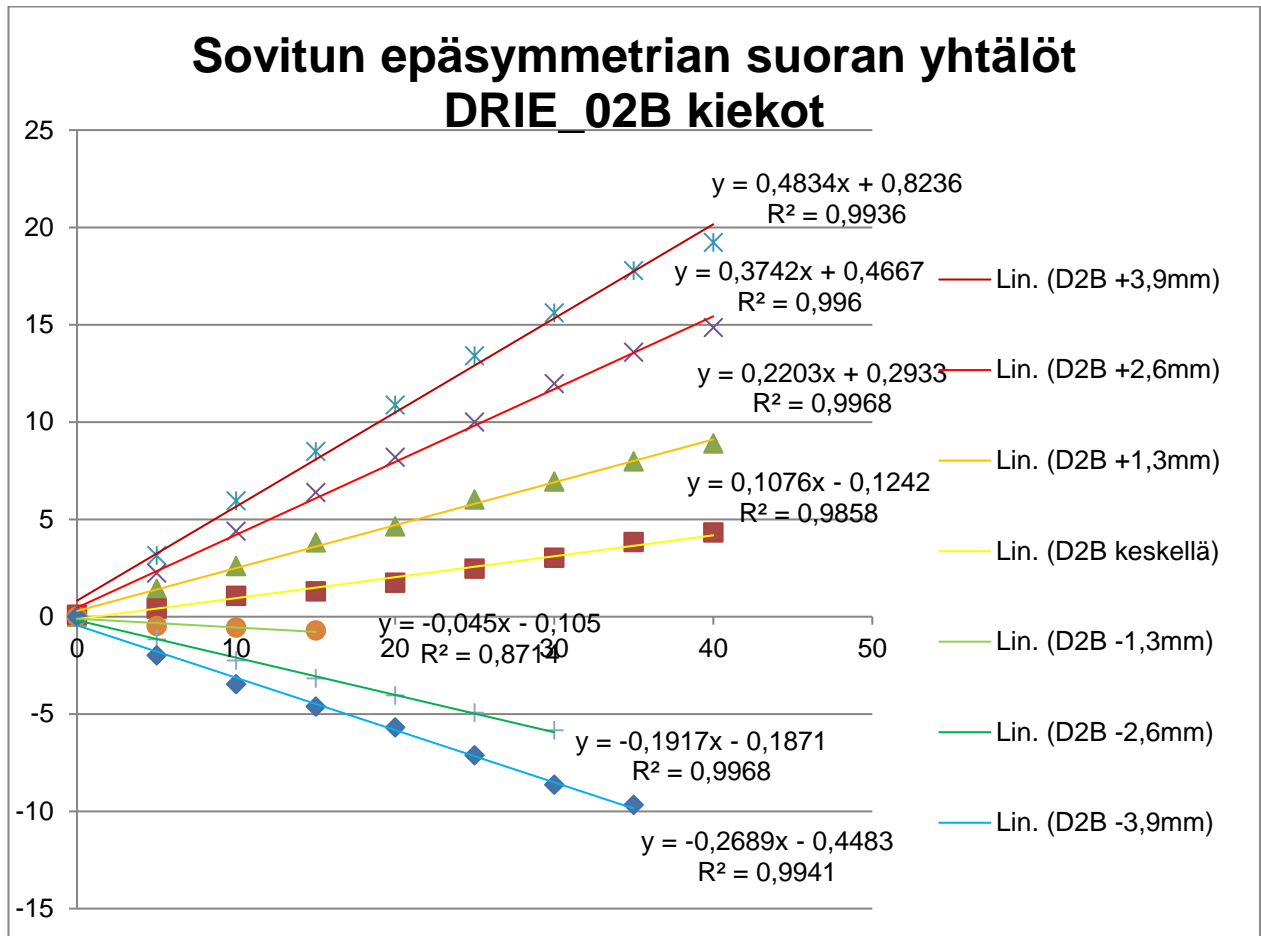


Kuva 27. Symmetrinen ja epäsymmetrinen

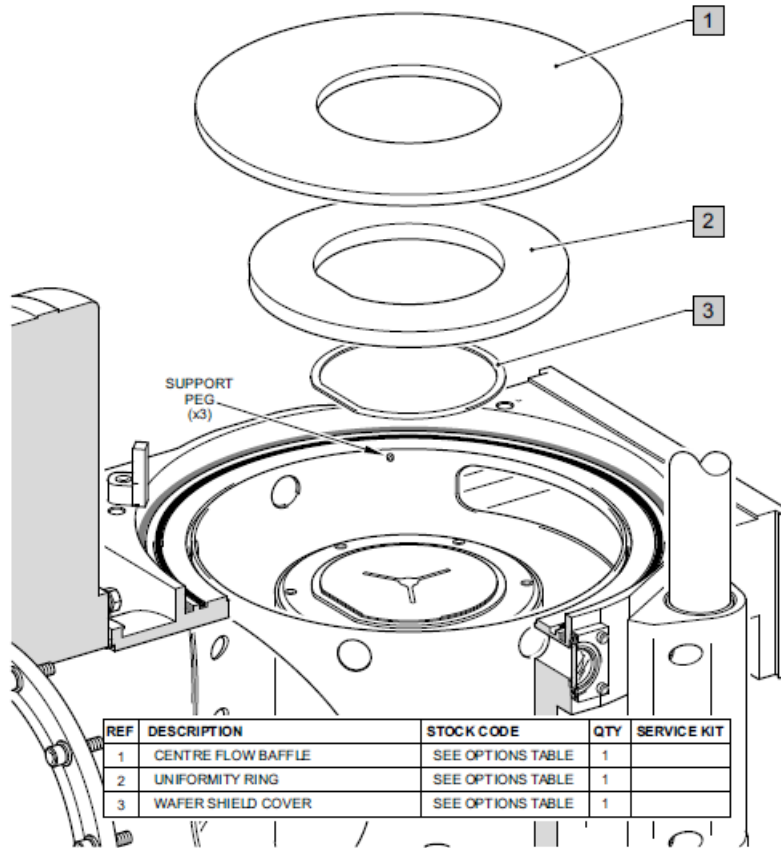
Oksidoitujen kiekkojen syövytyksissä vanhempien laitteiden kammioilla DRIE\_02A ja DRIE\_02B näkyi samankaltaisuutta, kun sovitettiin suoran yhtälöt epäsymmetriakäyrien kuvaajiin 28, 29, joissa suoran kulmakertoimella on selvä korrelaatio kiekon paikoituksessa alustalla. Kiekon paikoituksen ollessa liian vasemmalla saatiin kulmakertoimen arvoksi suuri positiivinen ja kiekon ollessa liian oikealla suuri negatiivinen. Tutkimustulokset osoittavat, että mitä lähempänä DRIE\_02A ja DRIE\_02B kammioilla kulmakerroin on nolla-arvoa ( $k = 0$ ) eli suora on x-akselin suuntainen, sitä optimaalisempi kiekon keskitys on keskellä alustaa. Uudemmissa laitteistoilla ei näkynyt ollenkaan korrelaatiota sovitun epäsymmetrian suoran yhtälöissä, mikä saattaa johtua kehittyneistä etsauslaitteistoista sekä syövytysalustan reunalla plasmaa ohjaavasta sekä suojaavasta yhdenmukaisesta kauluksesta (engl. uniformity ring). Kuvassa 30 näytetään uniformity ring -kaulus räjäytyskuvassa.



Kuva 28. Sovitetut suoranyhtälöt mittapisteistä kiekkojen epäsymmetriatutkimuksessa DRIE\_02A



Kuva 29. Sovitetut suoranyhtälöt mittapisteistä kiekkojen epäsymmetriatutkimuksessa DRIE\_02B



Kuva 30. Uudempien etsausalustojen plasmaa ohjaava yhdenmukainen kaulus (engl. Uniformity ring) kohta 2

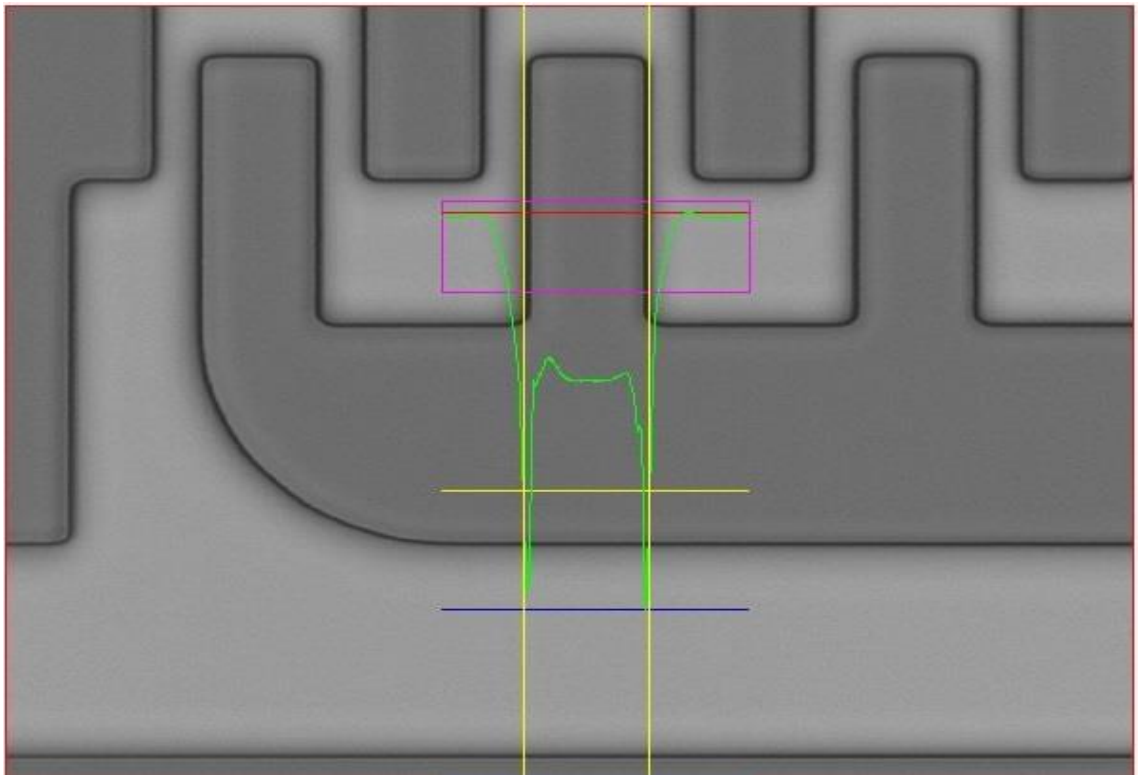
Uudempien syövytysalustojen vertailussa DRIE\_04D:n syövytysalustan oksidinkulutus oli kuitenkin suurempi kuin DRIE\_05A:n, mikä johtui halkaisijaltaan isommasta yhdenmukaisesta kauluksesta (kuvat 24,25). Täten kiekon paikoitusta pystyttiin muuttamaan DRIE\_04D:ssä jopa 3 mm eri suuntiin etsausalustalla. Etsattaessa Drie\_05A:lla kiekon paikoituksen muutoksella ei ollut suurta vaihtelua oksidinkulutuksessa.

#### 5.4 Viivanleveysmittaustulokset

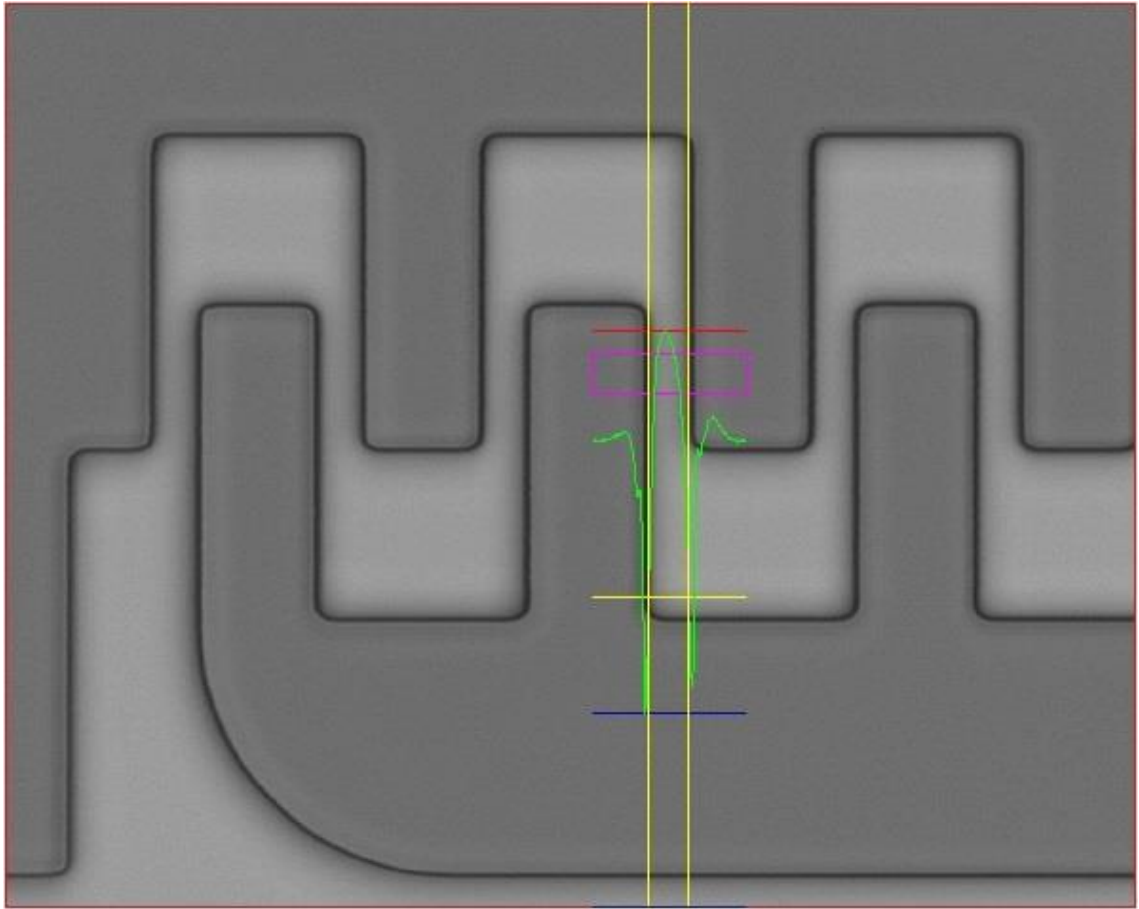
Viivanleveydet mitattiin kolmelta kiekolta per kammio, yhteensä 12 kiekkoa. Mitattavien kuviointikiekkujen paikoitukset kammion syövytysalustalla olivat vasemman ja oikean ääripäät sekä keskeltä. Kuvassa 22 kiekkokartalta katsottuna kiekkoilta mitattiin x-vaakasuunnassa elementit oikealta vasemmalle niin, että reunalta mitattiin tiheämmin ja keskeltä harvemmin. Kuvissa 31 ja 32 näytetään kuviointikiekkujen elementtirakenteen mittaukset kamman ja kamparaon leveyksistä. Ensimmäiseksi mitattiin kammanleveys ennen syövytystä ( $KE$  (nm)) ja syövytyksen jälkeen ( $KJ$  (nm)), jonka jälkeen laskettiin kammanleveyden muutos: ennen syövytystä vähennettynä syövytyksen jälkeen. Kamparaon leveydenmuutoslaskennassa oli otettava huomioon, että syövytyksessä raon leveys kasvaa, jolloin leveydenmuutoslaskennassa positiivisen arvon säilyttämiseksi oli laskettava kamparaonleveys syövytyksen jälkeen ( $RJ$  (nm)) vähennettynä kamparaonleveys ennen syövytystä ( $RE$  (nm)).

$$KE \text{ nm} - KJ \text{ nm} = +n \text{ nm kammanleveyden muutos (1)}$$

$$RJ \text{ nm} - RE \text{ nm} = +n \text{ nm kamparaonleveyden muutos (2)}$$



Kuva 31. Kamman viivanleveysmittaus



Kuva 32. Kamparaon viivanleveysmittaus

Viivanleveysmittaustuloksenkuvat löytyvät liitteestä 2.

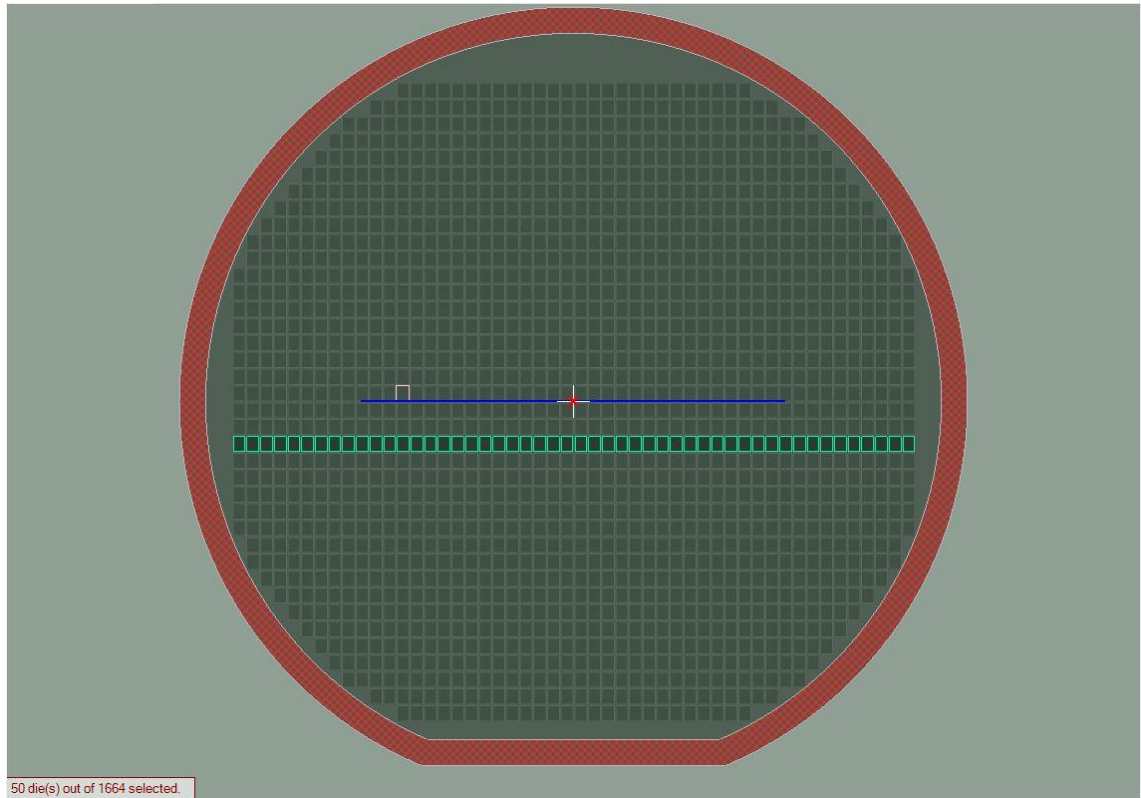
Kuviointikiekon viivanleveysmittaustuloksista vanhoilla DRIE\_02A- ja DRIE\_02B-laitteilla saatiin pientä muutosta aikaiseksi kammanleveysmittauksissa, joissa kiekko oli liikaa vasemmalla ja kiekko liikaa oikealla. Mittaustuloksista oli nähtävissä kiekon vasemmassa reunassa enemmän allessyöpymistä kuin kiekon oikeassa reunassa, silloin kun kiekko oli liikaa vasemmalla. Kiekon ollessa liian oikealla suojaavan oksidimaskin allessyöpymämuutokset olivat suuremmat oikeassa reunassa kuin vasemmassa reunassa. Kiekon ollessa keskellä alustaa syövytys oli mittaustuloksien mukaan tasainen kiekon molemmilla reunoilla. Kamparaon leveyden mittaustulokset heittelevät niin paljon, ettei paikoituksen ja raon muutoksessa ole mitään korrelaatiota.

DRIE\_04D-kammion viivanleveysmittaustulokset osoittavat, että muutokset kampojen ja kamparakojen leveyksissä ovat suorassa korrelaatiossa kiekon paikoituksessa liian vasemmalla ja oikealla sekä keskellä. Liian reunassa kamparaken- teessa tapahtuu leveää oksidimaskin allesyöpymistä, kun taas kiekko syövytysalus- tan keskellä kammanleveys- ja kamparaon viivanleveysmuutokset ovat yhtä suuret. Viivanleveysmittaustulokset toimivat DRIE\_04D-etsauskammion kiekkoilla todella hyvin, kun halutaan tutkia kiekkojen etsauksen muutosta kamparakenteissa. Kam- parakenteissa tapahtuu piin isotrooppista syöpymistä suojaavan oksidimaskin alta silloin kun kiekko on liian reunassa etsausalustalla.

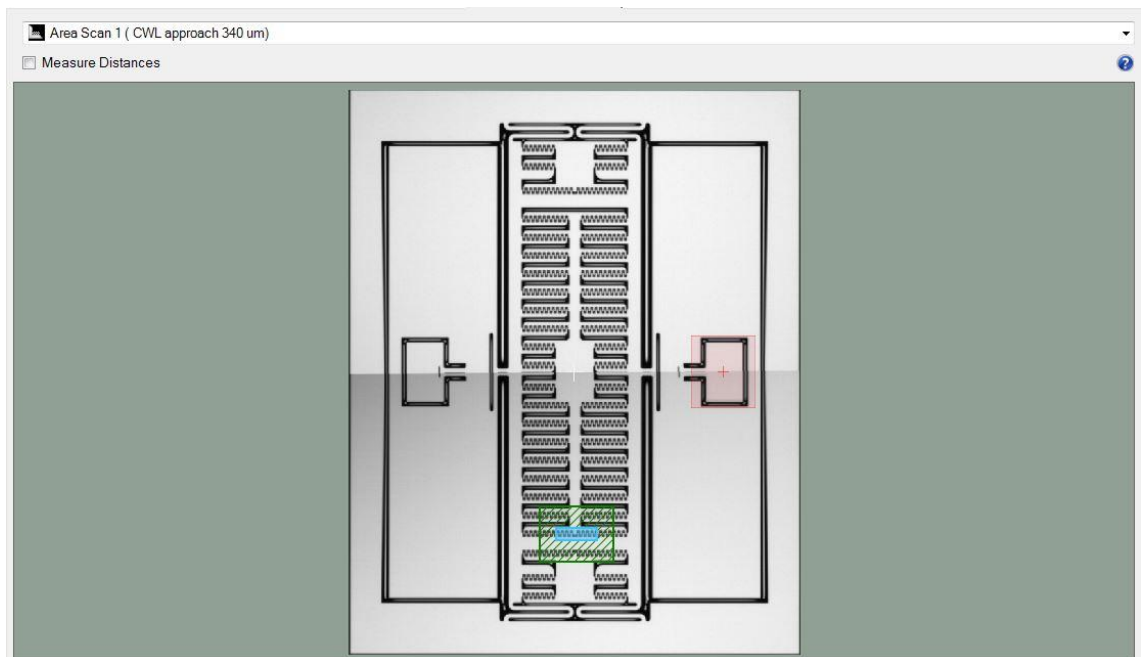
DRIE\_05A-kiekon paikoituksissa ei suurta vaihtelua löytynyt kamman- ja kampara- onleveyksissä, koska kiekkoa pystyi liikuttamaan DRIE\_05A-syövytysalustalla niin vähän, mutta DRIE\_04D-syövytysalustalla selvästi enemmän.

## 5.5 Profiilisyvyysmittaukset elementeiltä

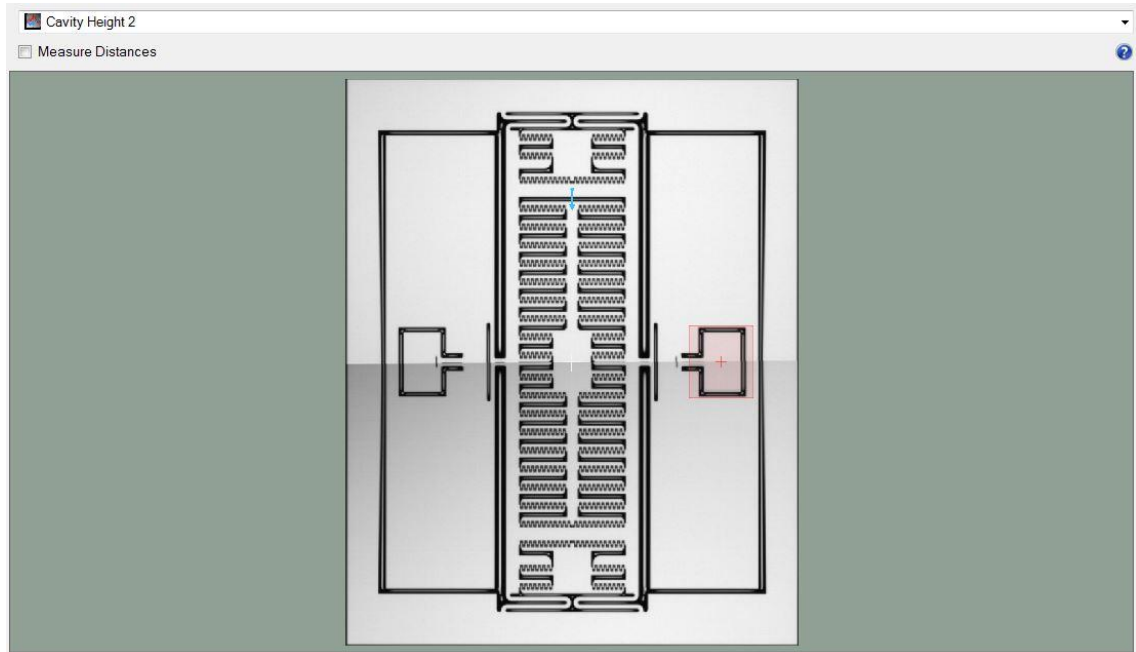
Kuvointikiekkojen profiilisyvyudet mitattiin optisella profilometrillä. Kuvassa 33 lait- teen mittausohjelman kartalta näytetään kiekolta mitattavat elementit vasemmalta oikealle vaakasuunnassa (vaaleanvihreä neliöriivi). Mittausreseptiin ohjelmoitiin ku- vissa 34, 35 ja 36 jokaiselta elementiltä kolme mitattavaa syvyysaluetta. Urien sy- vyysmittauksista poikkeaa kuvan 34 kampa-alueen alueskannaus, jossa laitteen optiikka skannaa elementtiura-alueen ja laskee ura-alueen syvyyksistä keskiarvon.



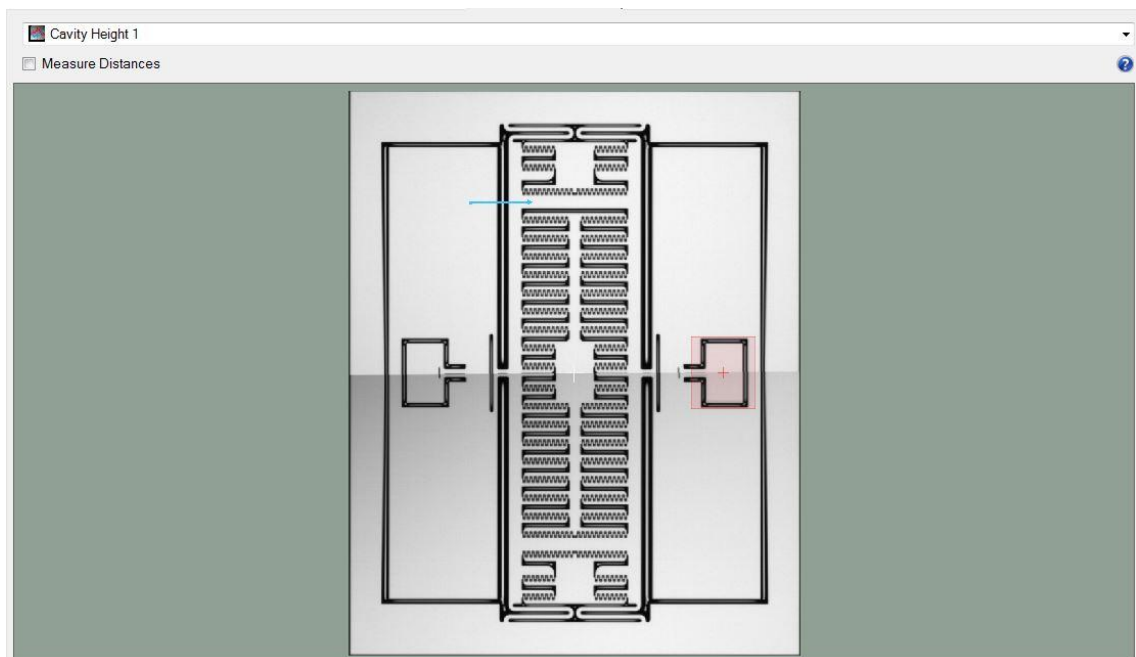
Kuva 33. Syvyysmittaukseen valitut elementit kiekkokartalta profilometriohjelmasta



Kuva 34. Elementiltä kamparakenteen alueskannaus (sininen alue)



Kuva 35. Elementiltä poikittaisuran syvyys (sininen nuoli)



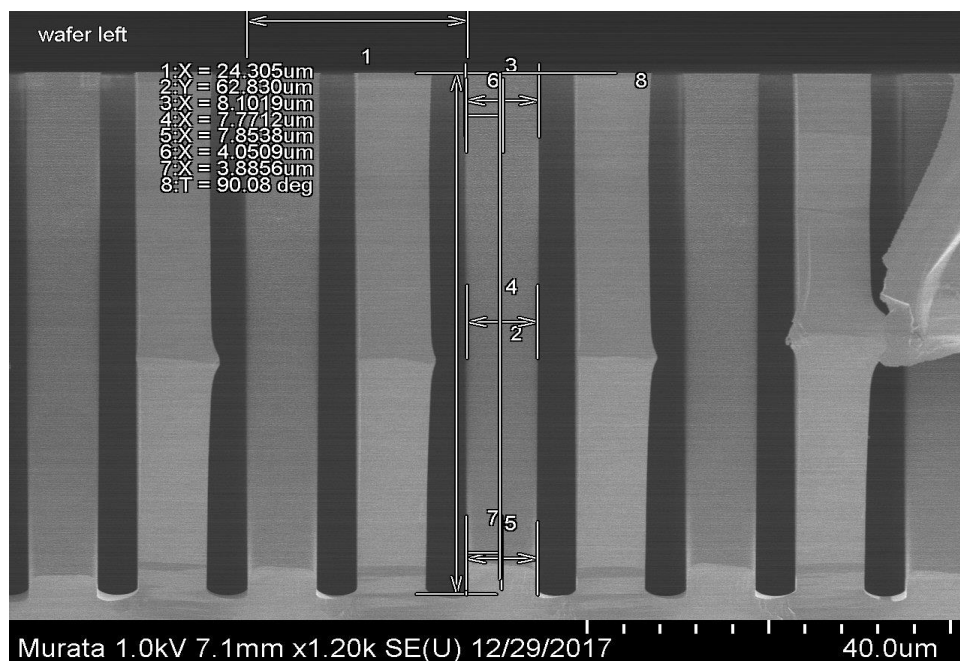
Kuva 36. Elementiltä pystysuoran uran syvyys (sininen nuoli)

Kiekoilta mitattiin kolme eri syvyyttä vaakasuunnalta olevilta elementeiltä. Kaikilta syvyysmitatuilta kuviointikiekoilta voi päätellä plasmasyövytyksen aggressiivisuuden reunimmaisissa elementeissä, missä urasyvyydet ovat suurempia kuin kiekon keskellä olevissa syövytysurissa. Tutkimustulokset osoittavat, että DRIE\_02A- ja

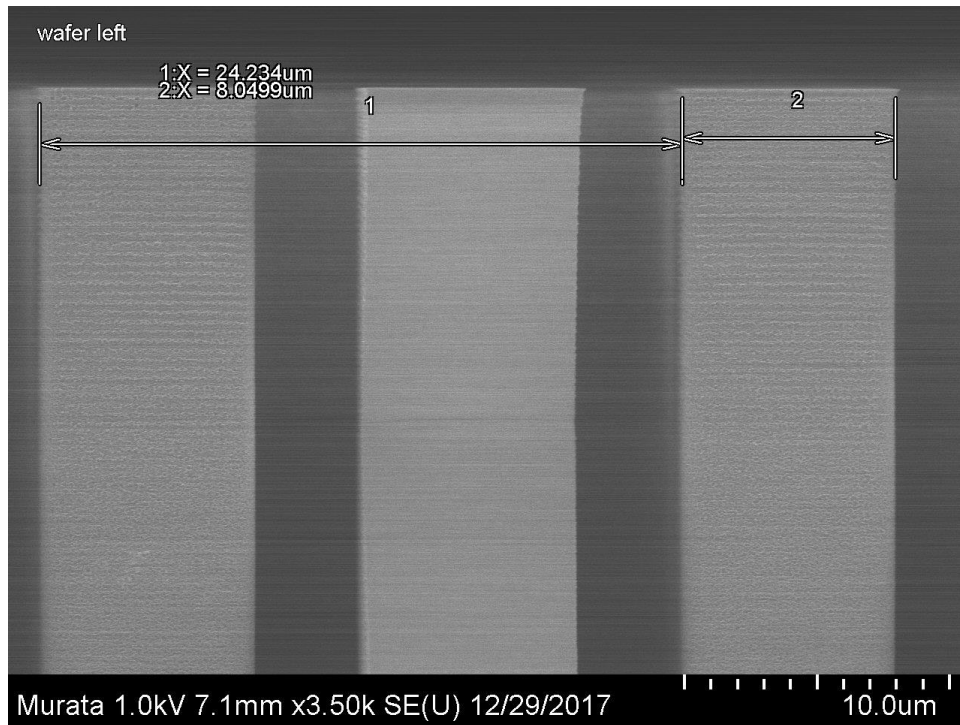
DRIE\_02B-etsauskammioilla sekä uuden laitteen DRIE\_05A syvyystuloksissa ei kiekon paikoituksen vaihtelusta huolimatta näy suurta eroa elementeillä olevien urien syvyyksissä, kun taas DRIE\_04D:n syvyystuloksien urissa on huomattavat syvyyserot kiekon ollessa liikaa vasemmalla tai oikealla. Keskellä alustaa DRIE\_04D-etsauskammion kiekkojen urien syvyydet ovat tasaiset.

## 5.6 Kamparakenteen profiilivariaatio- ja kammankulma-astetulokset

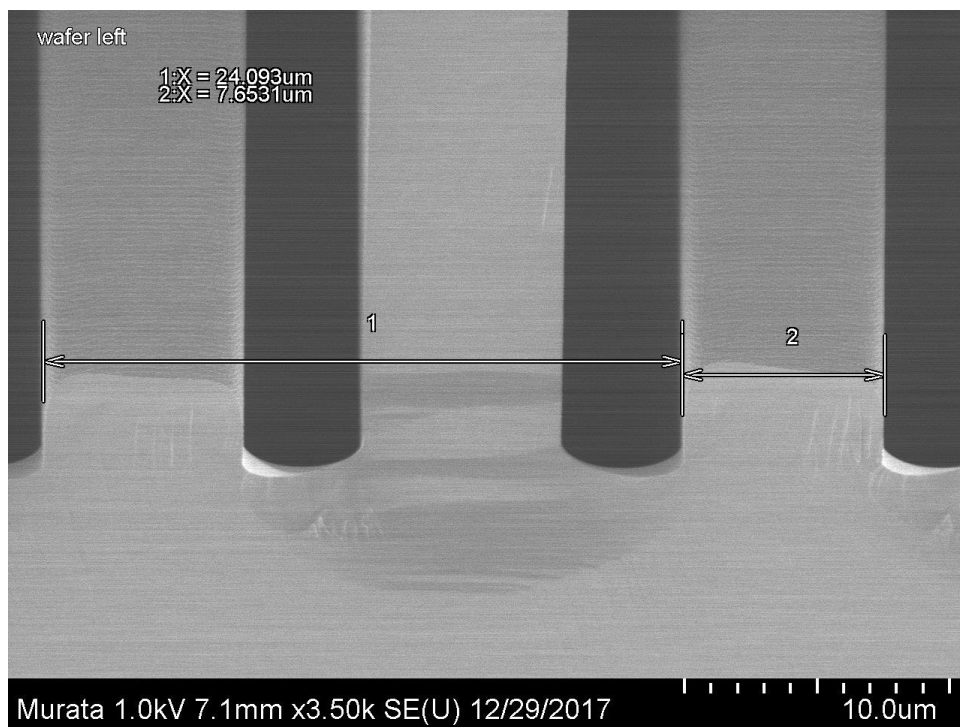
Rikkomattomien NDT-testausten (engl. nondestructive testing) jälkeen kuviointikiekoille tehtiin DT-kokeet (engl. destructive testing). Näyte valmistettiin halkaisemalla kuviointikiekko timanttikynällä ja laittamalla se pyyhkäisyelektronimikroskooppikammioon poikkileikkauskuvan tarkastukseen. Kuvissa 37, 38, 39, 40 näytetään näytteiden poikkileikkauskuvista otettujen rakenteiden kuvan viivanpituus eli pisteväli (engl. dot pitch), joka kuvaa kuva-alkioiden etäisyyttä näytöllä. Kuva-alkioiden pituudet tulisivat olla samat eri suurennoksilla (x1,2k, x3,5k), syvyys, leveys sekä kulma-asteiden mitat kuviointikiekon poikkileikkauskuvan avulla.



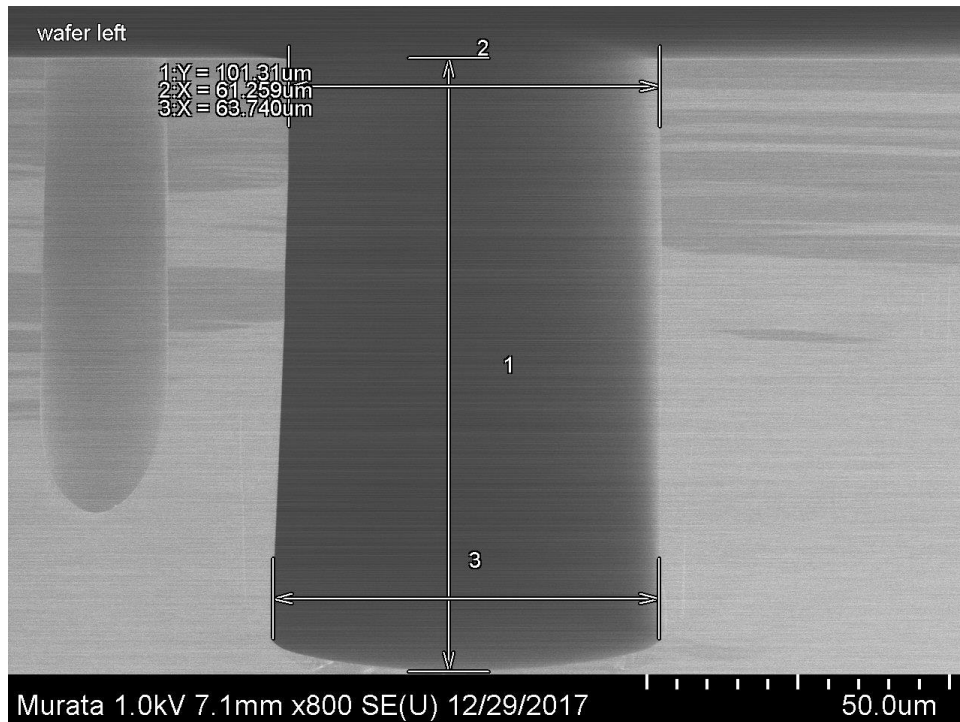
Kuva 37. Poikkileikkauskuva kuviointikiekon näytemittauksesta. 1:X = pisteväli, 2:Y = kammankulman syövytysurien syvyys, 3:X= kammankulmanpylvässtruktuurin leveys ylhäältä, 4: X= kammankulmanpylvässtruktuurin leveys keskeltä, 5:X= kammankulmanpylvässtruktuurin leveys alhaalta, 8:T= kammankulmanpylvässtruktuurin kulma-asteet



Kuva 38. Kammanpylväsrakenteen pylvään leveysmittaus ylhäältä isommalla suurennoksella. 1:X = pisteväli, 2:X = kamparakenteen leveys ylhäältä.



Kuva 39. Kammanpylväsrakenteen pylvään leveysmittaus juuresta isommalla suurennoksella. 1:X = pisteväli, 2:X = kamparakenteen leveys juuresta.

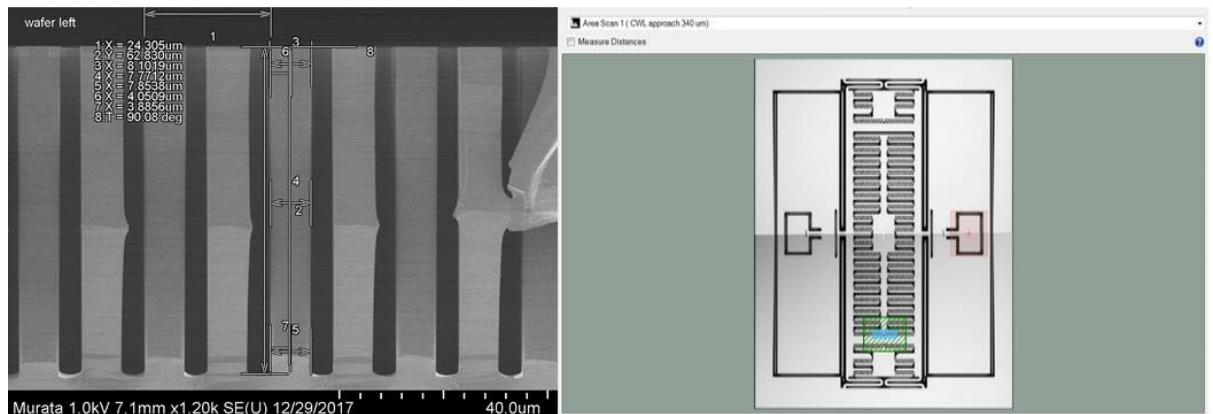


Kuva 40. Elementin pystysuoran uran mitat 1: Y = syvyys, 2:X uranleveys ylhäältä, 3:X uran leveys alhaalta.

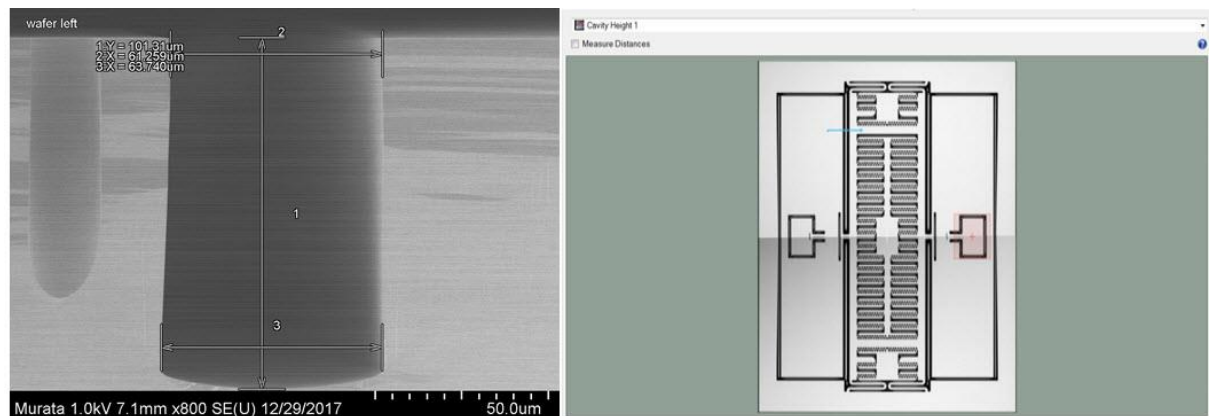
Liitteessä 4 (Profiilivariaatio ja rakenteen kulma-aste pyyhkäisyelektronimikroskopipimittautulokset) kaikkien kuivasyövytyskammioiden kiekkojen tuloksista näkee, että kiekon paikan siirto alustalla ei ennustettavasti näy profiilivariaatiomuutoksessa mitatuissa rakenteissa pyyhkäisyelektronimikroskopin mittaustarkkuudella.

## 6 Eri mittausmenetelmien vertailu

Kuvien 41 ja 42 mittauskohtien poikkileikkaus ja optisen profilometrin tulokset suurimmassa määrin korreloivat toisiaan, kun mitattiin optisella profilometrillä ensimmäiseksi elementtialueen kamparakenteen alueskannaus ja ison uran syvyys, minkä jälkeen näytepalan poikkileikkauksuvasta mitattiin pyyhkäisyelektronimikroskopilla samoilta alueilta. Korrelaatio näkyy tarkasteltaessa pylväskuvaajia liitteestä 5 (eri mittausmenetelmien vertailu).



Kuva 41. Kamarakenteen poikkileikkauskuva ja optisen profilometrin kamarakenteen alueskannaus



Kuva 42. Ison uran poikkileikkauskuva ja optisen profilometrin iso uran mittaus (sininen nuoli)

## 7 Kokeiden suorituksen tarkastelua

Kokeiden suunnittelu ja toteutus menivät hyvin. Kiitos siitä kuuluu kehitystiimin insinöörille Antti Huhtaselle, joka oli suurena apuna kokeiden toimeksiannossa ja teknisenä tukena. Kokeiden jälkiviisautena olisi sanottava, että oksidiekikkojen tulokset olivat hyviä ja niiden implementointi vanhojen kuivasyövytysalustojen kiekonkeskitysmonitorointiin on varteenotettava kehystoimenpide. Mahdollisesta kuviointiekikon suunnittelusta kyseiselle vaakasuunnan elementtien tarkastukselle olisi hyvä suunnitella omanlaisensa, kun halutaan nimenomaan tutkia reunimmaisten ja keskimmäisten elementtien rakenteita vaakasuunnassa kiekolta. Erityisesti poikkileikkauksia pyyhkäisyelektronimikroskoopilla oli hankala saada viimeiseltä elementiltä ennen reunaa, kun timanttikynällä halkaisussa halkeamaa oli vaikeata kontrolloida mistä kohdin mikrometriä kokoista elementtialuetta halkeama kulkee. Parhaim-

mat halkaisut onnistuivat viimeisimmältä elementiltä ennen reunaa, useammat toiseksi viimeiseltä ja huonoimmat neljänneksi viimeiseltä elementiltä. Vanhempien syövytyslaitteiden syövyttämällä kuviointi kiekkoilla viivanleveysmittaukset onnistuivat pelkästään kammanleveysmittauksessa. Uudemmallalla DRIE\_04D-syövytyslaitteella kiekkojen viivanleveysmittaukset onnistuivat hyvin sekä kampojen että kamparakojen leveysmittauksissa. Oksidimaskin ja paljaan piin viivanleveysmittauksissa oli käytettävä eri ohjelmaa juuri reunantunnistuksen valotehosäätöjä varten. Mittaus tehtiin ensin mattapintaiselta oksidimaskilta ja lopuksi kirkaalta piikiekolta sen jälkeen, kun oksidimaski oli syövytetty pois fluorivetyhapolla.

Uusimman DRIE\_05A-laitteen syövytysalustan pienet muutokset kiekon paikoituksissa eivät erottuneet lainkaan tai muutokset olivat hyvin pieniä verrattuna DRIE\_02A-, DRIE\_02B- ja DRIE\_04D-laitteisiin. DRIE\_04D-kammion kuivasyövytysalusta oli tutkimuskohteena viivanleveysmittauksissa paras, josta pystyi näkemään kiekon paikoituksen muutoksen kammanleveyden sekä kamparaon leveydenmuutoksissa.

## **8 Johtopäätökset**

Oksidinpaksuusmittaustuloksista selvisi, että kiekon ollessa keskellä etsausalustaa etsatun oksidinpaksuus on tasaista molemmilla reunoilla. Kiekon ollessa reunemmalla alustalla oksidin paksuuserot kasvavat molemmilla reunoilla. Oksidin paksuuserot kasvoivat merkitsevästi, mitä enemmän kiekkoa sai liikuteltua etsausalustalla.

Viivanleveysmittauksissa kuvioidun kiekon keskityksen vaikutus kamparakenteen leveysmuutoksiin on tärkeää. Kiekon on oltava mahdollisimman keskellä alustaa, että elementtien kamparakenteen leveydet ovat tasaiset molemmilla puolilla kiekkoa. Tuotannossa elementtien automaattisessa visuaalisessa tarkistuksessa rakenteiden pitää olla yhteneväisiä, eivätkä elementit saa poiketa liikaa eri puolilla kiekkoa.

Profilometrillä mitatut syvyyserot korostuvat kiekon ollessa reunemmalla. Huomiotavaa kaikissa laitteissa on se, että plasmaetsaus on aggressiivisempaa kiekon reunoilla eli urat ovat syvemmät reunimmaisissa elementtien kamparakenteissa kuin

kiekon keskellä tämä vielä korostuu, kun kiekkoa liikutetaan eri puolille reunaa syövytysalustalla.

Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvien profiilivariaatioista ja kulma-asteista katso-  
malla on hankalaa ja aikaa vievää tarkastaa kiekon keskityksen merkitystä. Laitte on  
kiekon keskityksen tutkimiseen kyvytön.

Etsauslaitteiden välillä isoin ero oli vanhemmissa DRIE\_02-laitteissa, joissa on iso  
etsausalusta ilman plasmaa ohjaavaa yhdenmukaista kaulusta, kiekon siirrot eivät  
vaikuta kamman- ja kamparaonleveyksiin niin paljoa kuin esimerkiksi DRIE\_04D-  
kiekoilla. Uusimmalla DRIE\_05-syövytysalustalla kiekkoa pystyi siirtämään ylipää-  
tään niin vähän, että kiekkojen väliset erot eivät kyenneet kasvaa suuriksi.  
DRIE\_04D-kammioita voitiin tilavammasta kauluksesta johtuen siirrellä enemmän  
jonka takia erot pystyivät kasvamaan suuriksi. Uusien laitteiden plasmaa ohjaava  
kaulus on varsin kehittynyt ja uusien ja parempien anturielementtikiekkojen tarkem-  
piin etsauksiin välttämätön.

## Lähteet

- 1 Company. 2017. Verkkoaineisto. Murata  
<https://www.murata.com/about/company/muratalocations/japan/headoffice/overview>. Luettu 22.1.2018
- 2 Mahdollisuuksia Muratalla. 2017. Verkkoaineisto. Murata Electronics Oy  
<https://careers.teamio.net/murata/>. Luettu 22.1.2018
- 3 Murata Electronics. 2016. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.  
[https://fi.wikipedia.org/wiki/Murata\\_Electronics](https://fi.wikipedia.org/wiki/Murata_Electronics). Päivitetty 04.10.2016. Luettu 22.1.2018.
- 4 Murata, internet-dokumentti, Murata-logo, <https://careers.teamio.net/murata/>
- 5 Puolijohdeteollisuus. 2013. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.  
<https://fi.wikipedia.org/wiki/Puolijohdeteollisuus>. Päivitetty 12.3.2013. Luettu 22.01.2018
- 6 Pii (alkuaine). 2017. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.  
[https://fi.wikipedia.org/wiki/Pii\\_\(alkuaine\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Pii_(alkuaine)). Päivitetty 8.5.2017. Luettu 22.1.2018
- 7 Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil Whites. 2004. MEMS Mechanical Sensors. 1.4 Why Silicon?
- 8 Piikiekon tarina. 2018. Verkkoaineisto. Okmetic.  
<https://www.okmetic.com/fi/yritys/piikiekon-tarina>. Luettu 22.1.2018
- 9 Sami Franssila. 2004. Introduction to Microfabrication. 1.2 SUBSTRATES. s.4
- 10 Veikko Lindroos, Teruaki Motooka, Sami Franssila, Mervi Paulasto-Krockel, Markku Tilli, Veli-Matti Airaksinen. Handbook of Silicon based mems Materials and technologies. 1 Properties of Silicon.
- 11 Piikiekkko. 2017. Verkkoaineisto. Wikimedia Foundation.  
<https://fi.wikipedia.org/wiki/Piikiekkko>. Päivitetty 5.2.2017. Luettu 22.1.2018
- 12 SEMI Wafer Flat M1-0302 Specifications, PDF-dokumentti,  
<http://www.sydor.com/wp-content/uploads/SEMI-Wafer-Flat-M1-0302-Specifications.pdf>
- 13 Microchemicals, internet-dokumentti.  
[https://www.microchemicals.com/products/wafer/from\\_the\\_ingot\\_to\\_finished\\_silicon\\_wafers.html](https://www.microchemicals.com/products/wafer/from_the_ingot_to_finished_silicon_wafers.html)

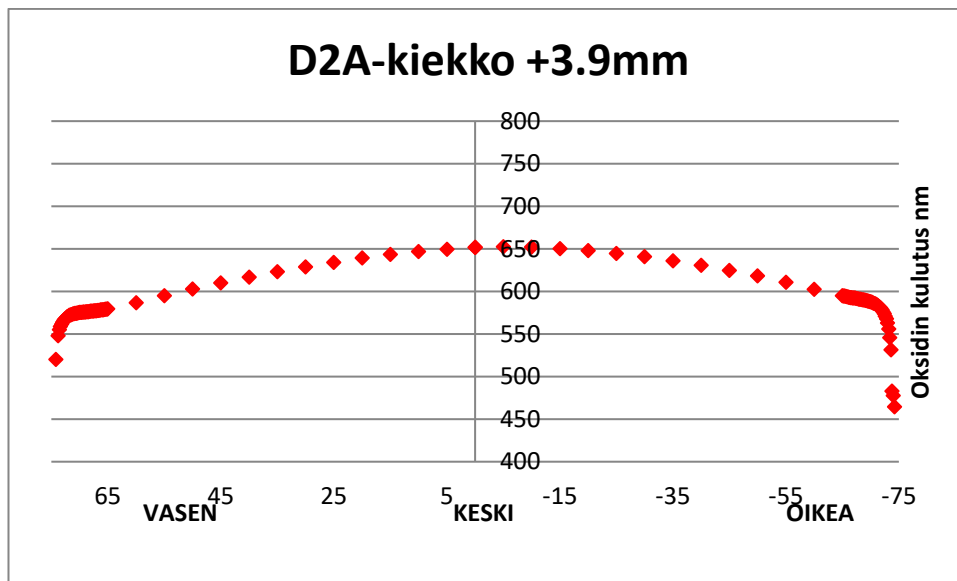
- 14 Lindroos, Veikko, Motooka, Teruaki, Franssila, Sami, Paulasto-Krockel, Mervi Tilli, Markku, Airaksinen, Veli-Matti. 2010. Handbook of Silicon based mems Materials and technologies. 5 Silicon Wafers, Preparation and Properties.
- 15 C.Y. Chang and S.M. SZE. 1996. ULSI technology. 5.1. Dielectric and Polysilicon Film Deposition. s.205.
- 16 Franssila, Sami. 2004. Introduction to Microfabrication, 13 Thermal Oxidation. 2. s.142.
- 17 Madou, Marc. Fundamental of Micofabrication. 3 Pattern Transfer with Additive techniques. Oxidation of Silicon.
- 18 Beeby, Stephen, Ensell, Graham, Kraft, Michael, White, Neil. 2004. MEMS Mechanical Sensors. 2.3.1 Deposition. 2.3.1.1 Thermal Growth. s.12.
- 19 Franssila, Sami. 2004. Introduction to Microfabrication. 9 Optical Lithography. s.99.
- 20 Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White. 2004. MEMS Mechanical Sensors. 2.3.2 Lithography. s.17.
- 21 Dosentti, Laurila, Tomi. Materiaalitieteen perusteet. PDF-dokumentti. [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/180350/mod\\_resource/content/1/S-113.2110.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/180350/mod_resource/content/1/S-113.2110.pdf). Luettu 22.1.2018.
- 22 Franssila, Sami. 2004. Introduction to Microfabrication. 11 Etching.
- 23 Beeby, Stephen. Ensell, Graham. Kraft, Michael. White, Neil. 2004. MEMS Mechanical Sensors. 2.3.3 Etching.
- 24 Process Training. SPTS. PDF-dokumentti. SPTS Process Training.pdf
- 25 Franssila, Sami. 2004. Introduction to Microfabrication. 11.4 Plasma Etching.
- 26 Bosch simple. 2009. Nanofab. PDF-dokumentti. [https://www.nanofab.ualberta.ca/wp-content/uploads/2009/05/bosch\\_simple.pdf](https://www.nanofab.ualberta.ca/wp-content/uploads/2009/05/bosch_simple.pdf). Luettu 22.1.2018.
- 27 Franssila, Sami. 2004. Introduction to Microfabrication. 2 Micrometrology and Materials Characterization. 2.2 Lateral and Vertical Dimensions s.17.

- 28 Hitachi, internet-dokumentti, CD-SEM - What is a Critical Dimension SEM?, <https://www.hitachi-hightech.com/global/products/device/semiconductor/cd-sem.html>
- 29 Lindroos, Veikko, Motooka, Teruaki, Franssila, Sami, Paulasto-Krockel, Mervi Tilli, Markku, Airaksinen, Veli-Matti. 2010. Handbook of Silicon based MEMS Materials and technologies. 16 Silicon Wafers and Thin Film Measurements. 16.4.3 Profilometry. s. 296.
- 30 Franssila, Sami. 2004. Introduction to Microfabrication. Micrometrology and Materials Characterization. 2.1 Microscopy and visualization.
- 31 Generic Transport Module Introduction. SPTS. PDF-dokumentti. User Manual pdf 1–5.

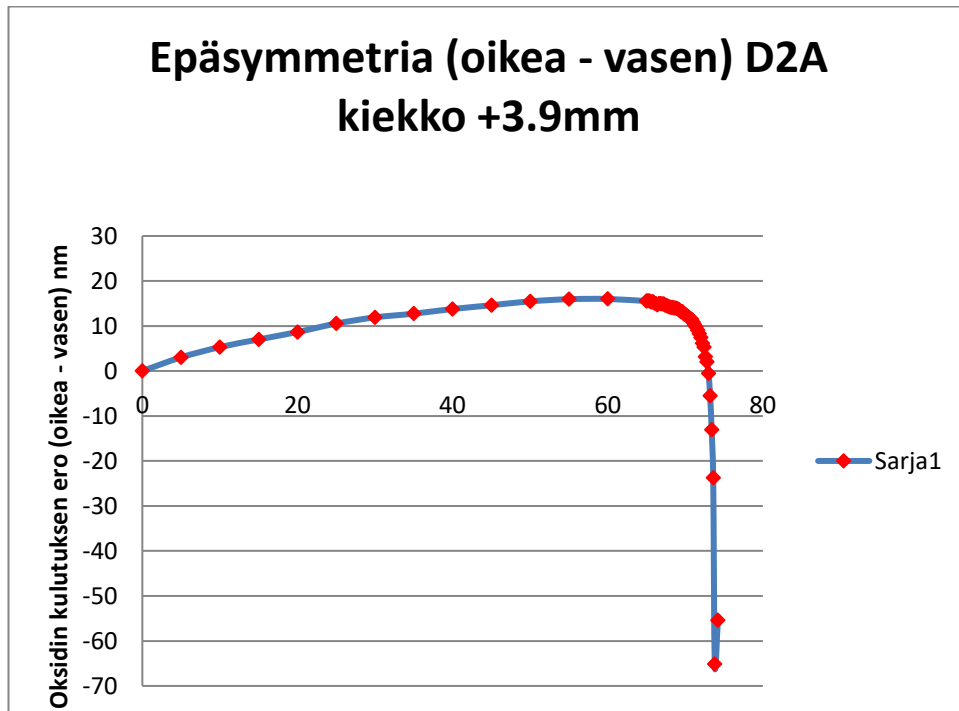
## Tutkimuksien Mittaustulokset

### DRIE\_02A

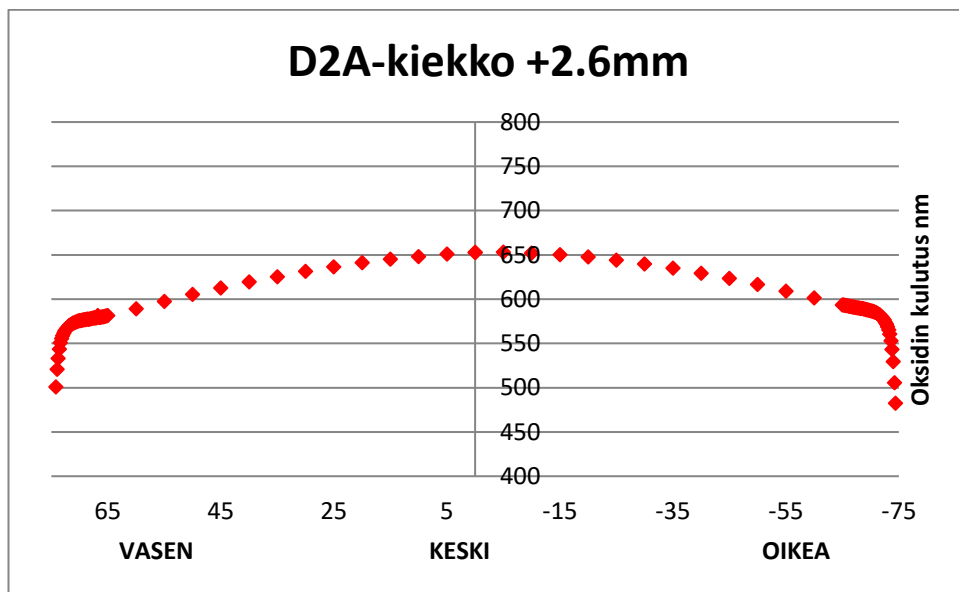
DRIE\_02A-kammion graafinen esitys eri paikoituksen oksidin kulutuksesta kuvat 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13. Graafinen esityskiekon epäsymmetriasta kuvat 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14. Graafinen esitys sovitun epäsymmetrian yhdistetyt suoran yhtälö kiekot kuva 15. Suoran yhtälöt ja selitysasteet taulukko 1.



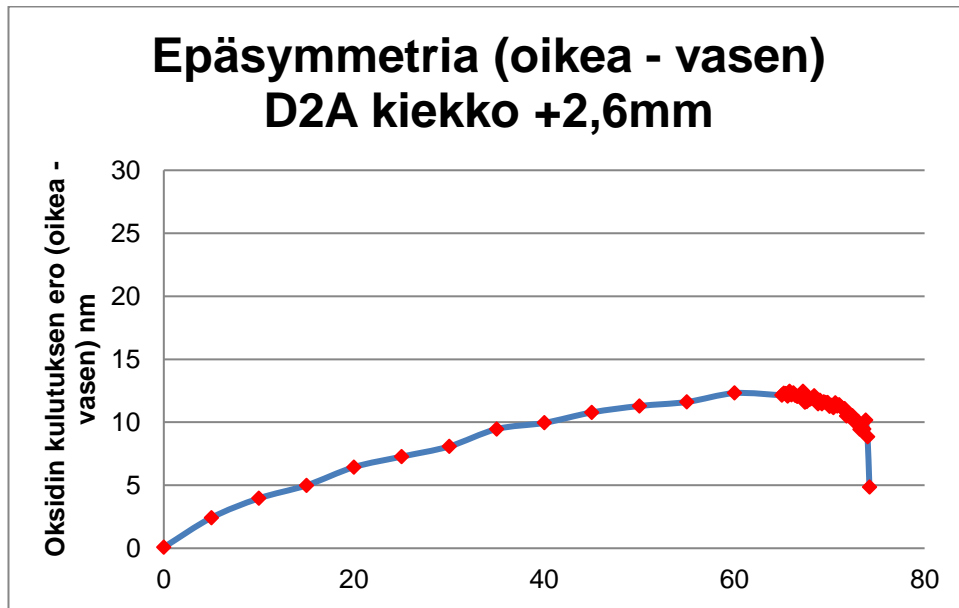
Kuva 1. Oksidin kulutus, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.



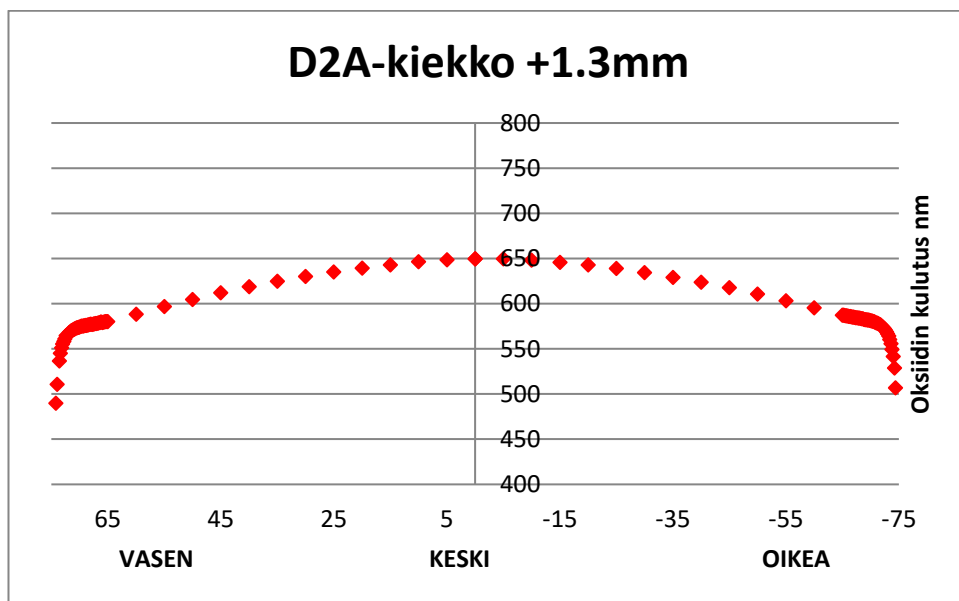
Kuva 2. Oksidin kulutuksen epäsyymerria, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.



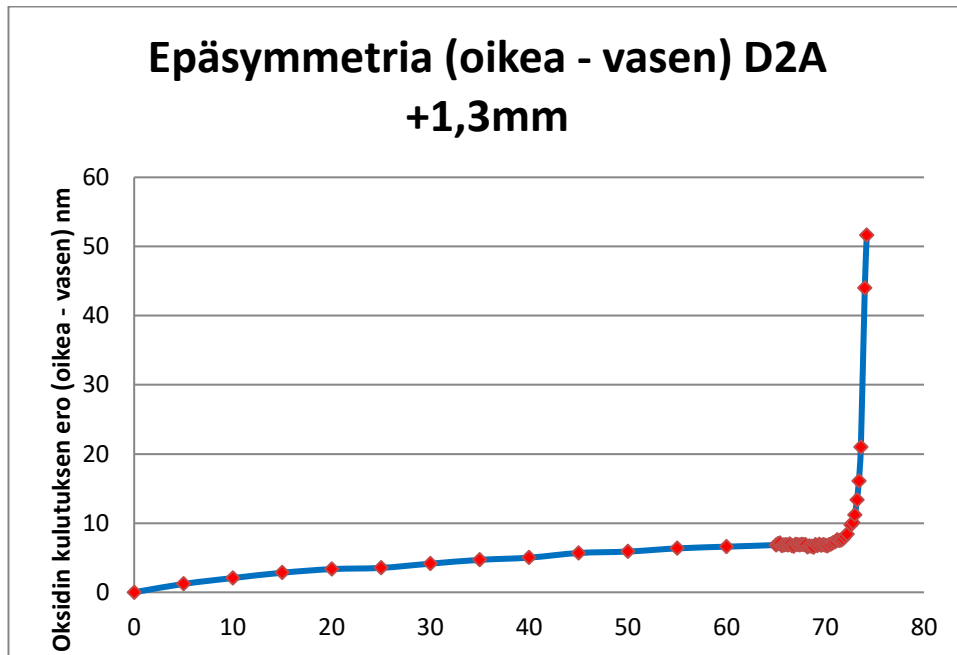
Kuva 3. Oksidin kulutus, kiekko 2,6 mm vasemmalla keskipisteestä.



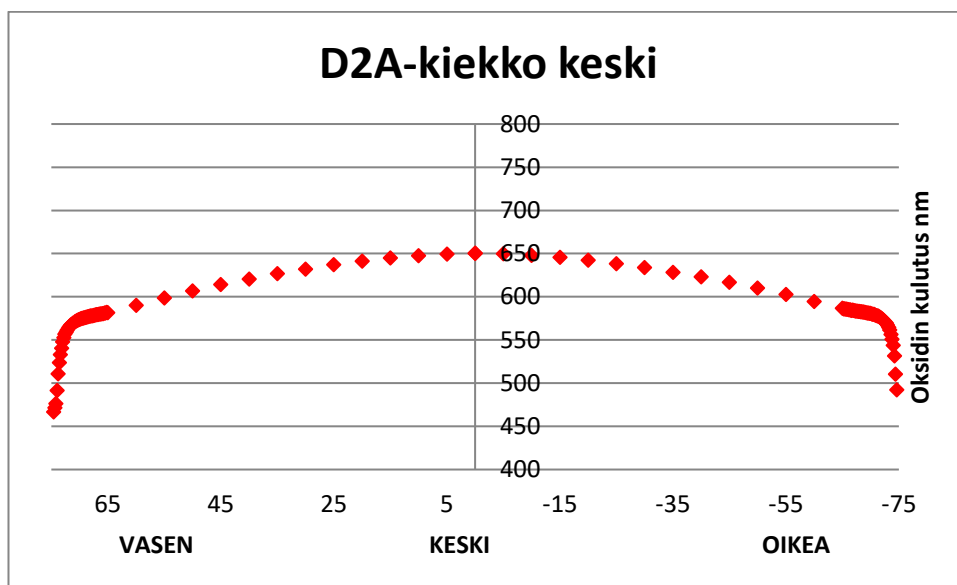
Kuva 4. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 2,6 mm vasemmalla keskipisteestä.



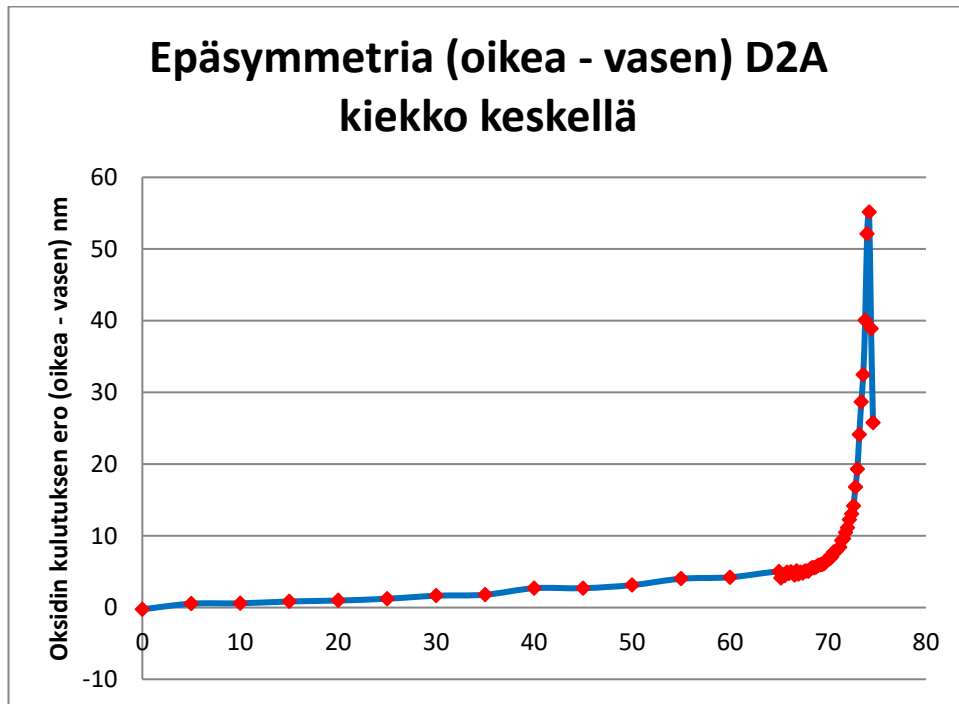
Kuva 5. Oksidin kulutus, kiekko 1,3 mm vasemmalla keskipisteestä.



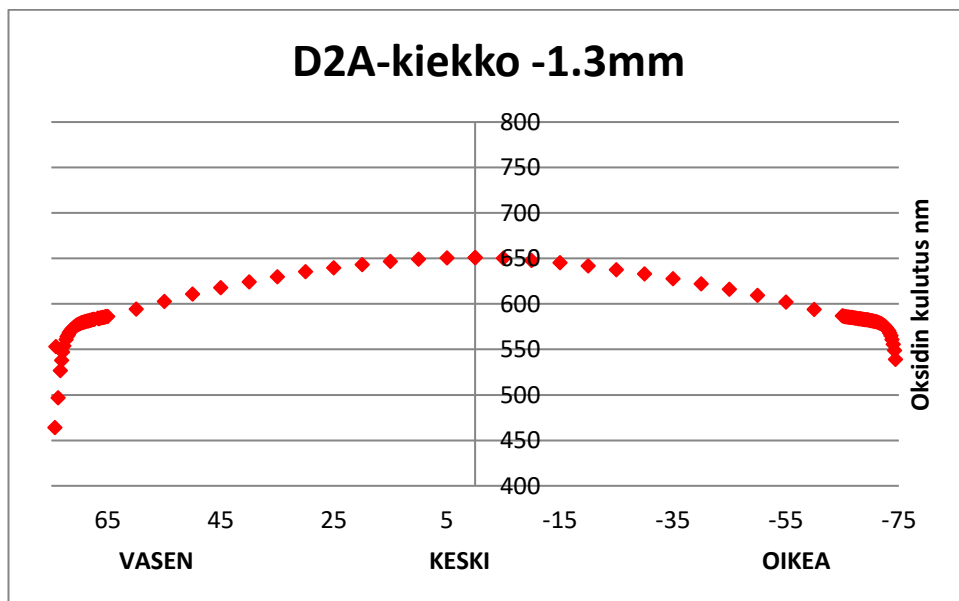
Kuva 6. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 1,3 mm vasemmalla keskipisteestä.



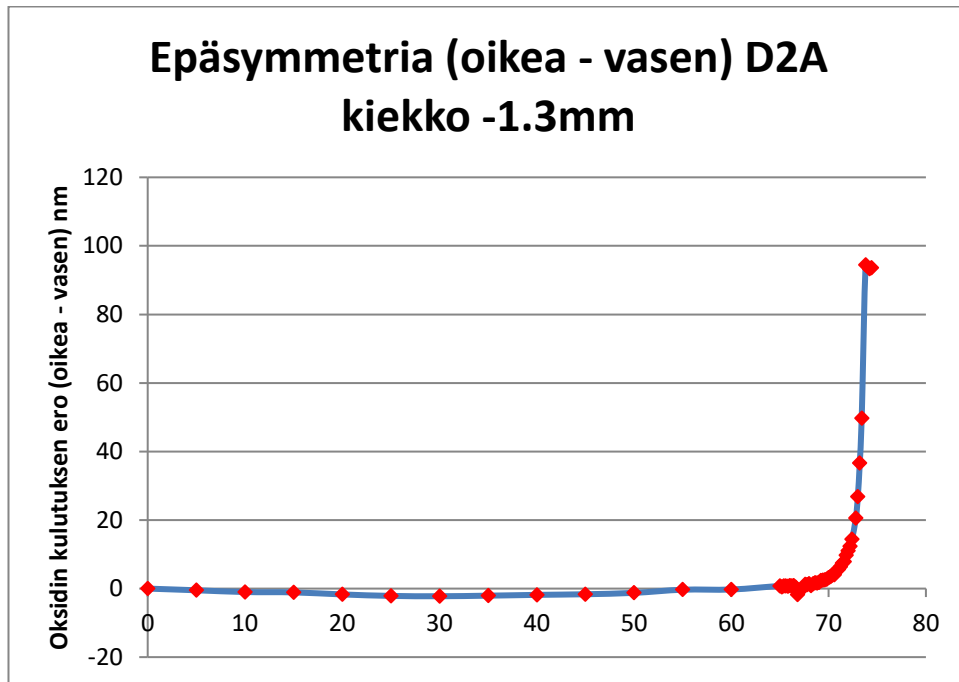
Kuva 7. Oksidin kulutus, kiekko keskellä keskipisteessä.



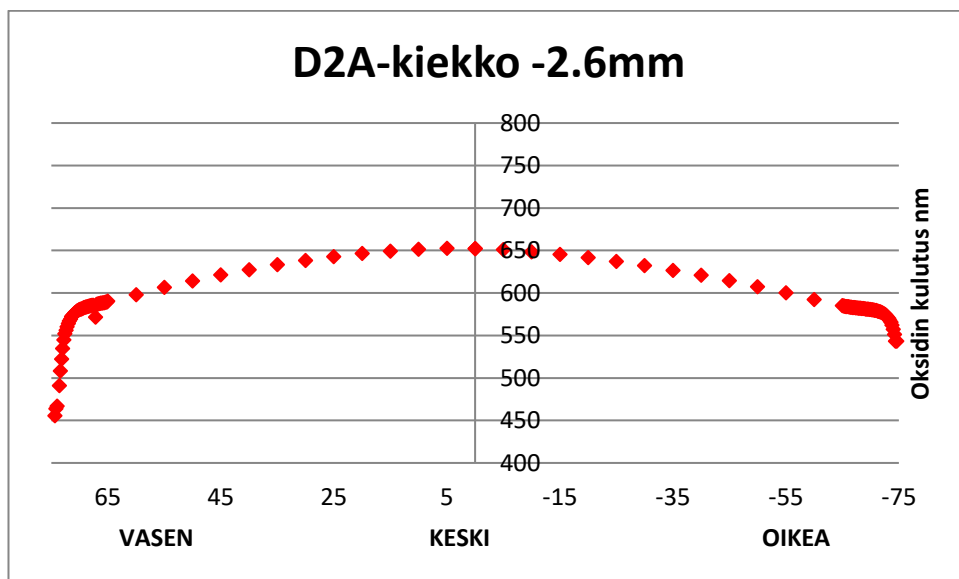
Kuva 8. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko keskellä.



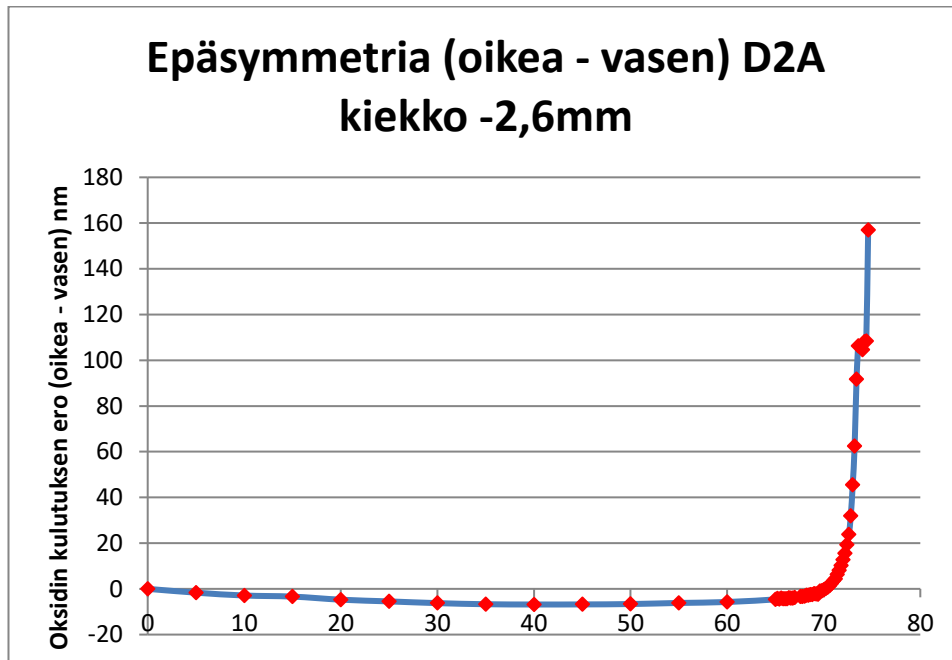
Kuva 9. Oksidin kulutus, kiekko 1,3mm oikealla keskipisteestä.



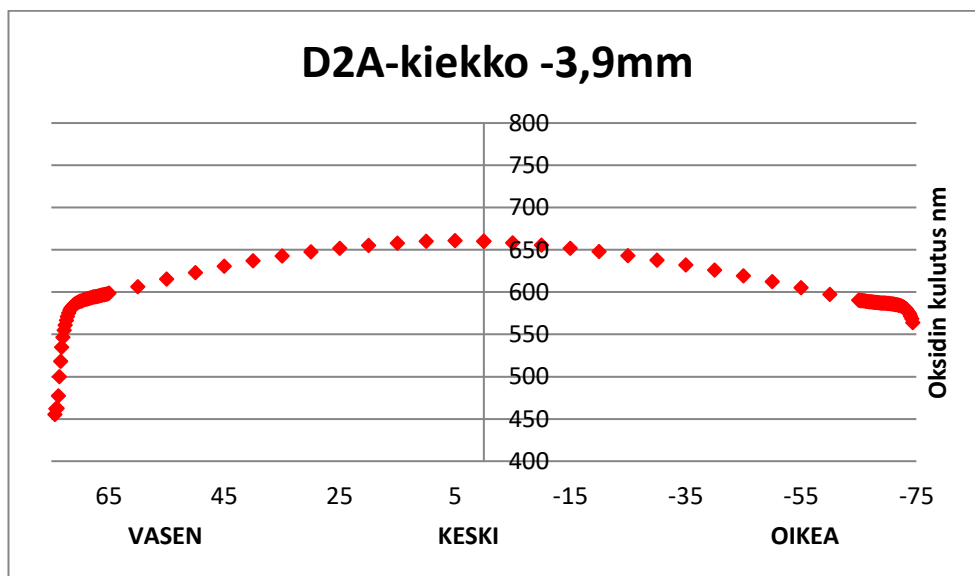
Kuva 10. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 1,3 mm oikealla keskipisteestä.



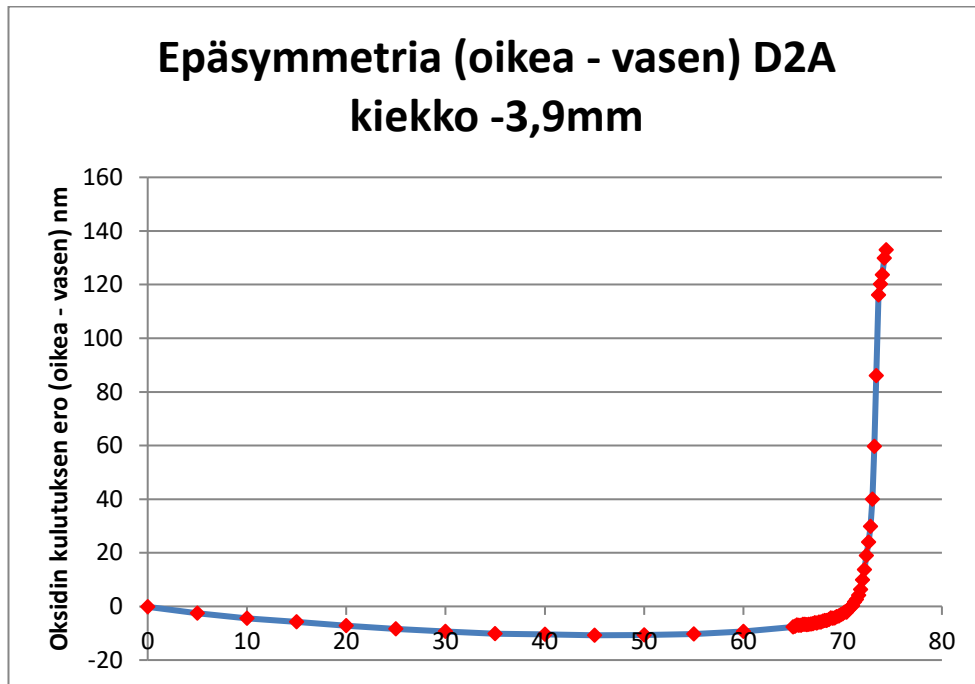
Kuva 11. Oksidin kulutus, kiekko 2,6 mm oikealla keskipisteestä.



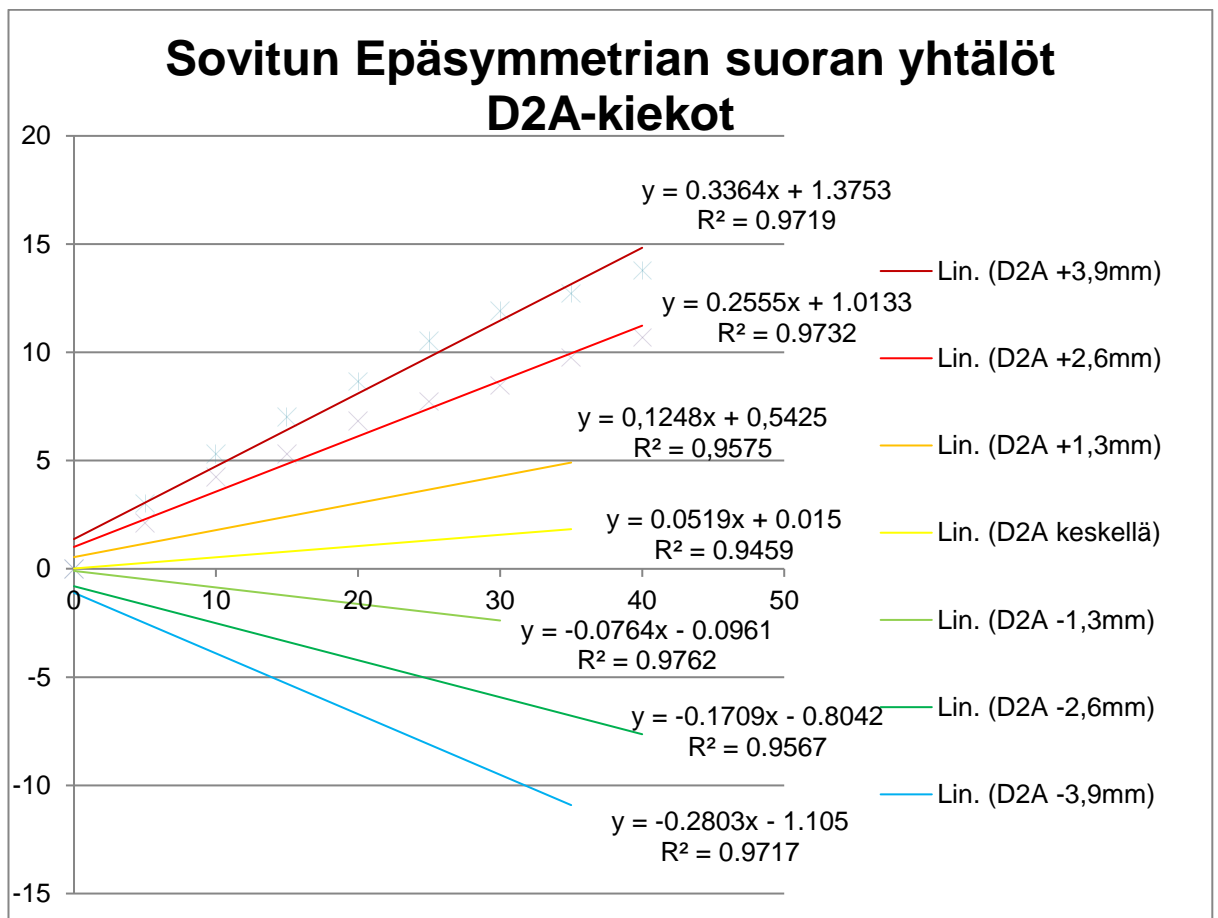
Kuva 12. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 2,6 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 13. Oksidin kulutus, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 14. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.



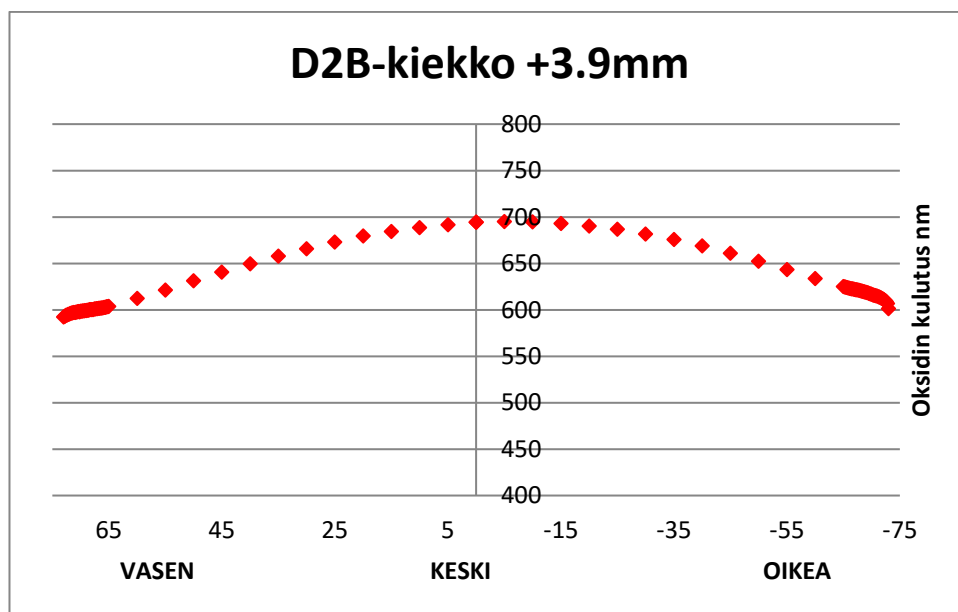
Kuva 15. Sovitun epäsymmetrian yhdistetyt suoran yhtälö kiekot

Taulukko 1. DRIE\_02A-kammion suoran yhtälöt ja selitysasteet

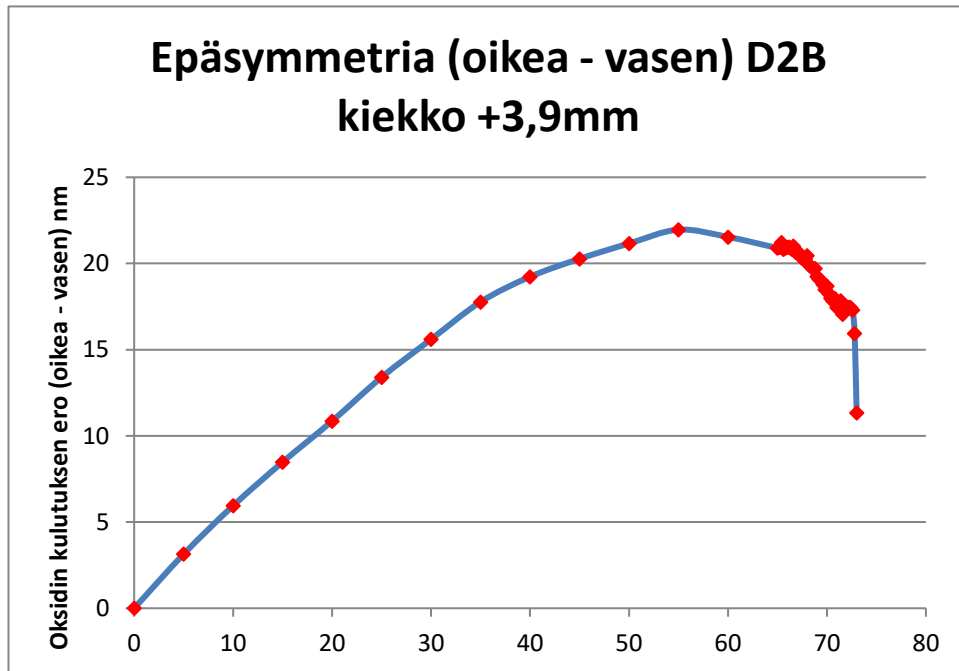
Drie2A	suoran yhtälö y=	R <sup>2</sup>
+3,9mm	$0.3364x + 1.3753$	0.9719
+2,6mm	$0.2555x + 1.0133$	0.9732
+1,3mm	$0.1248x + 0.5425$	0.9575
keskellä	$0.0519x + 0.015$	0.9459
-1,3mm	$-0.0764x - 0.0961$	0.976
-2,6mm	$-0.1709x - 0.8042$	0.9567
-3,9mm	$-0.2803x - 1.105$	0.9717

**DRIE\_02B**

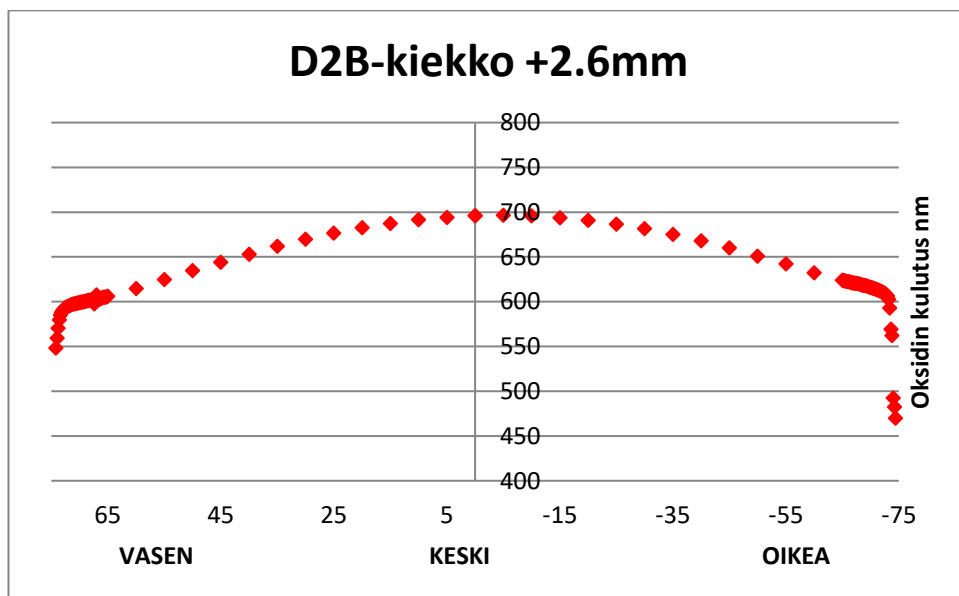
DRIE\_02B-kammion graafinen esitys eri paikoituksen oksidin kulutuksesta kuvat 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28. Graafinen esitys kiekon epäsymmetriasta kuvat 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29. Graafinen esitys sovitun epäsymmetrian yhdistetyt suoran yhtälö kiekot kuva 30. Suoran yhtälöt ja selitysasteet taulukko 2.



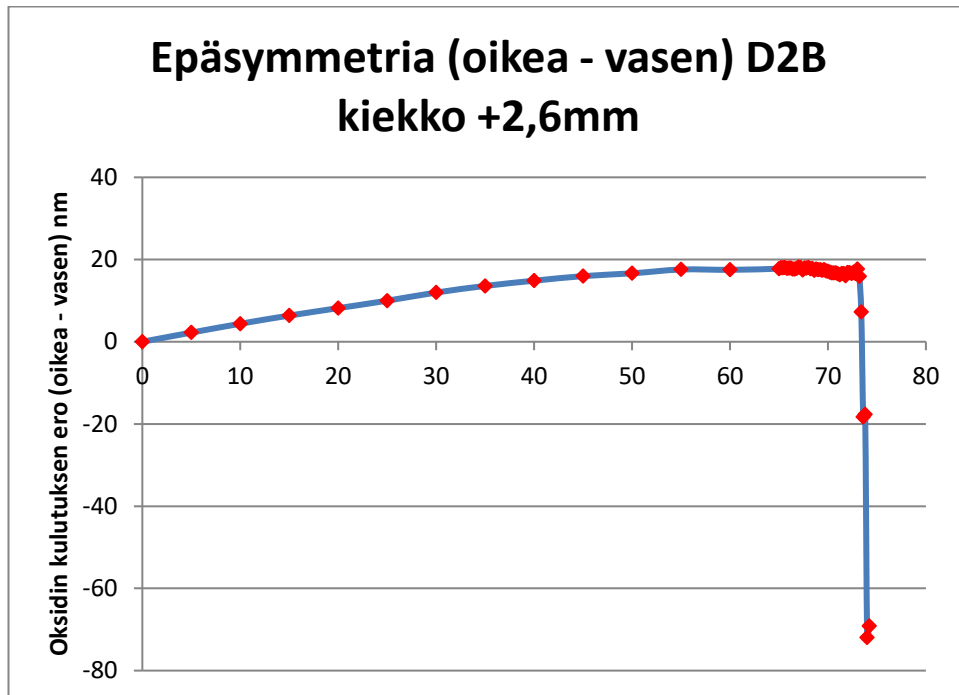
Kuva 16. Oksidin kulutus, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.



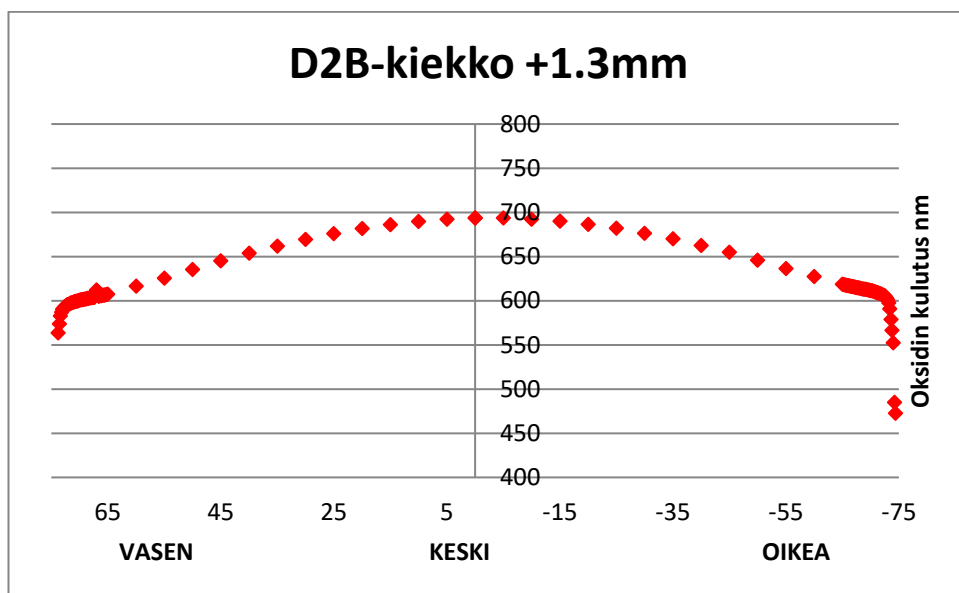
Kuva 17. Oksidin kulutuksen epäsyymerria, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.



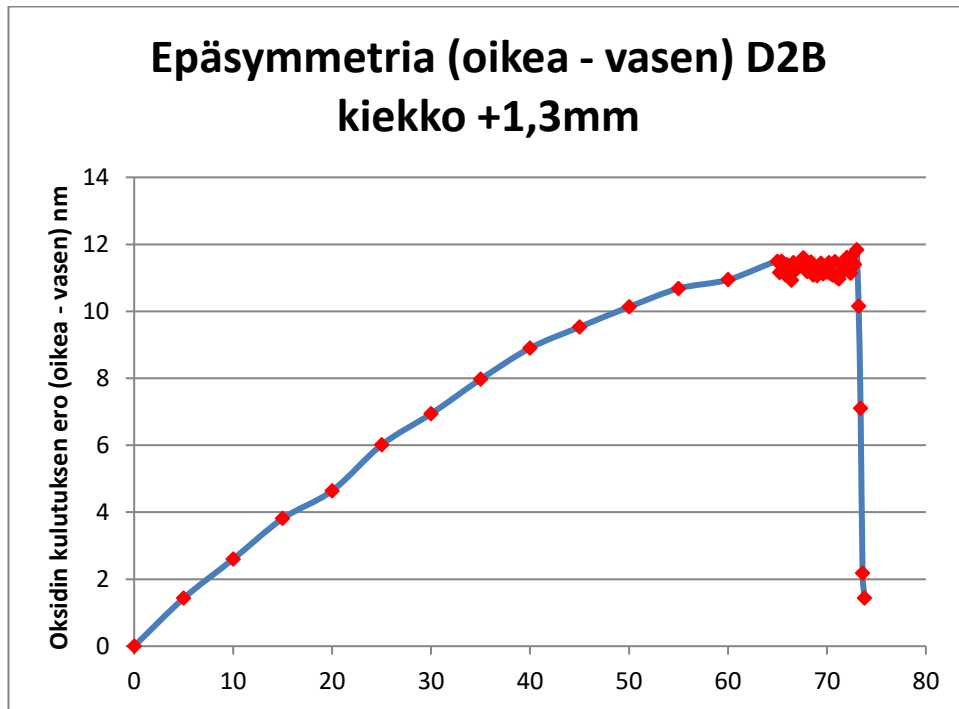
Kuva 18. Oksidin kulutus, kiekko 2,6 mm vasemmalla keskipisteestä.



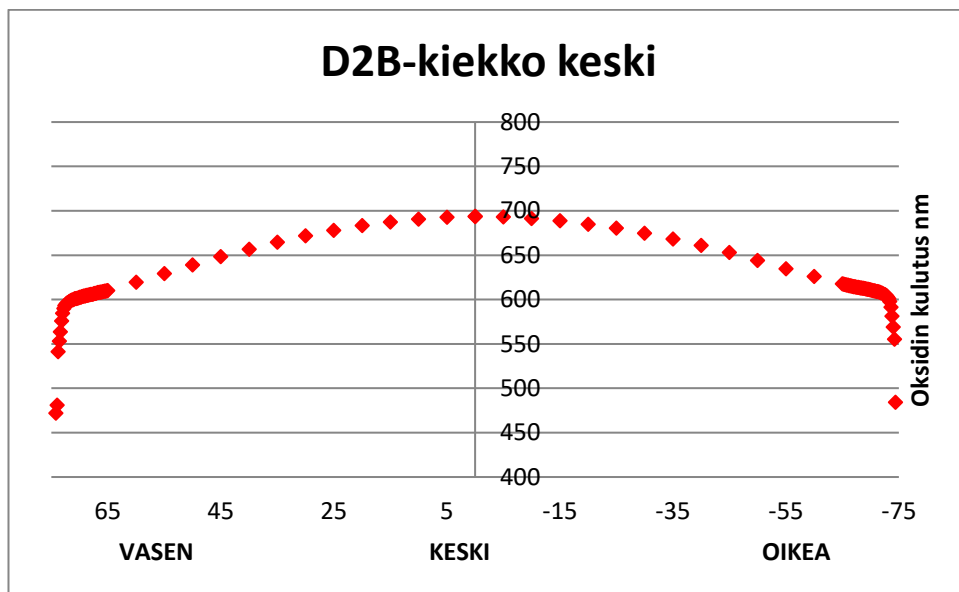
Kuva 19. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 2,6 mm vasemmalla keskipisteestä.



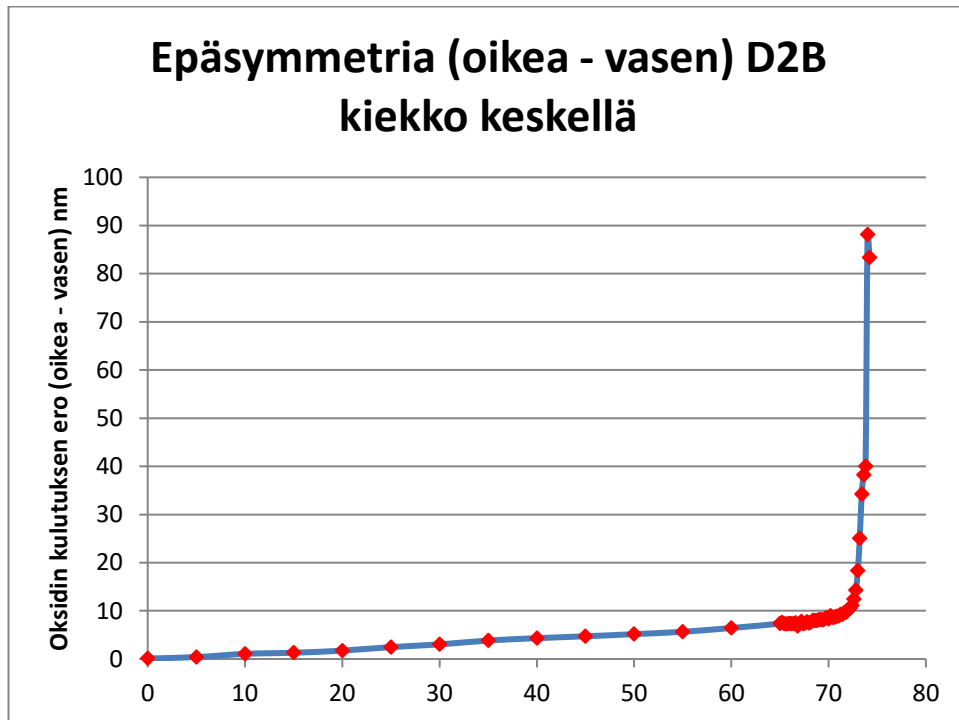
Kuva 20. Oksidin kulutus, kiekko 1,3 mm vasemmalla keskipisteestä.



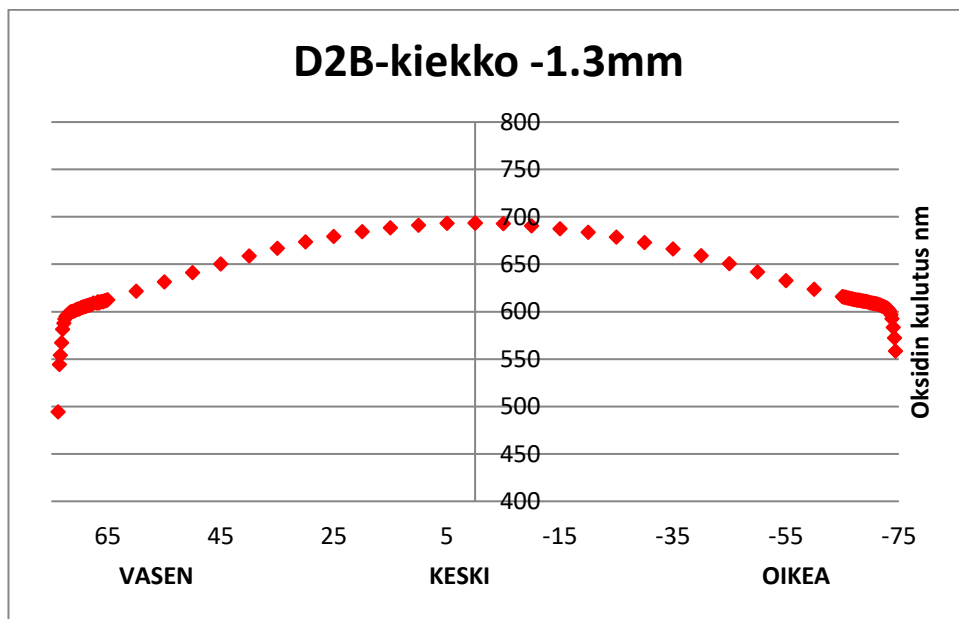
Kuva 21. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 1,3 mm vasemmalla keskipisteestä.



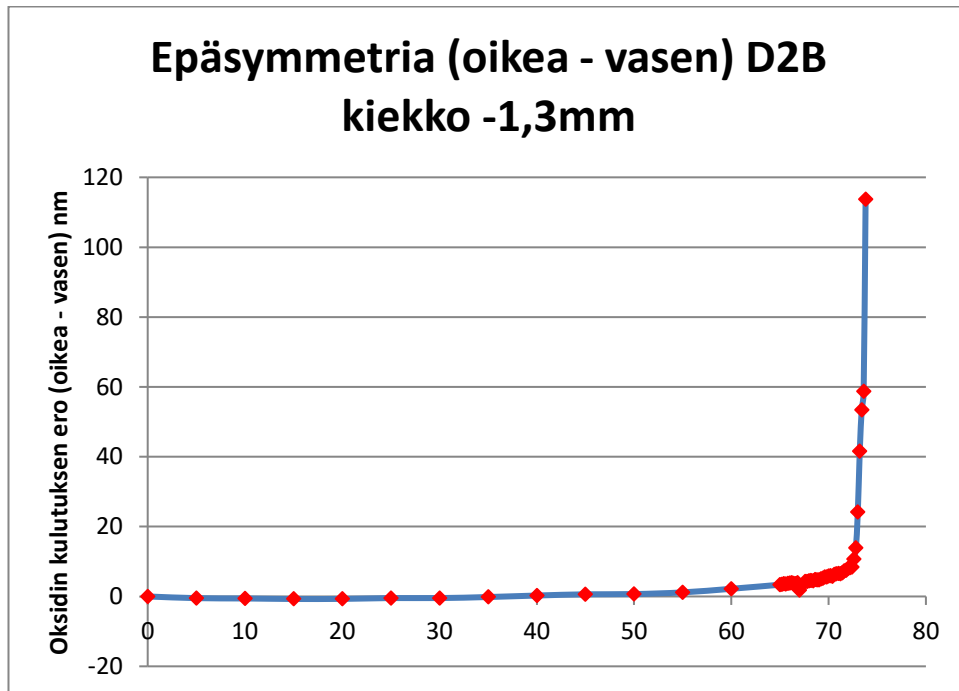
Kuva 22. Oksidin kulutus, kiekko keskellä.



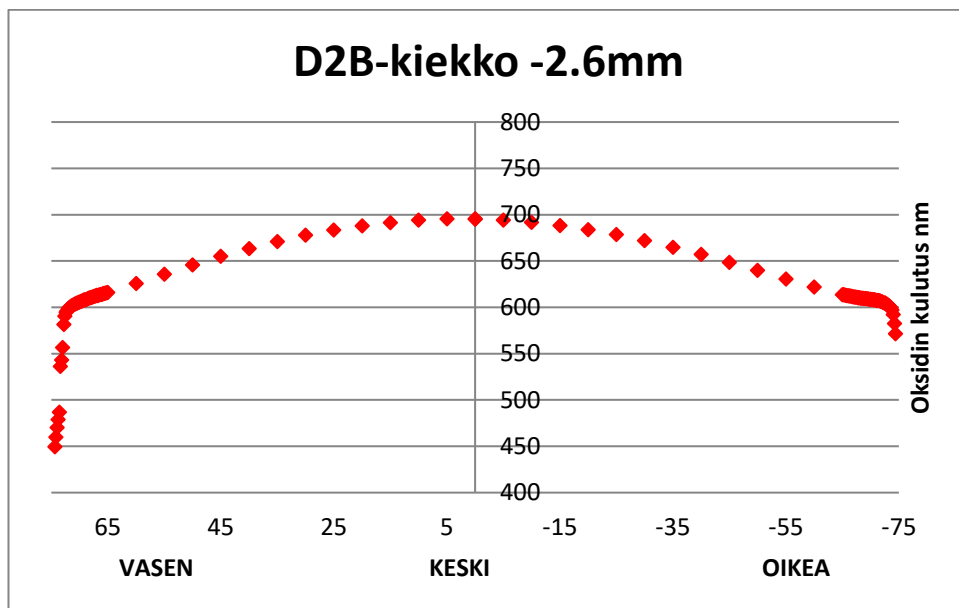
Kuva 23. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko keskellä.



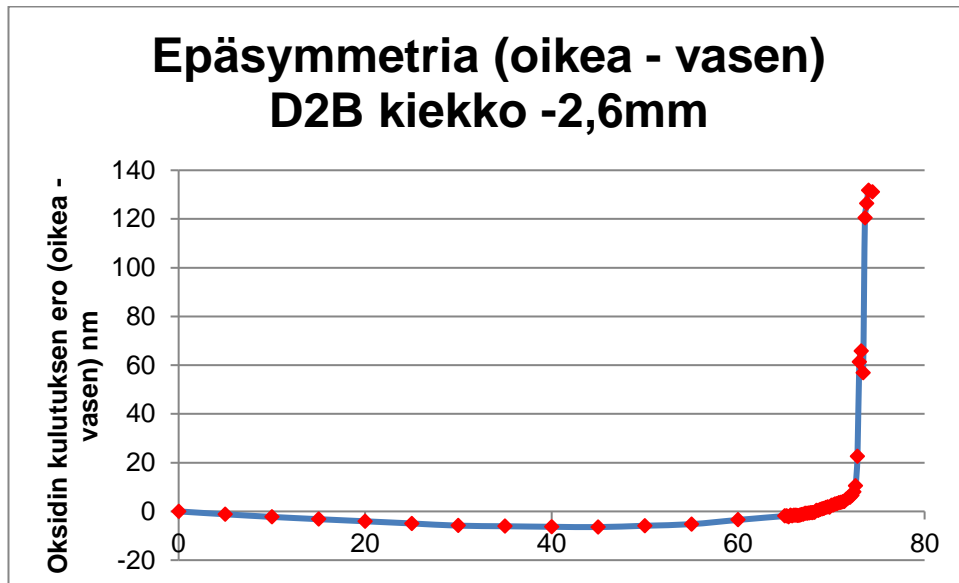
Kuva 24. Oksidin kulutus, kiekko 1,3 mm oikealla keskipisteestä.



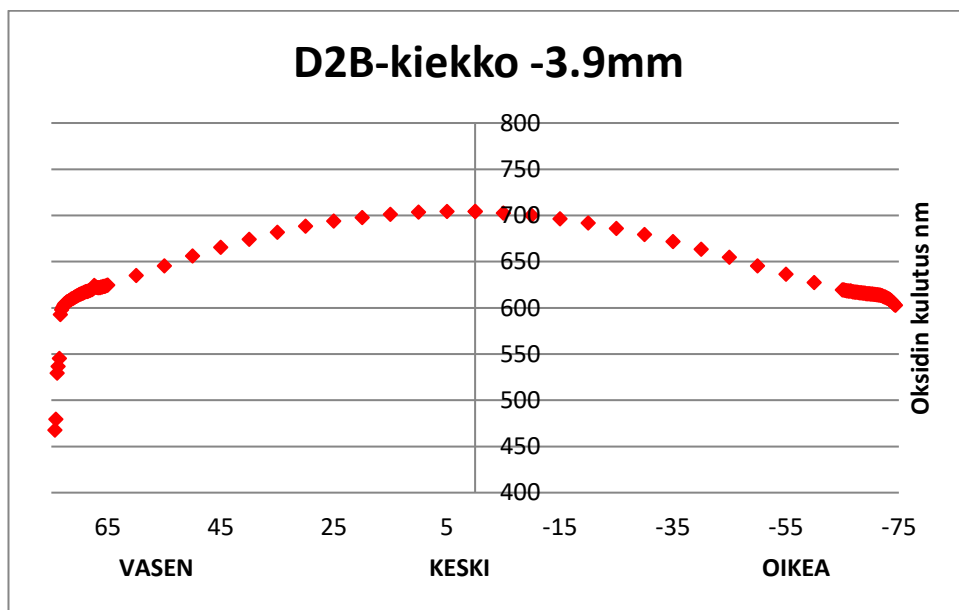
Kuva 25. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 1,3 mm oikealla keskipisteestä.



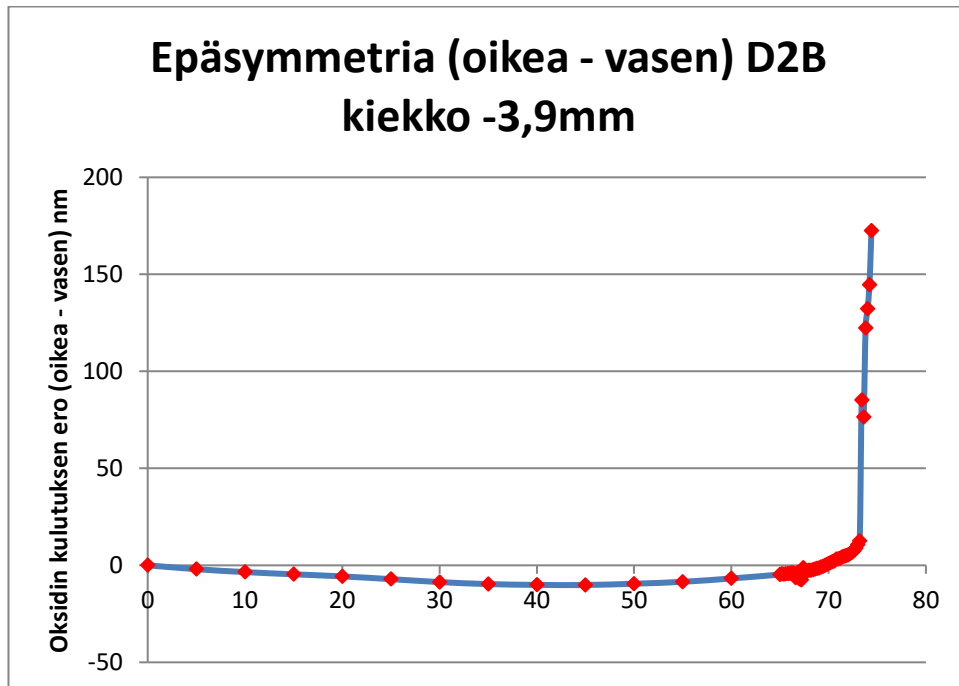
Kuva 26. Oksidin kulutus, kiekko 2,6 mm oikealla keskipisteestä.



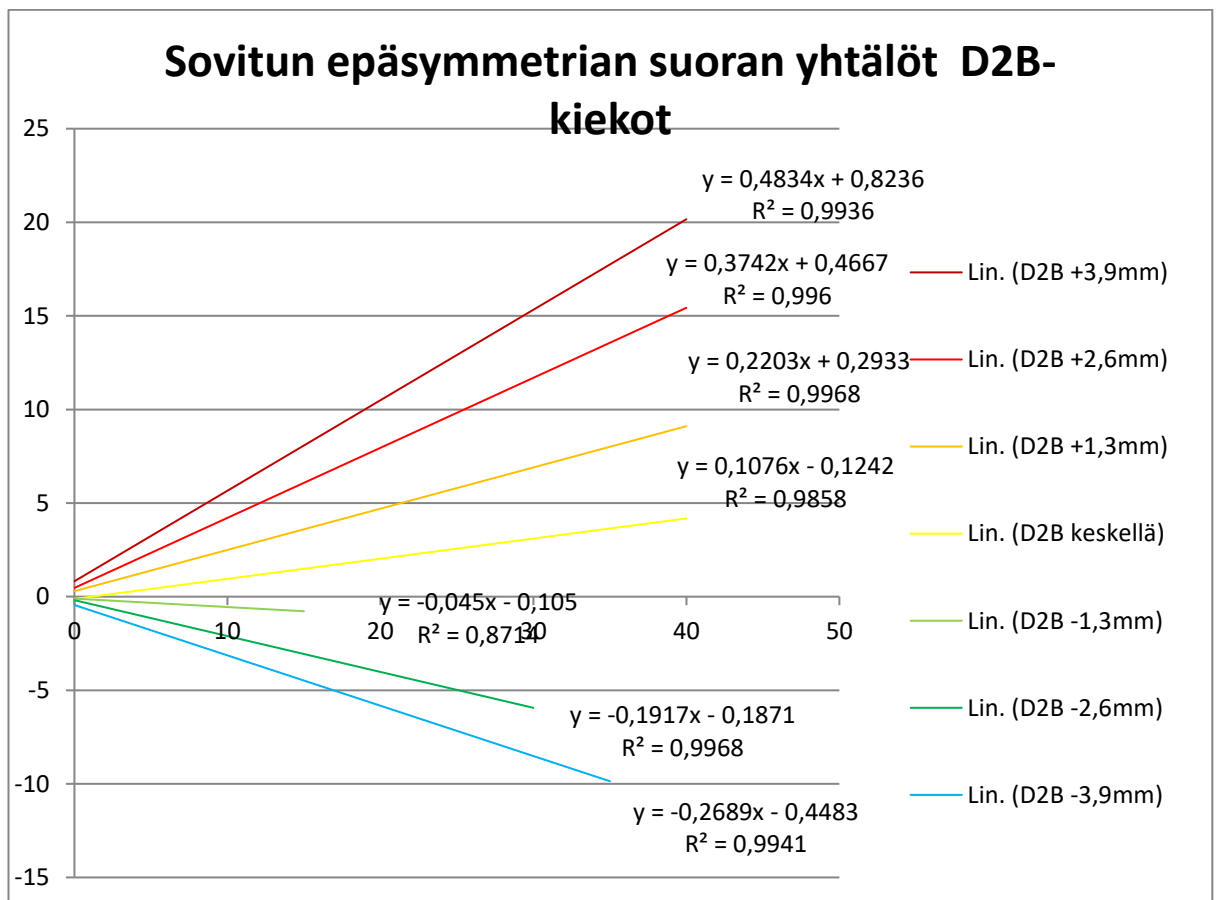
Kuva 27. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 2,6 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 28. Oksidin kulutus, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 29. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.



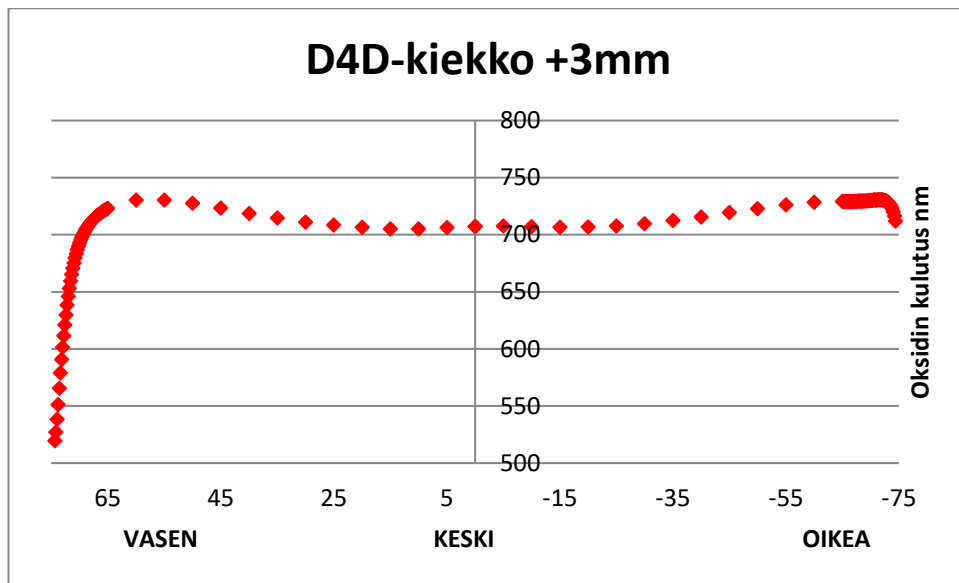
Kuva 30. Sovitun epäsymmetrian yhdistetyt suoran yhtälö kiekot

Taulukko 2. DRIE\_02B-kammion suoran yhtälöt ja selitysasteet

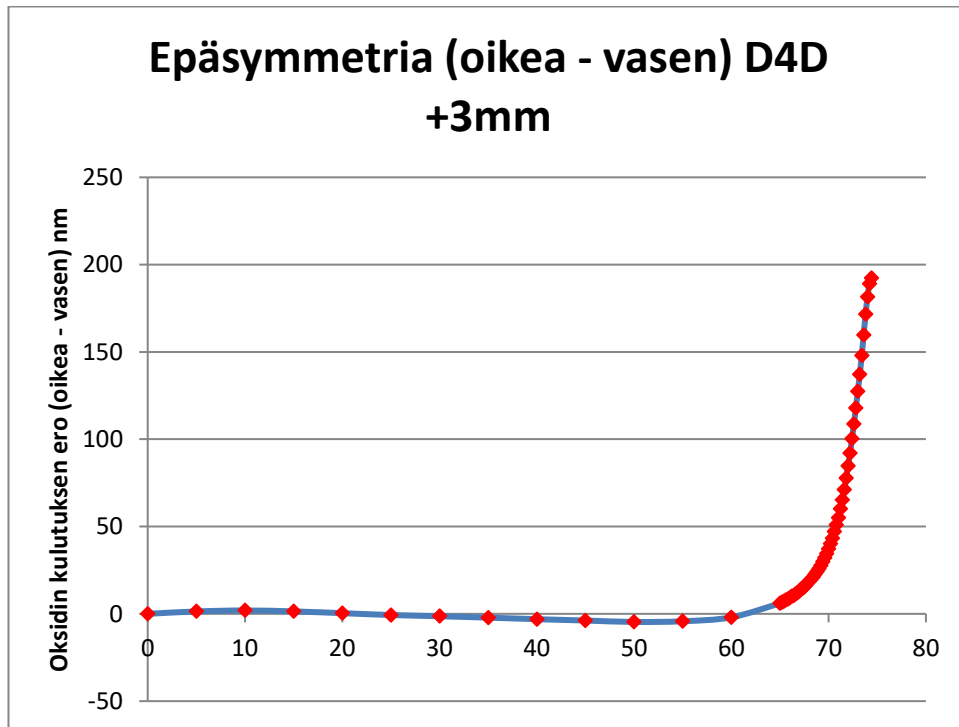
DRIE_02B	suoran yhtälö $y=$	$R^2$
+3,9mm	$0.4834x + 0.8236$	0.9936
+2,6mm	$0.3742x + 0.4667$	0.996
+1,3mm	$0.2203x + 0.2933$	0.9968
keskellä	$0.1076x - 0.1242$	0.9858
-1,3mm	$-0.045x - 0.105$	0.8714
-2,6mm	$-0.1917x - 0.1871$	0.9968
-3,9mm	$-0.2689x - 0.4483$	0.9941

**DRIE\_04D**

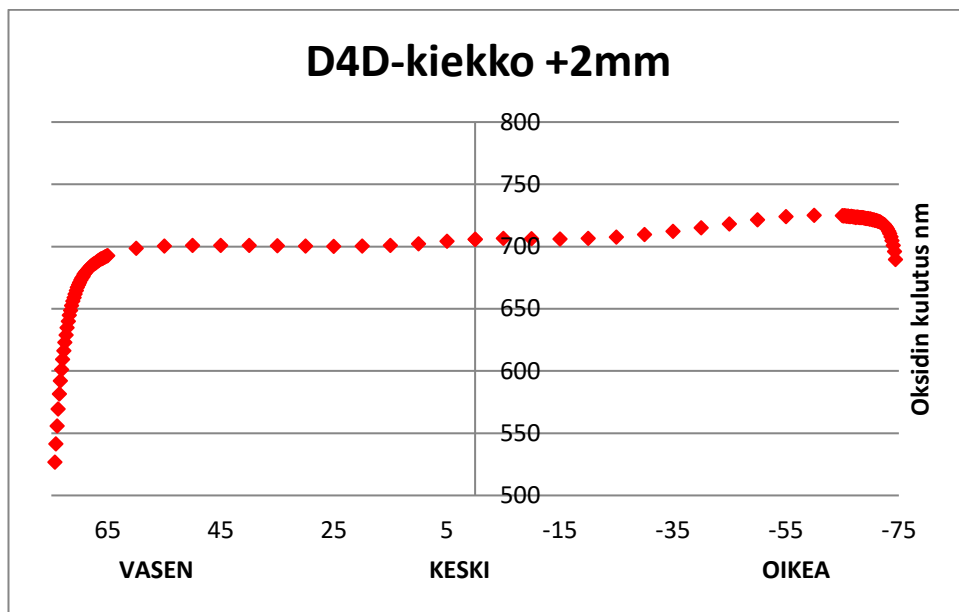
DRIE\_04D-kammion graafinen esitys eri paikoituksen oksidin kulutuksesta kuvat 31, 33, 35, 37, 39, 41, 43. Graafinen esitys kiekon epäsymmetriasta kuvat 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44. Graafinen esitys sovitun epäsymmetrian yhdistetyt suoran yhtälö kiekot kuva 45. Suoran yhtälöt ja selityksasteet taulukko 3.



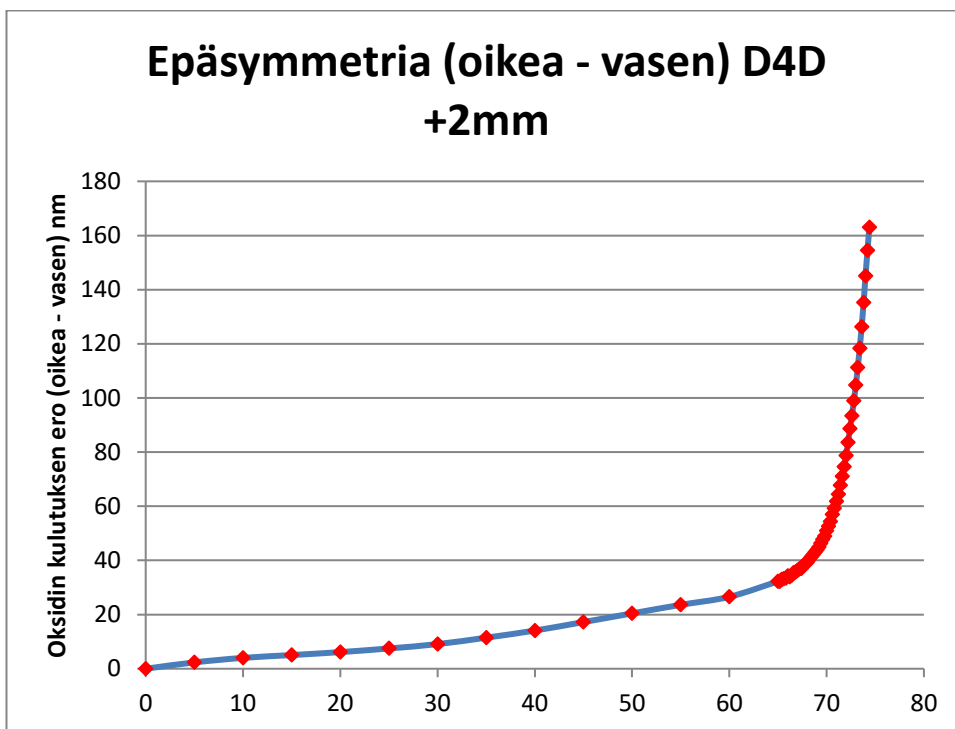
Kuva 31. Oksidin kulutus, kiekko 3 mm vasemmalla keskipisteestä.



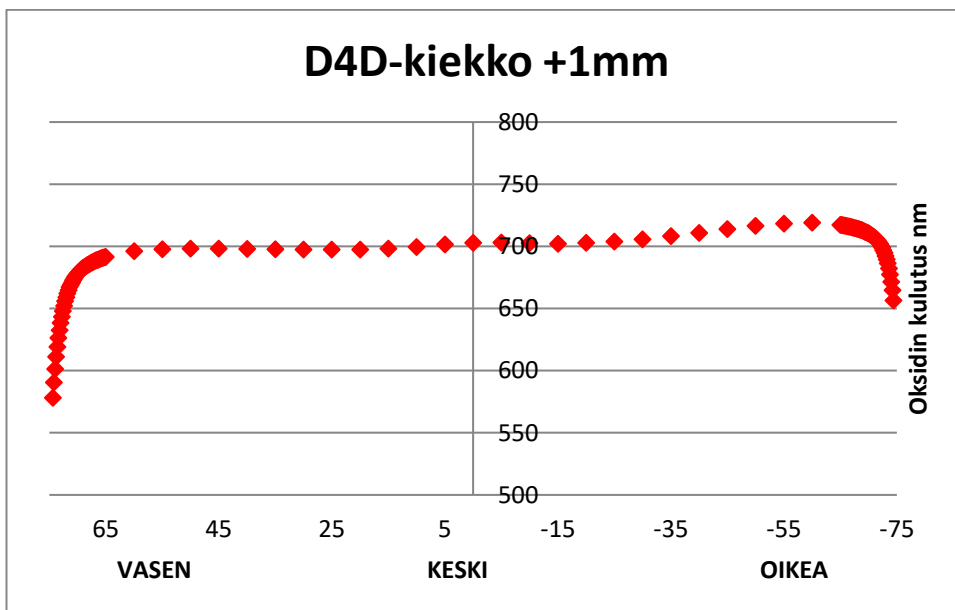
Kuva 32. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 3 mm vasemmalla keskipisteestä.



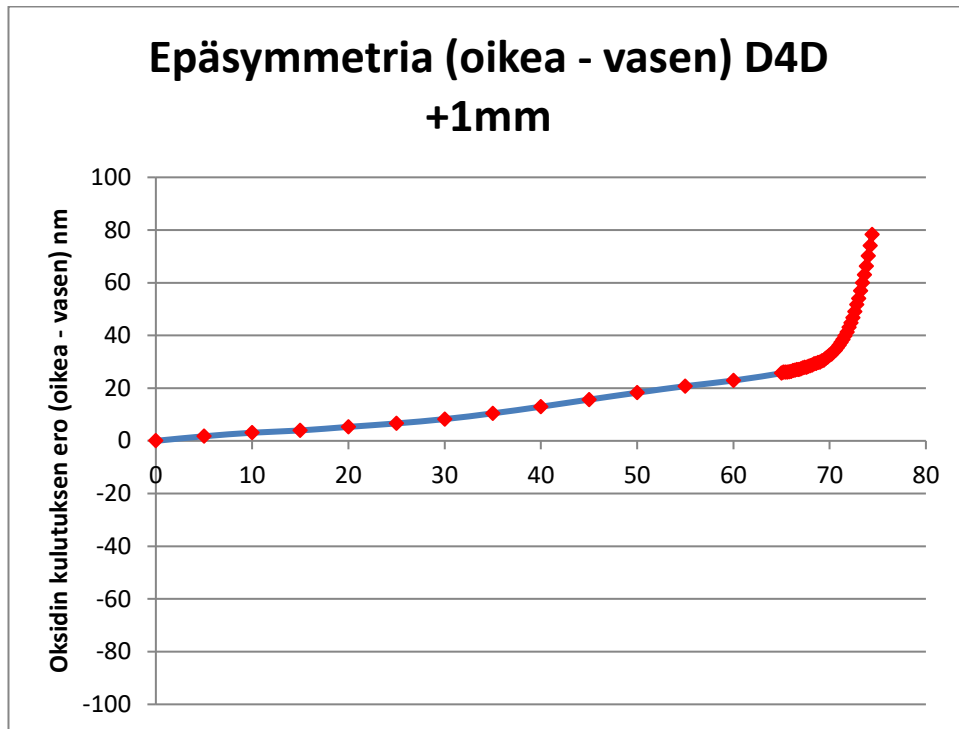
Kuva 33. Oksidin kulutus, kiekko 2 mm vasemmalla keskipisteestä.



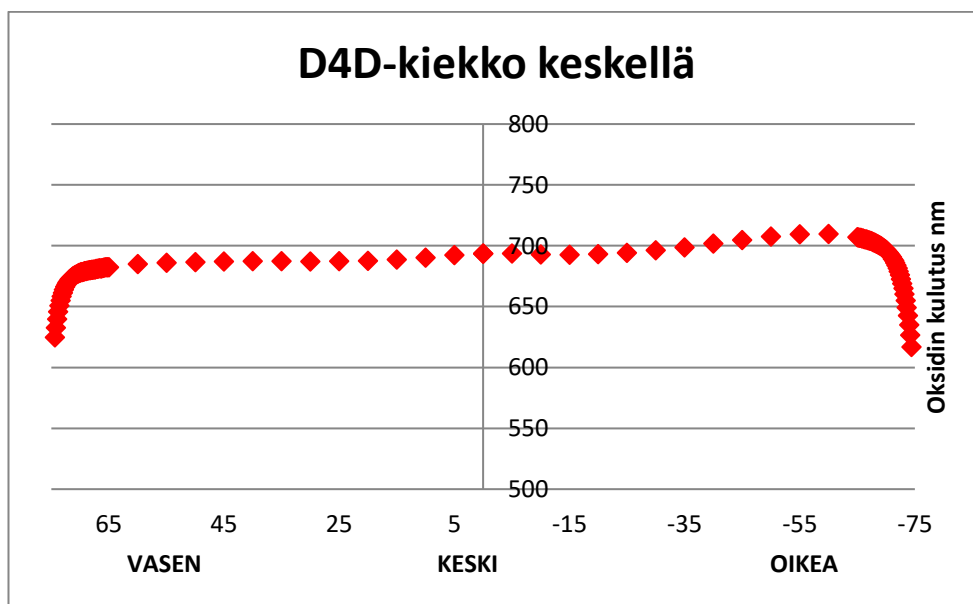
Kuva 34. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 2 mm vasemmalla keskipisteestä.



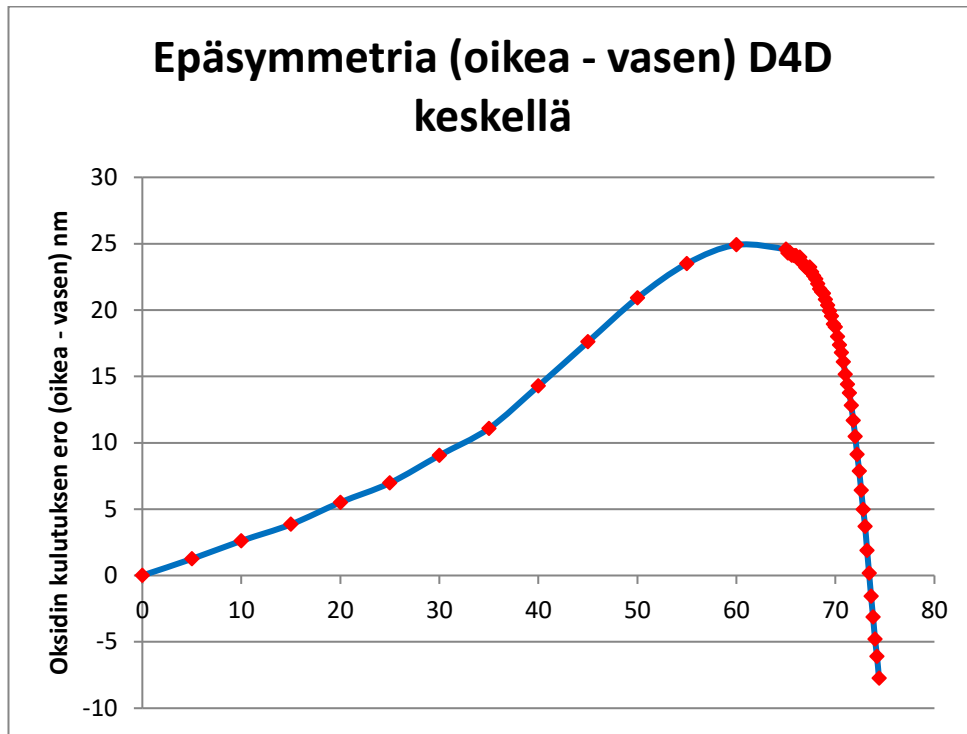
Kuva 35. Oksidin kulutus, kiekko 1 mm vasemmalla keskipisteestä.



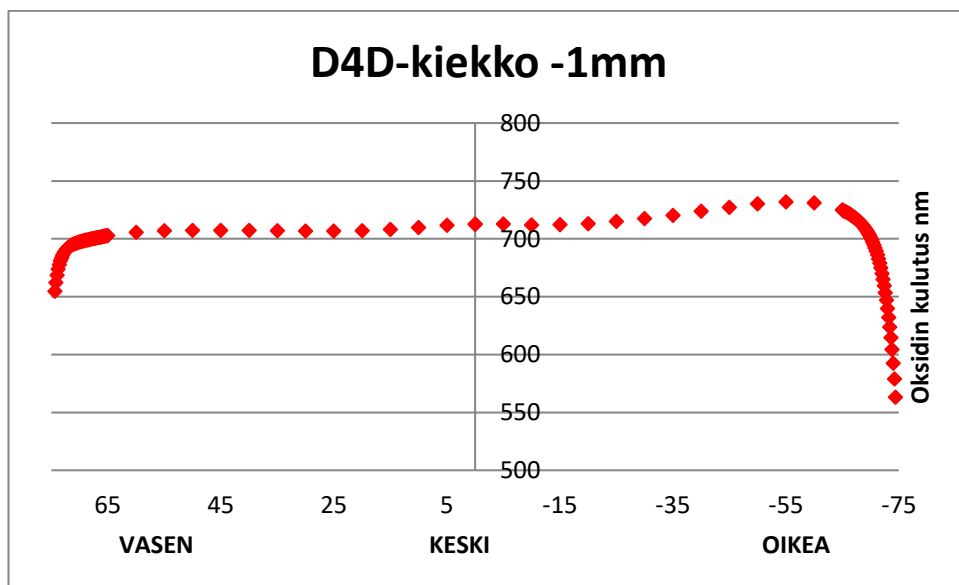
Kuva 36. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 1 mm vasemmalla keskipisteestä.



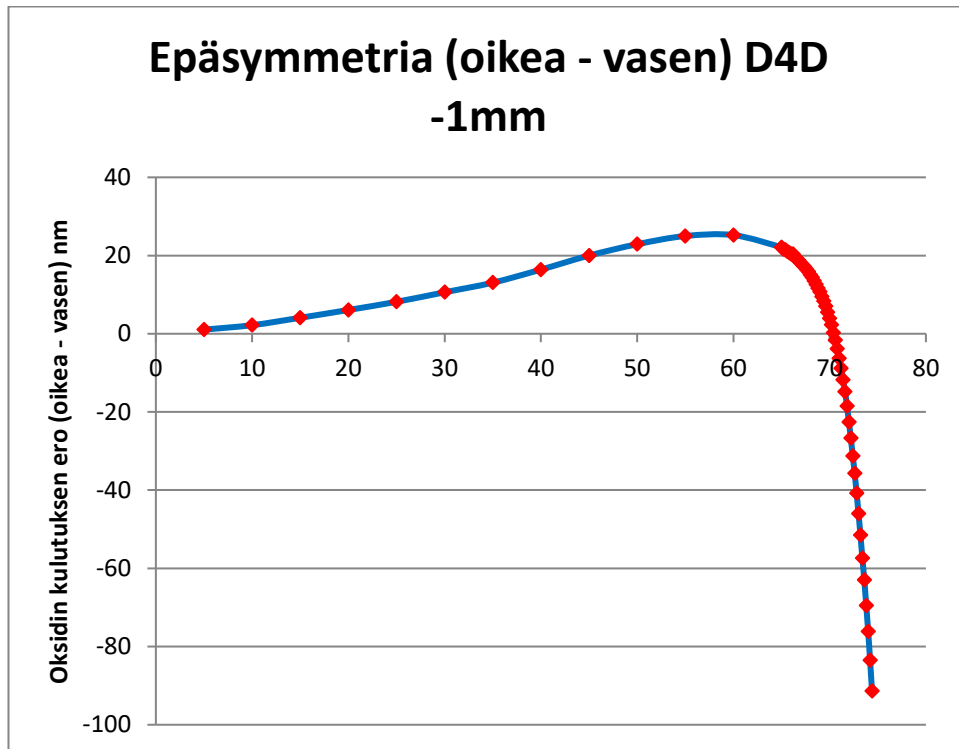
Kuva 37. Oksidin kulutus, kiekko keskellä.



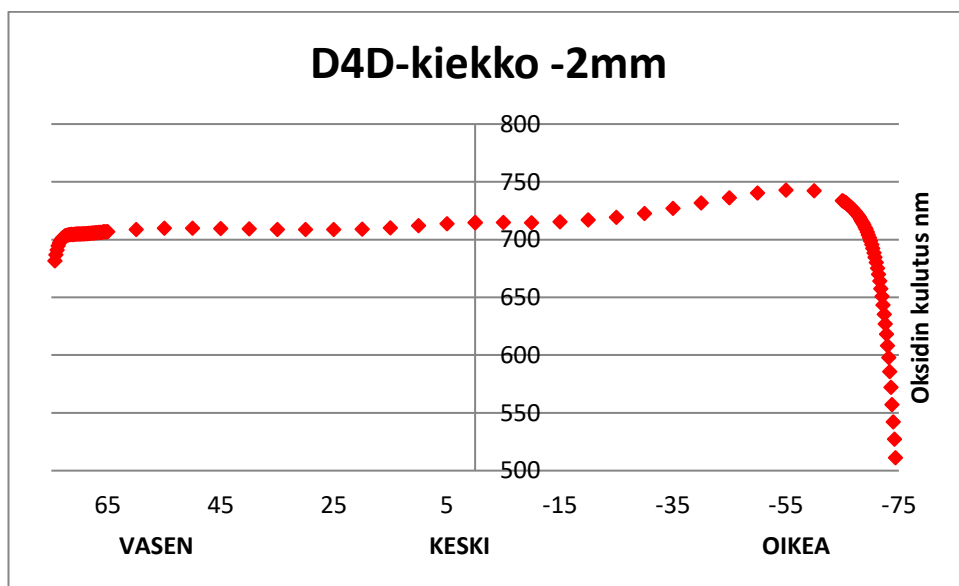
Kuva 38. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko keskellä.



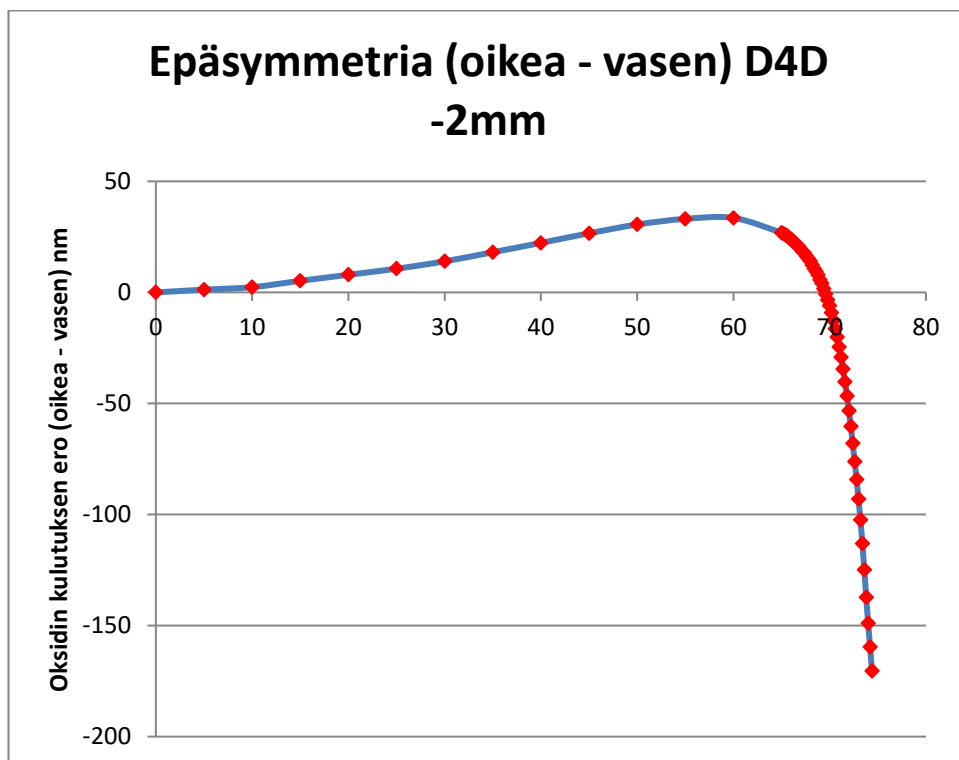
Kuva 39. Oksidin kulutus, kiekko 1 mm oikealla keskipisteestä.



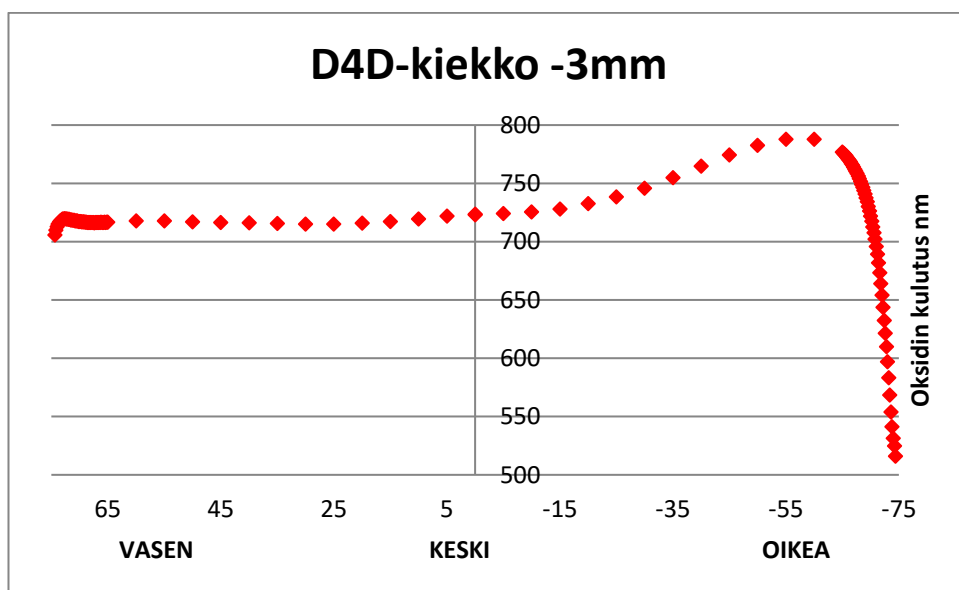
Kuva 40. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 1 mm oikealla keskipisteestä.



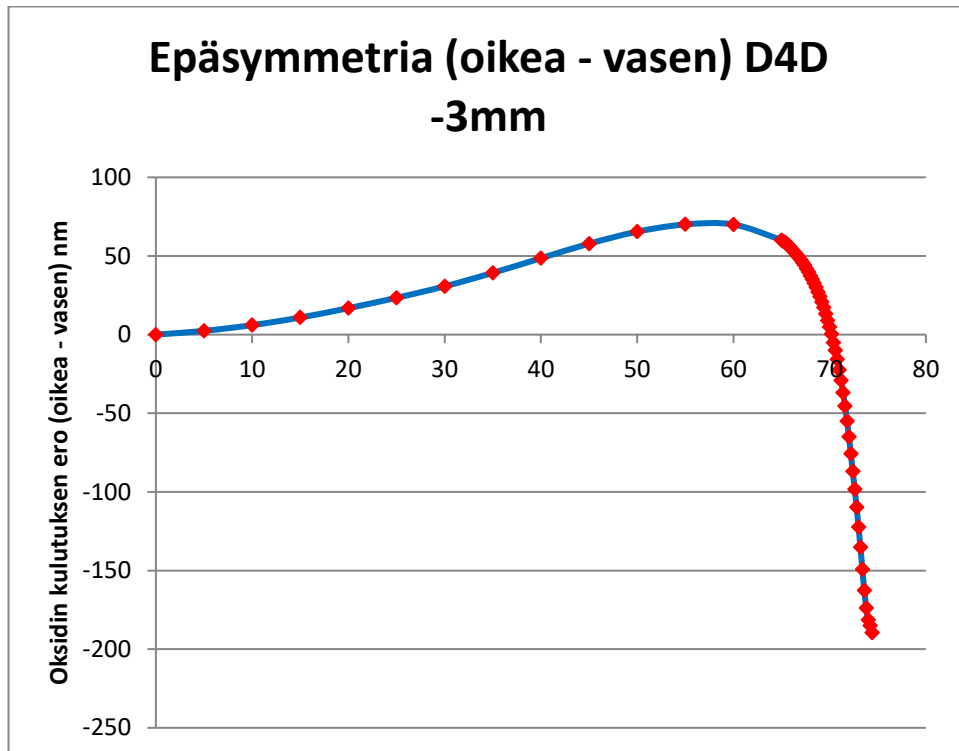
Kuva 41. Oksidin kulutus, kiekko 2 mm oikealla keskipisteestä.



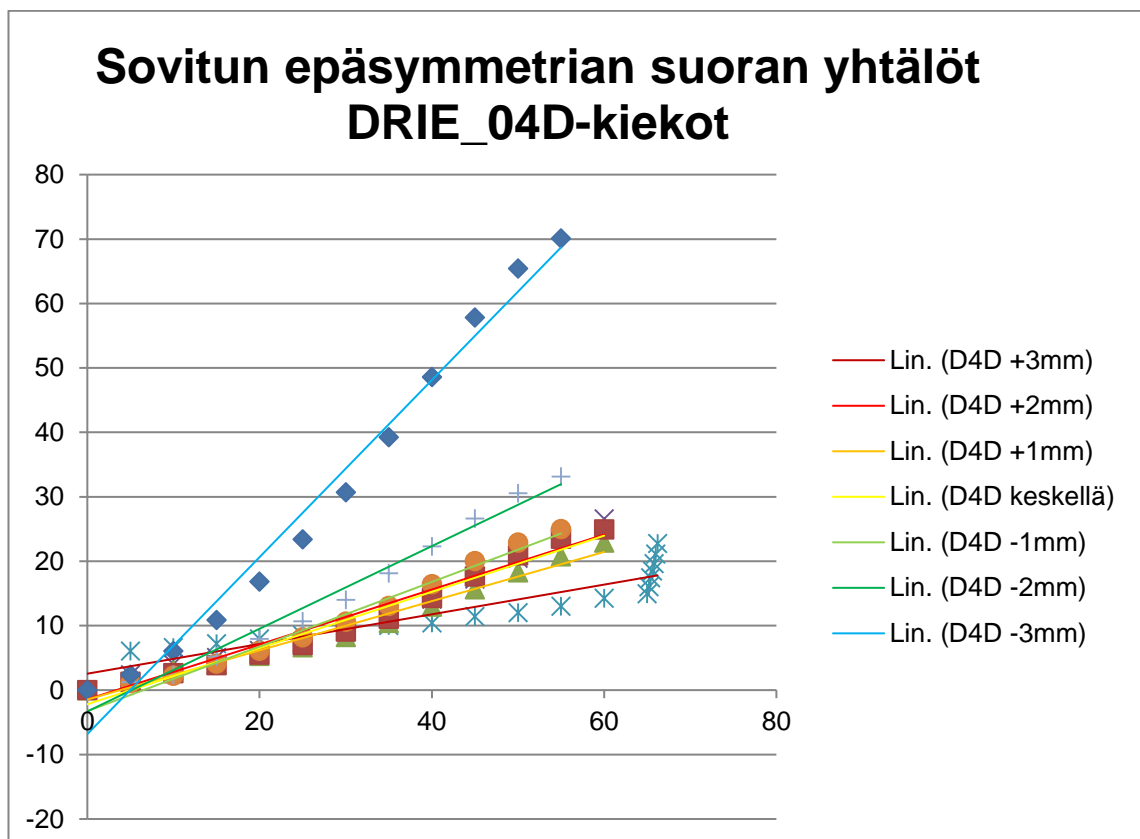
Kuva 42. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 2 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 43. Oksidin kulutus, kiekko 3 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 44. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 3 mm oikealla keskipisteestä.



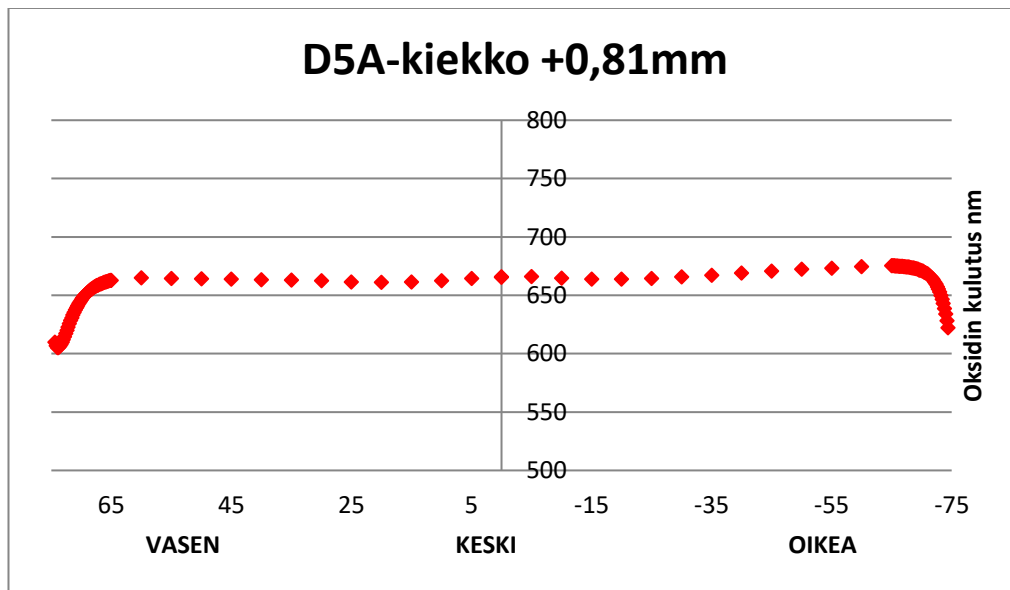
Kuva 45. Sovitun epäsymmetrian yhdistetyt suoran yhtälö kiekot.

Taulukko 3. DRIE\_04D -kammion suoran yhtälöt ja selitysasteet

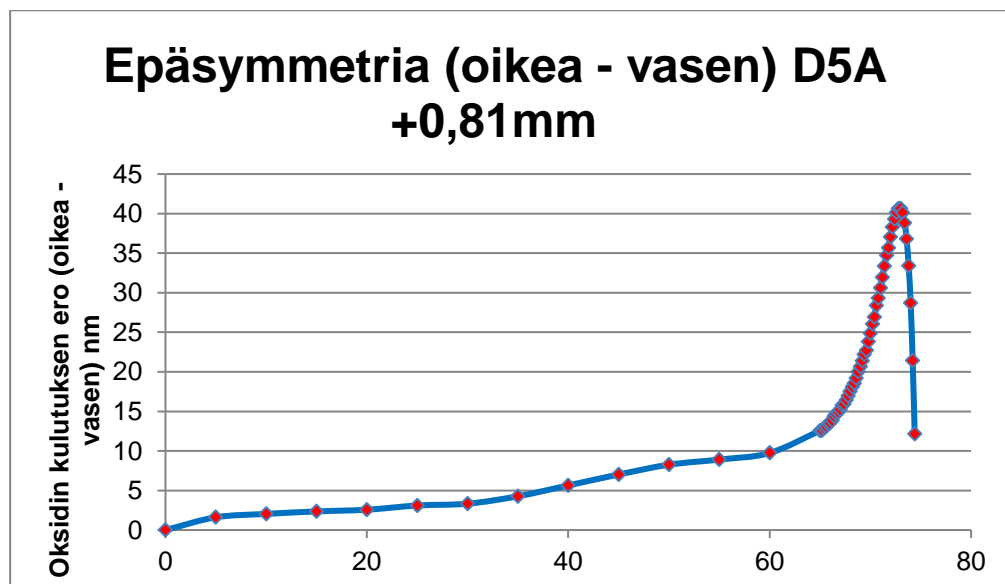
DRIE_04D	suoran yhtälö $y=$	$R^2$
+3mm	$-0.1704x + 2.0436$	0.9959
+2mm	$0.4261x - 1.4389$	0.9644
+1mm	$0.3817x - 1.4636$	0.9747
keskellä	$0.4361x - 2.1955$	0.9722
-1mm	$0.5012x - 3.2616$	0.9853
-2mm	$0.6411x - 3.2999$	0.9788
-3mm	$1.3733x - 6.8228$	0.9806

**DRIE\_05A**

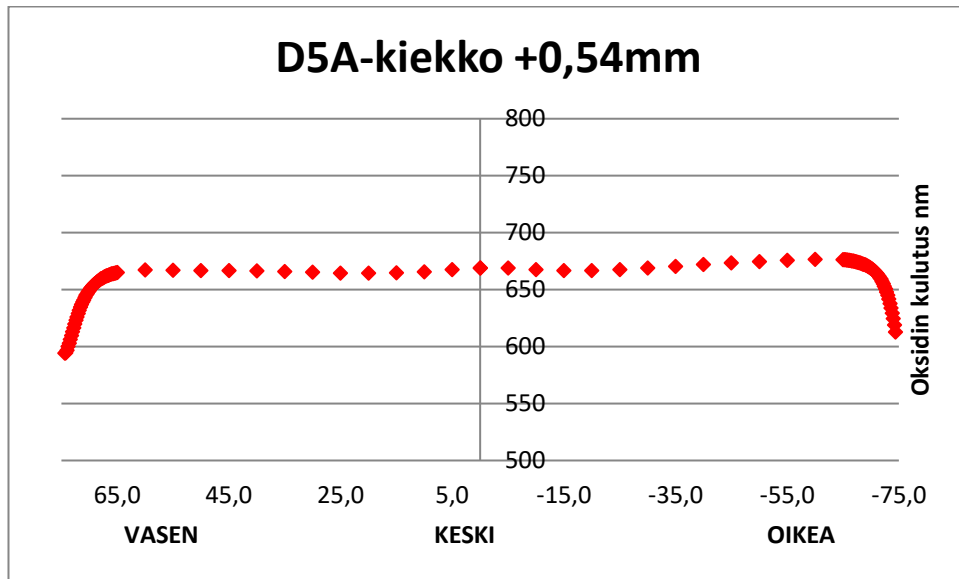
DRIE\_05A-kammion graafinen esitys eri paikoituksen oksidin kulutuksesta kuvat 46, 48, 50, 52, 54, 56. Graafinen esitys kiekon epäsymmetriasta kuvat 47, 49, 51, 53, 55, 57. Graafinen esitys sovitun epäsymmetrian yhdistetyt suoran yhtälö kiekot kuva 58. Suoran yhtälöt ja selitysasteet taulukko 4.



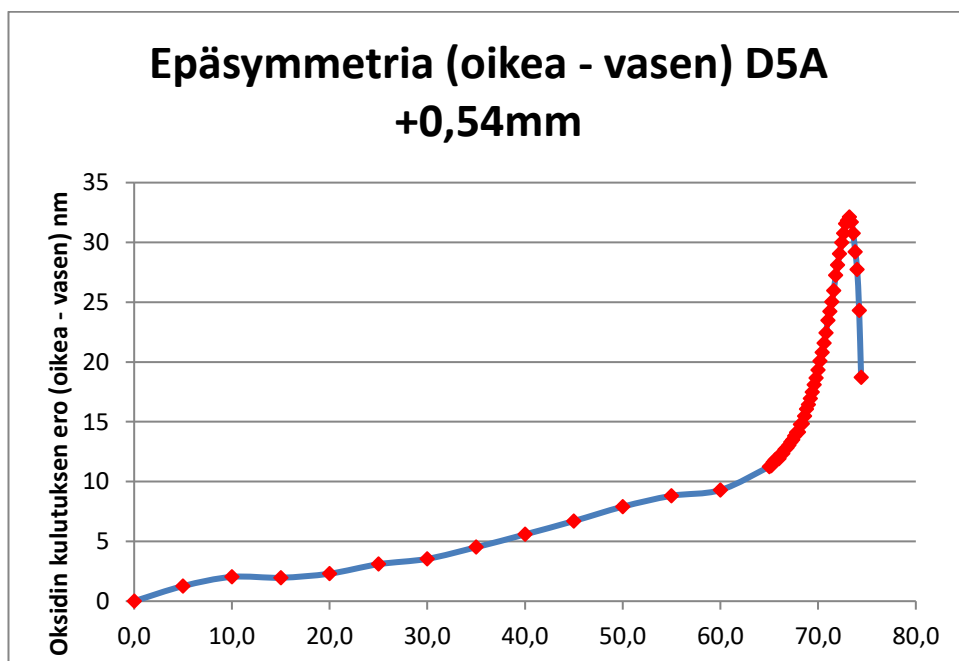
Kuva 46. Oksidin kulutus, kiekko 0,81 mm vasemmalla keskipisteestä.



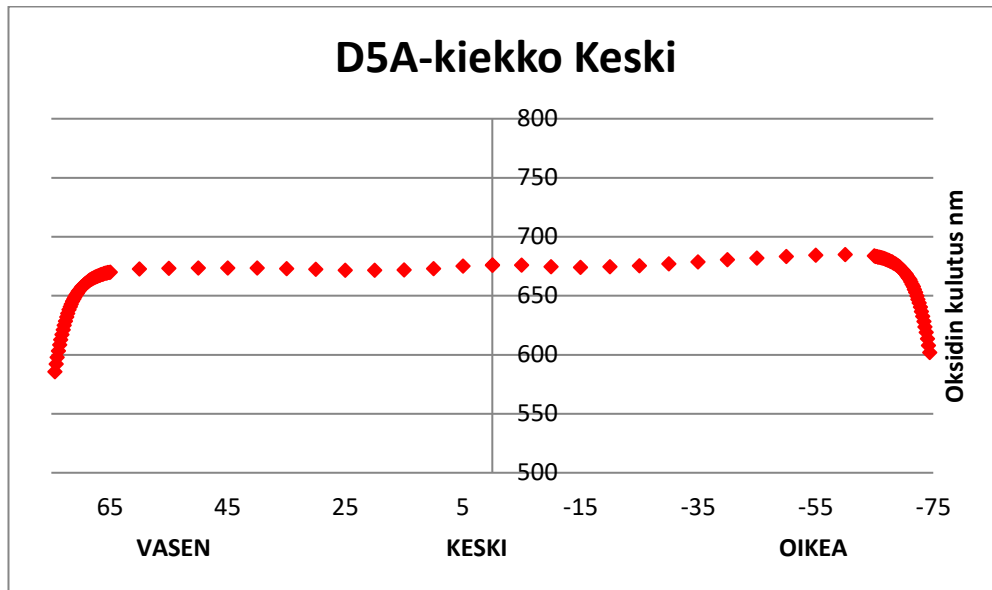
Kuva 47. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 0,81 mm vasemmalla keskipisteestä.



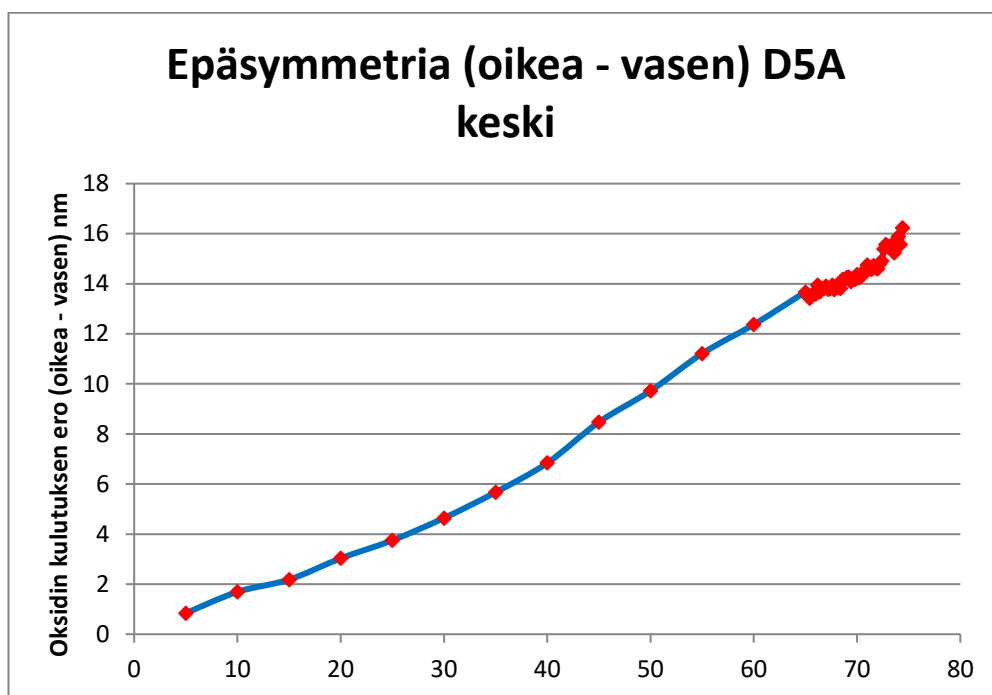
Kuva 48. Oksidin kulutus, kiekko 0,54 mm oikealla keskipisteestä.



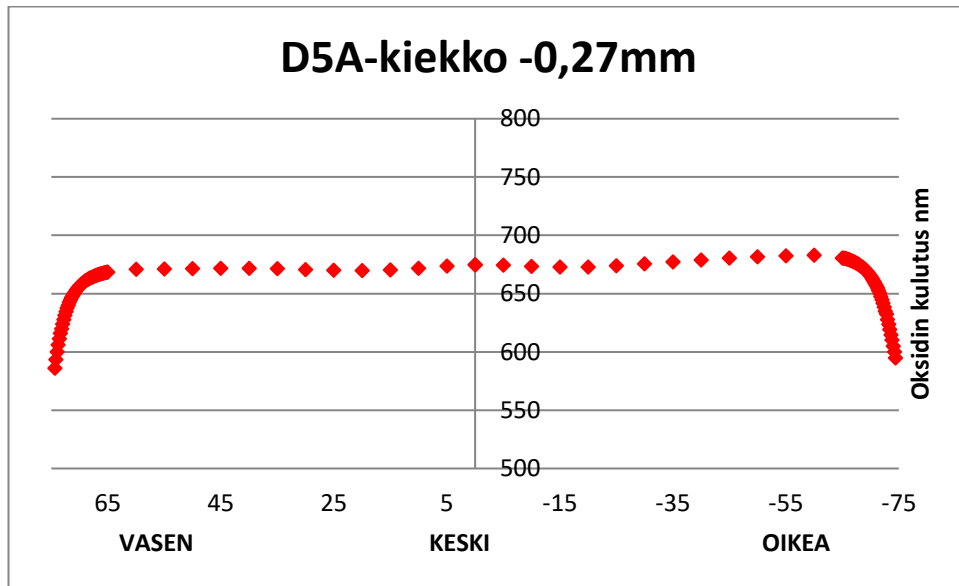
Kuva 49. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 0,54 mm vasemmalla keskipisteestä



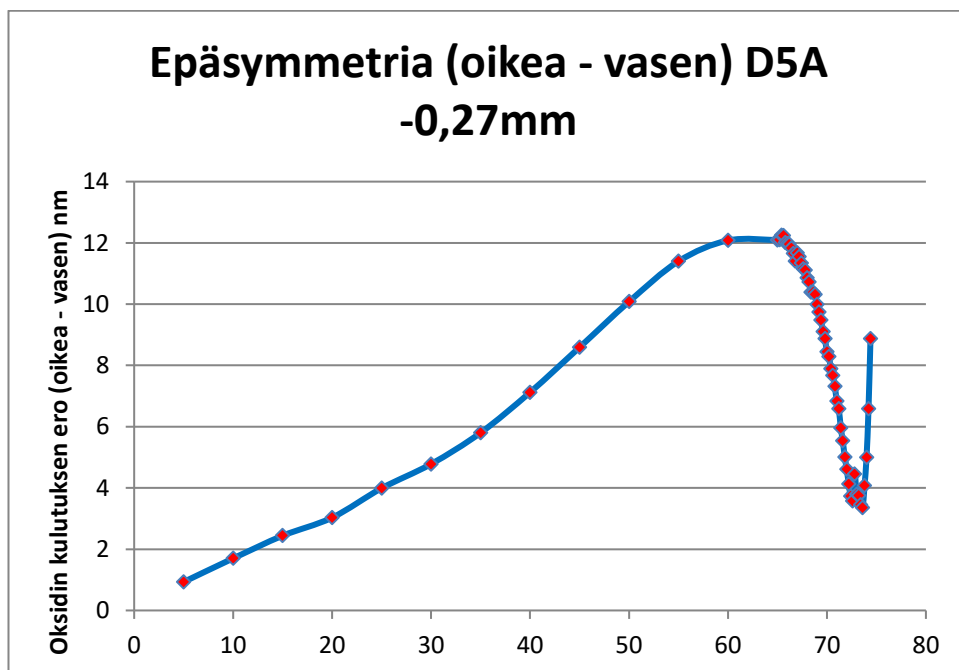
Kuva 50. Oksidin kulutus, kiekko keskellä.



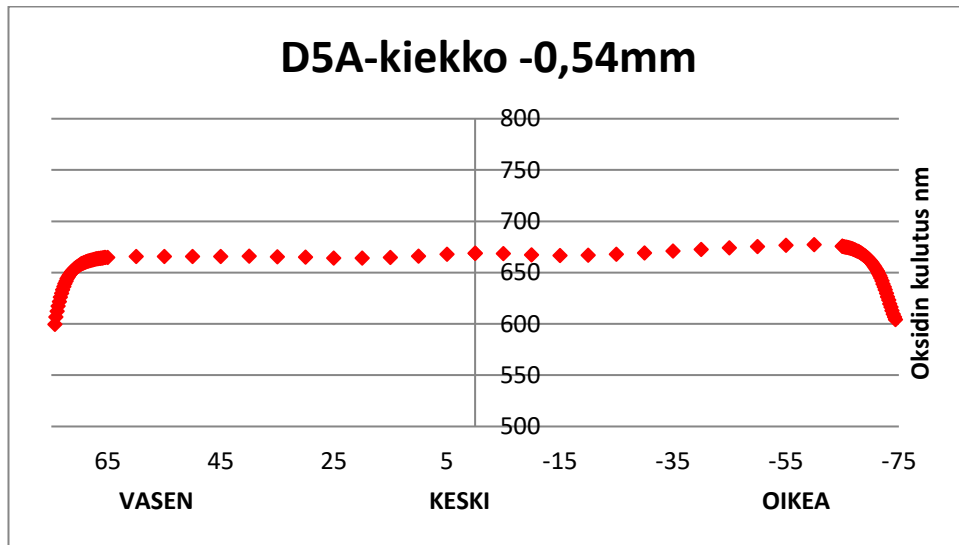
Kuva 51. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko keskellä.



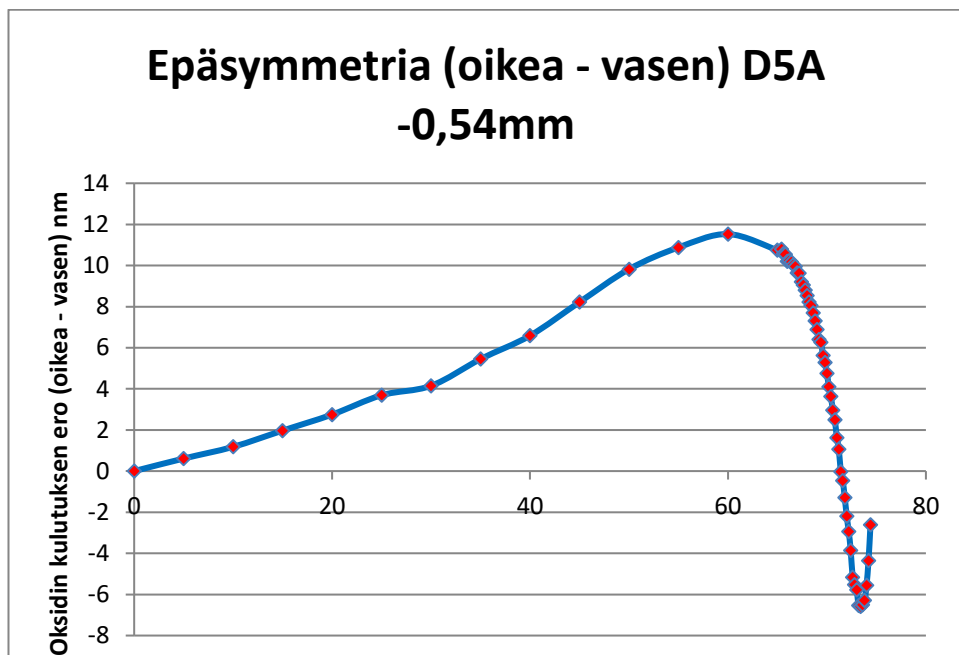
Kuva 52. Oksidin kulutus, kiekko 0,27 mm oikealla keskipisteestä.



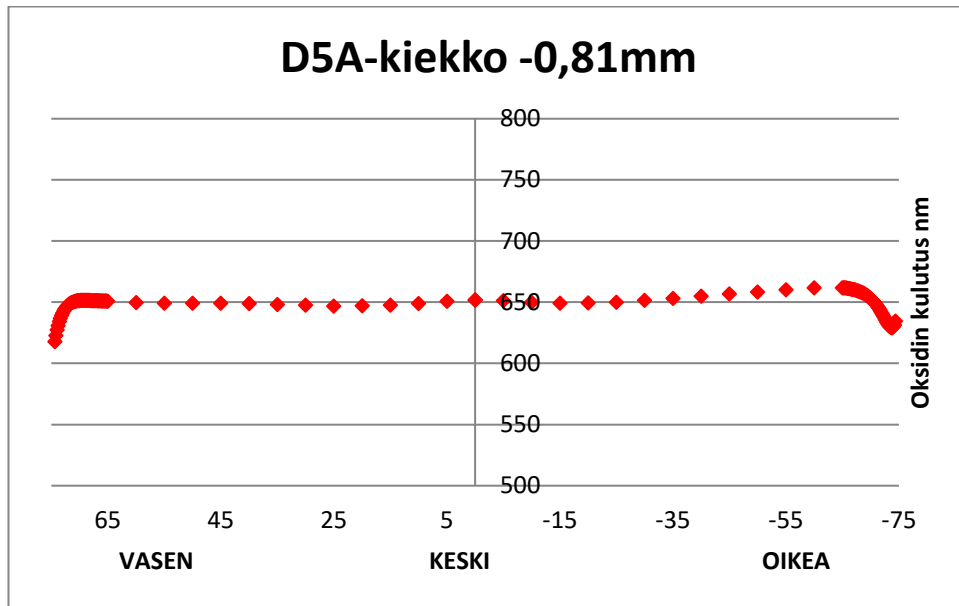
Kuva 53. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 0,27 mm oikealla keskipisteestä.



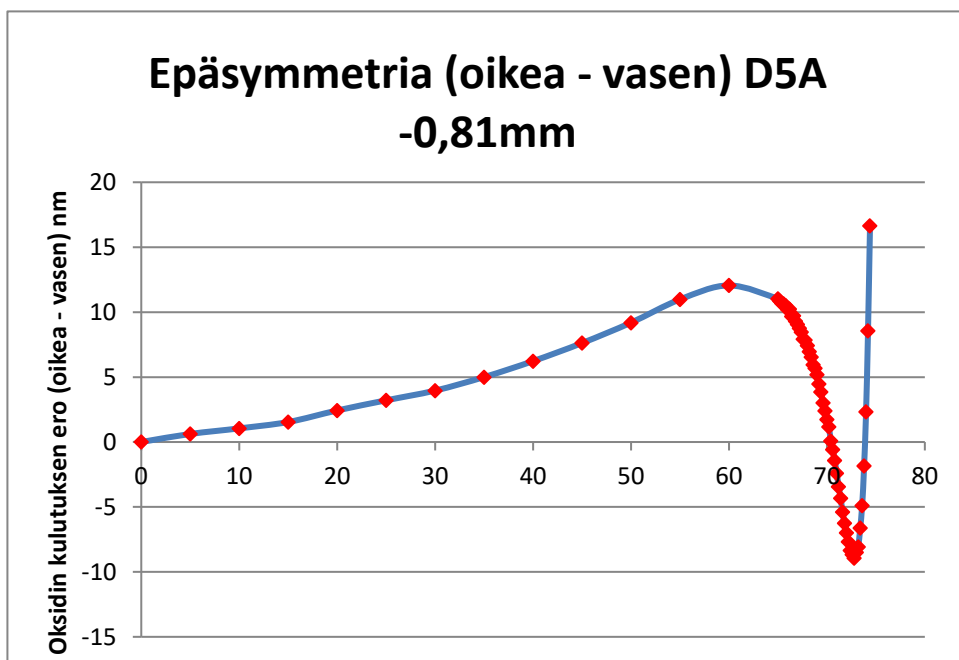
Kuva 54. Oksidin kulutus, kiekko 0,54 mm oikealla keskipisteestä.



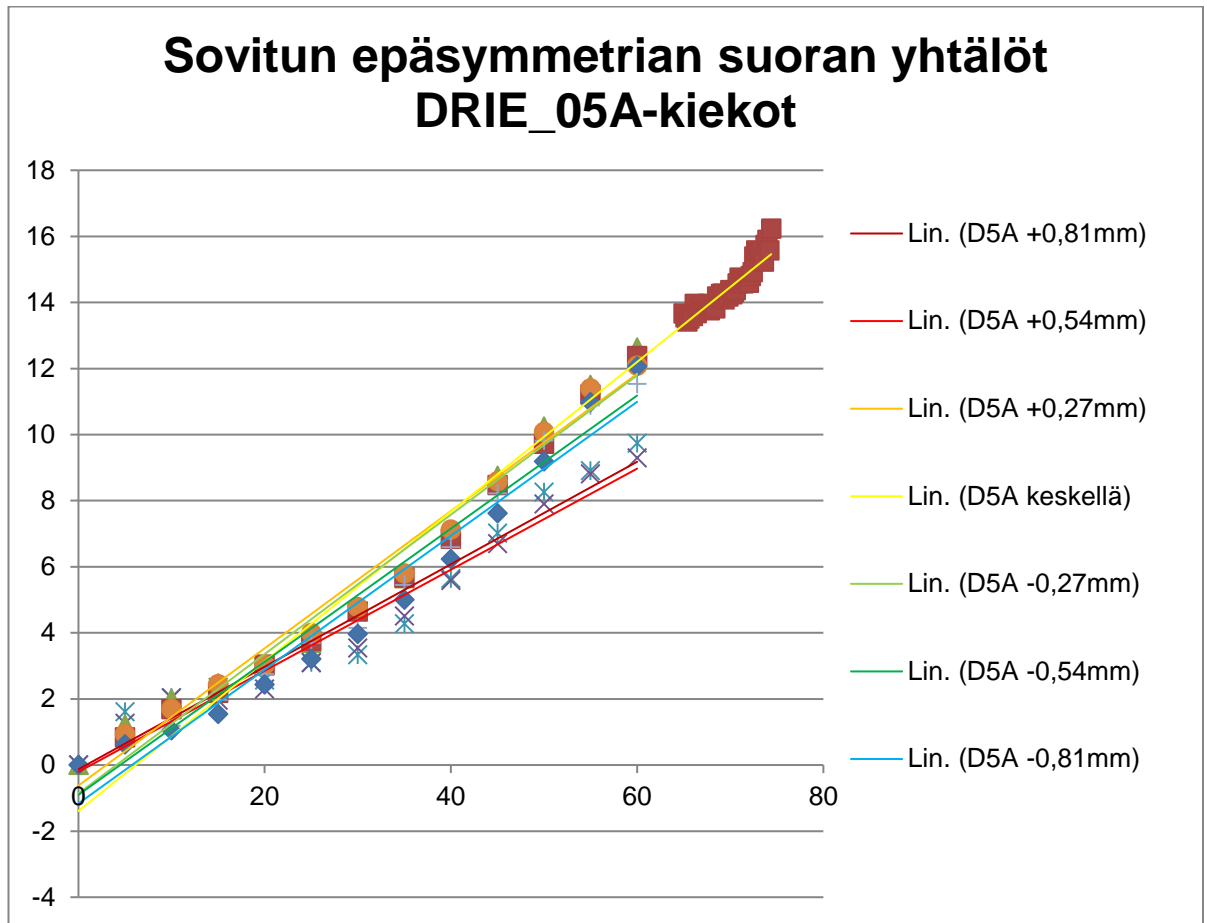
Kuva 55. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 0,54 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 56. Oksidin kulutus, kiekko 0,81 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 57. Oksidin kulutuksen epäsymmetria, kiekko 0,81 mm oikealla keskipisteestä



Kuva 58. Sovitun epäsymmetrian yhdistetyt suoran yhtälö kiekot.

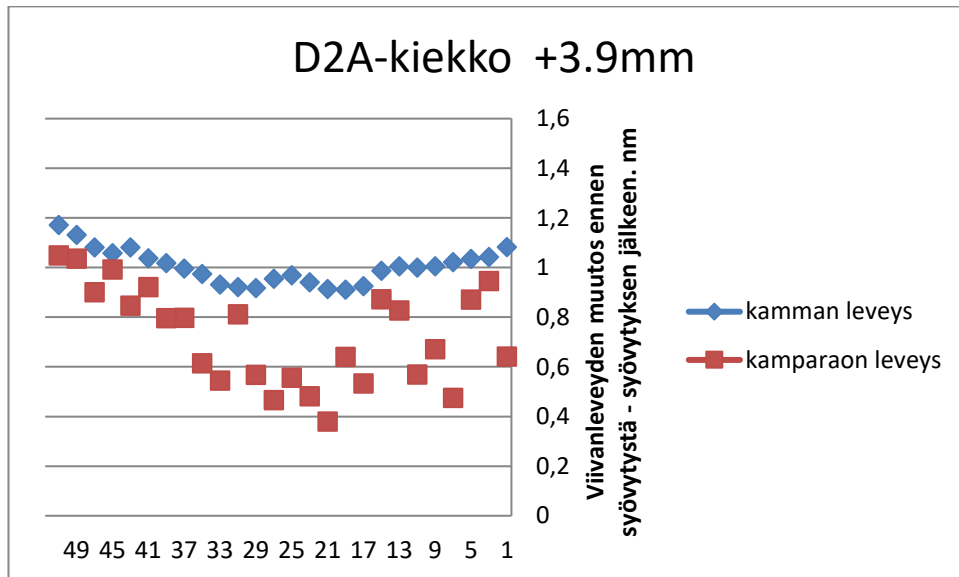
Taulukko 4. DRIE\_05A-kammion suoran yhtälöt ja selitysasteet

DRIE_05A	suoran yhtälö $y=$	$R^2$
+0,81mm	$0.1551x - 0.1268$	0.9512
+0,54mm	$0.1529x - 0.2057$	0.9678
+0,27mm	$0.2077x - 0.6214$	0.9705
keskellä	$0.2265x - 1.3917$	0.9919
-0,27mm	$0.2109x - 0.8605$	0.9819
-0,54mm	$0.2014x - 0.9007$	0.9774
-0,81mm	$0.2026x - 1.1629$	0.9621

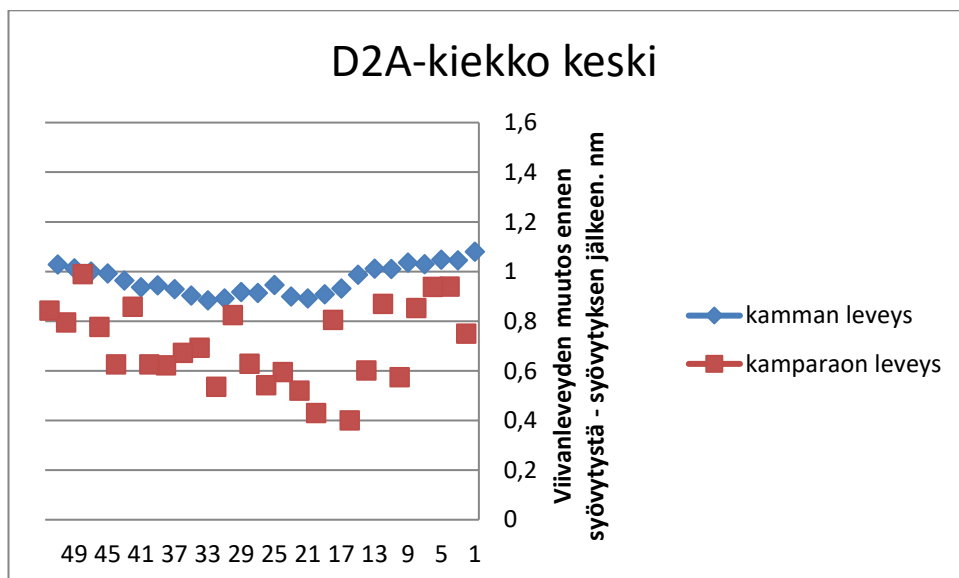
(76)

**DRIE\_02A**

DRIE\_02A-kammion graafinen esitys elementin kamman ja kamparaan leveyden muutoksesta eri syövytyspaikoituksessa kuvat 1, 2, 3.

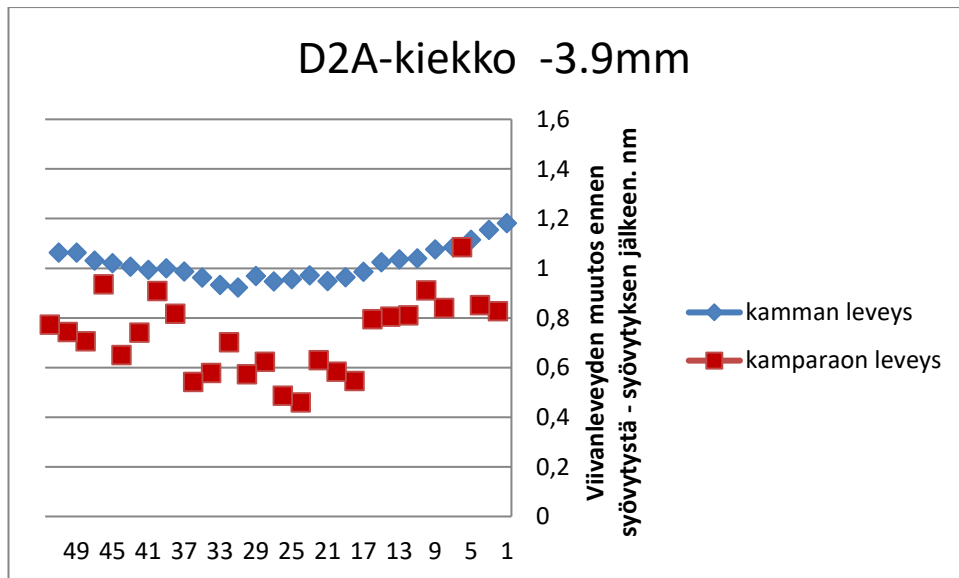


Kuva 1. Kamman ja kamparaan leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.



Kuva 2. Kamman ja kamparaan leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko keskellä.

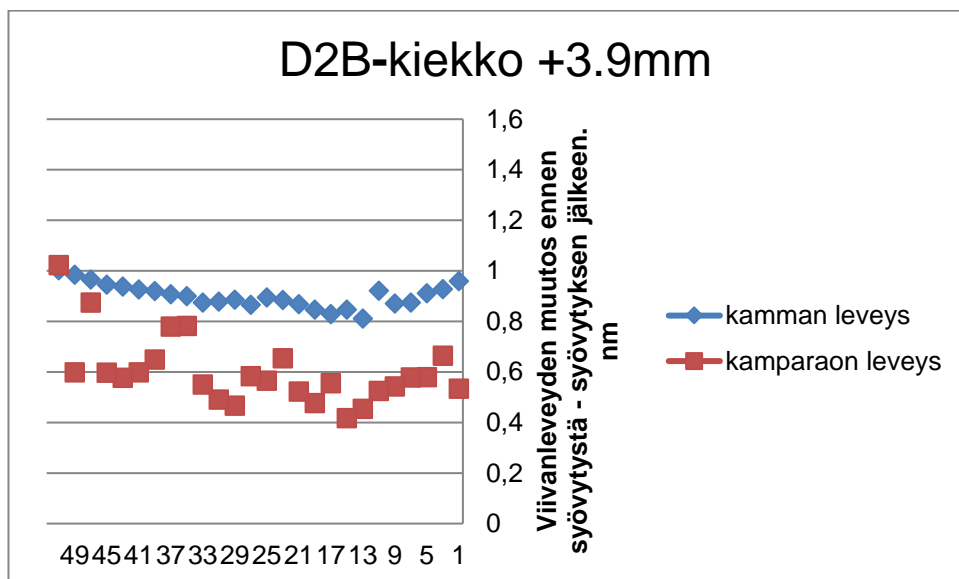
(76)



Kuva 3. Kamman ja kamparaon leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.

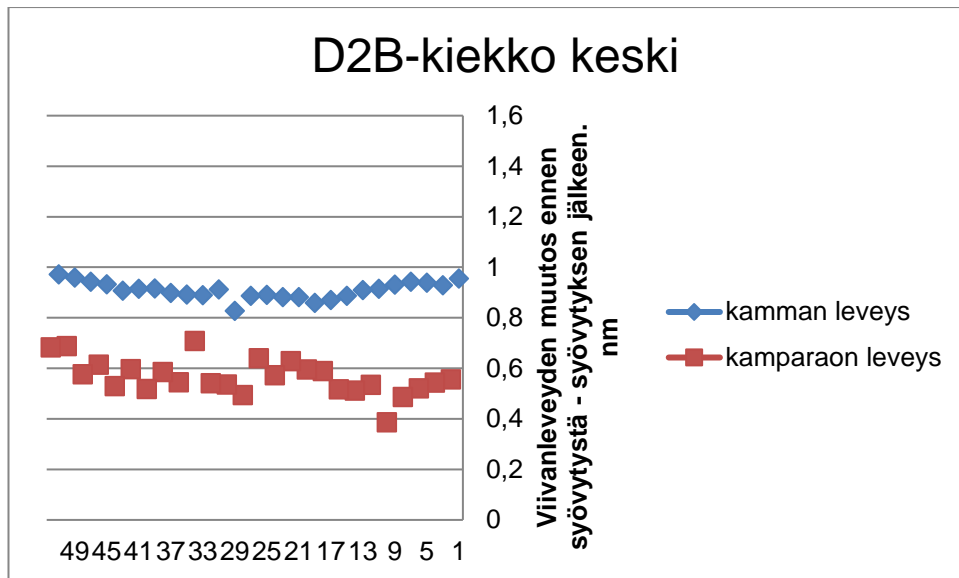
#### DRIE\_02B

DRIE\_02B-kammion graafinen esitys elementin kamman ja kamparaon leveyden muutoksesta eri syövytyspaikoituksessa kuvat 4, 5, 6.

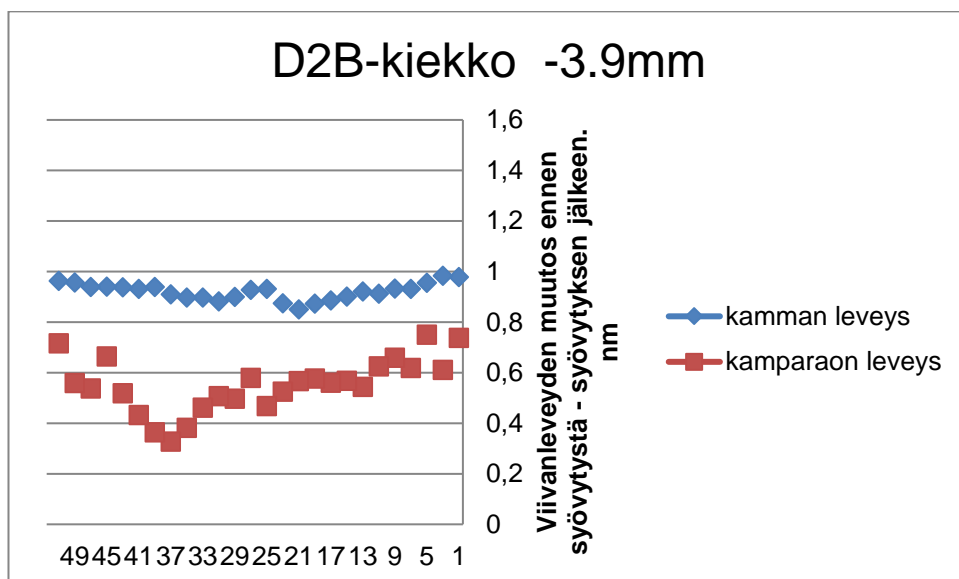


Kuva 4. Kamman ja kamparaon leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.

(76)



Kuva 5. Kamman ja kamparaon leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko keskellä.

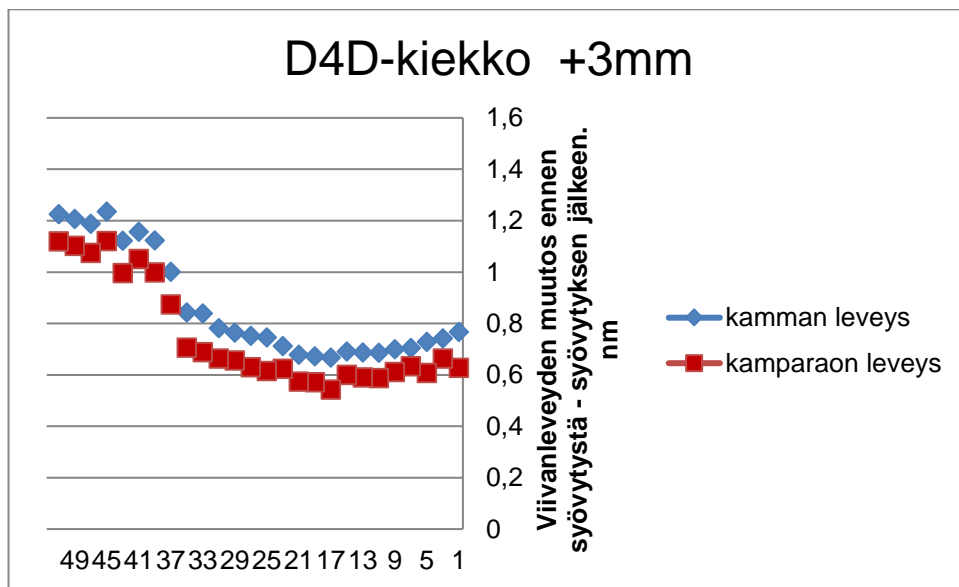


Kuva 6. Kamman ja kamparaon leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.

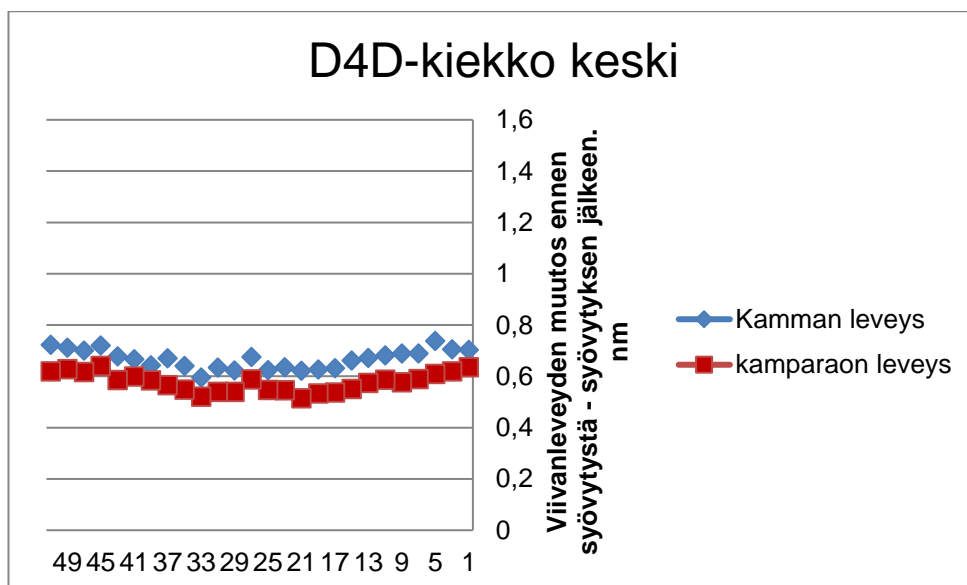
(76)

**DRIE\_04D**

DRIE\_04D-kammion graafinen esitys elementin kamman ja kamparaan leveyden muutoksesta eri syövytyspaikoituksessa kuvat 7, 8, 9.

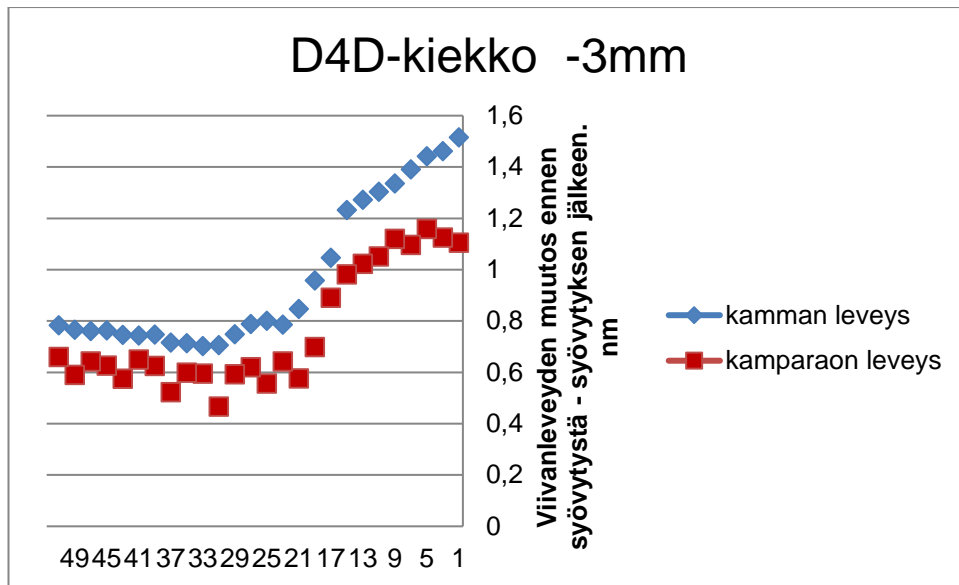


Kuva 7. Kamman ja kamparaan leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko 3 mm vasemmalla keskipisteestä.



Kuva 8. Kamman ja kamparaan leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko keskellä.

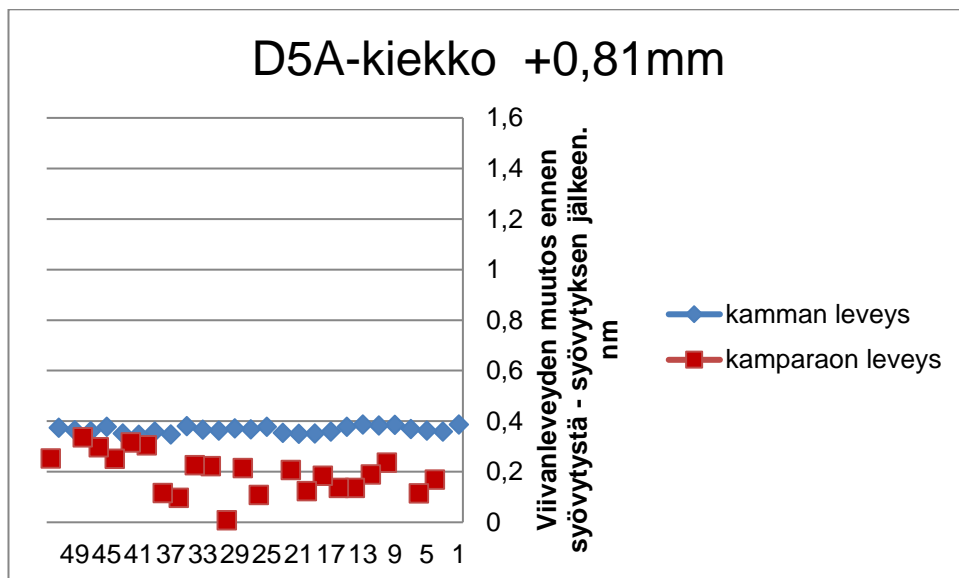
(76)



Kuva 9. Kamman ja kamparaon leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko 3 mm oikealla keskipisteestä.

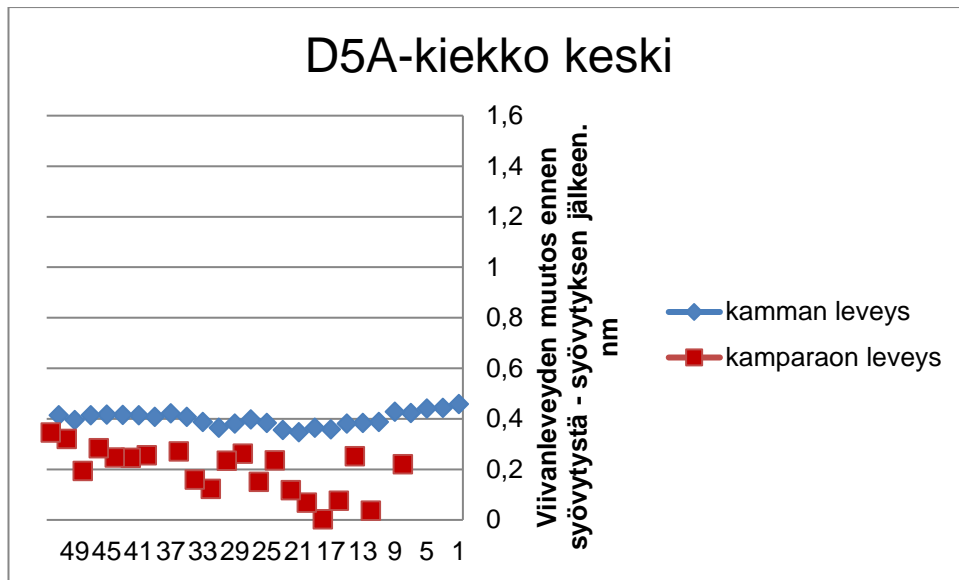
#### DRIE\_05A

DRIE\_05A-kammion graafinen esitys elementin kamman ja kamparaon leveyden muutoksesta eri syövytyspaikoituksessa kuvat 10, 11, 12.

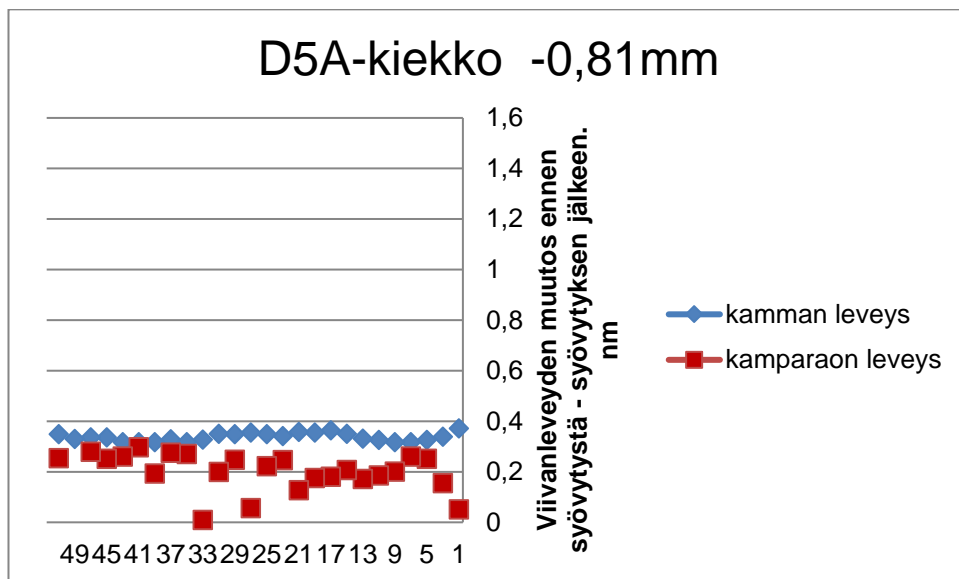


Kuva 10. Kamman ja kamparaon leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko 0,81 mm vasemmalla keskipisteestä.

(76)



Kuva 11. Kamman ja kamparaon leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko keskellä.

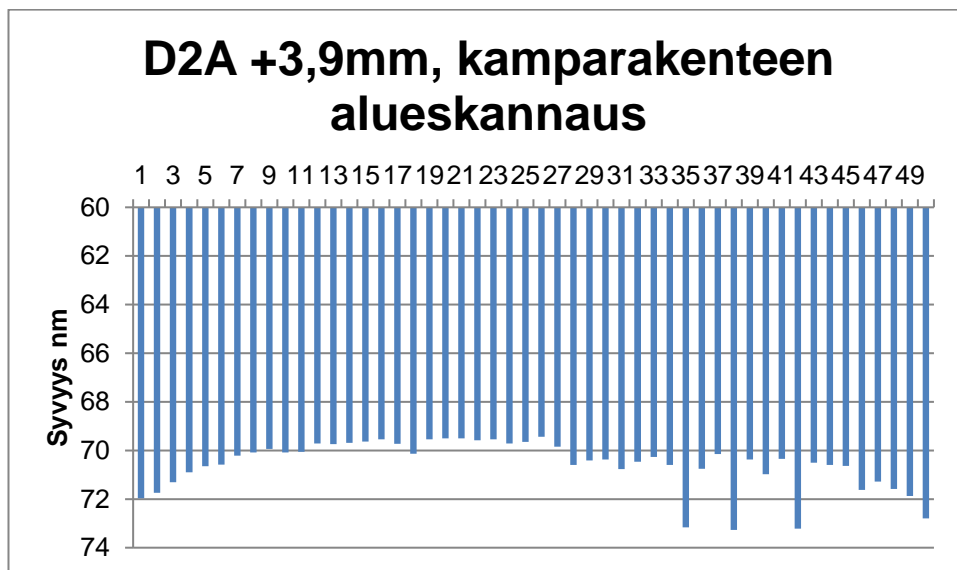


Kuva 12. Kamman ja kamparaon leveydenmuutosmittaustulokset, kiekko 0,81 mm oikealla keskipisteestä.

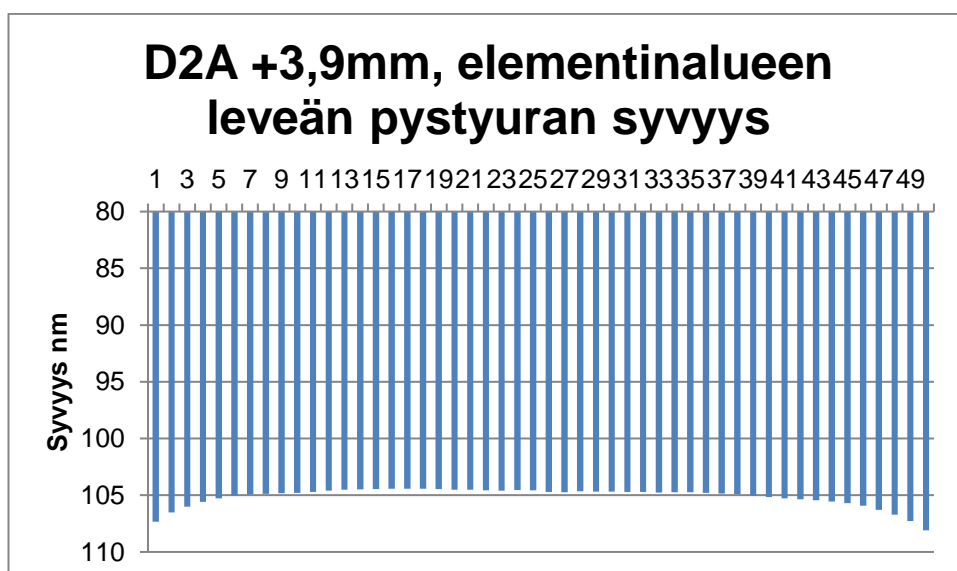
(76)

**DRIE\_02A-kiekot**

Kuviointikiekkojen graafiset syvyysmittaustulokset. Kiekot mitattiin optisella profiilometrillä kun syövytettiin syövytysalustalla kiekko 3,9 mm vasemmalle keskipisteestä kuvat 1, 2, 3. Kiekko keskellä alustaa kuvat 4, 5, 6 ja 3,9 mm kiekko oikealle keskipisteestä kuvat 7, 8, 9.

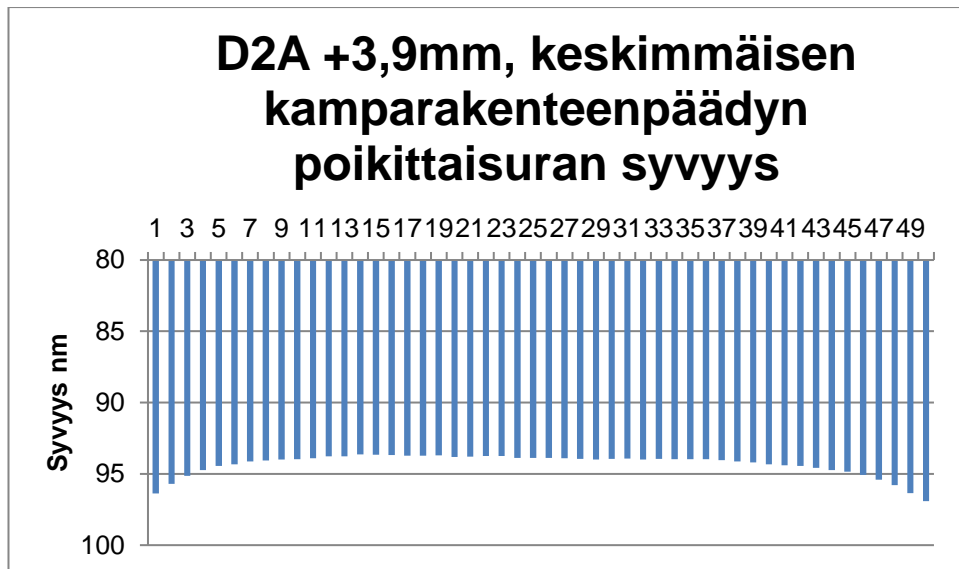


Kuva 1. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.

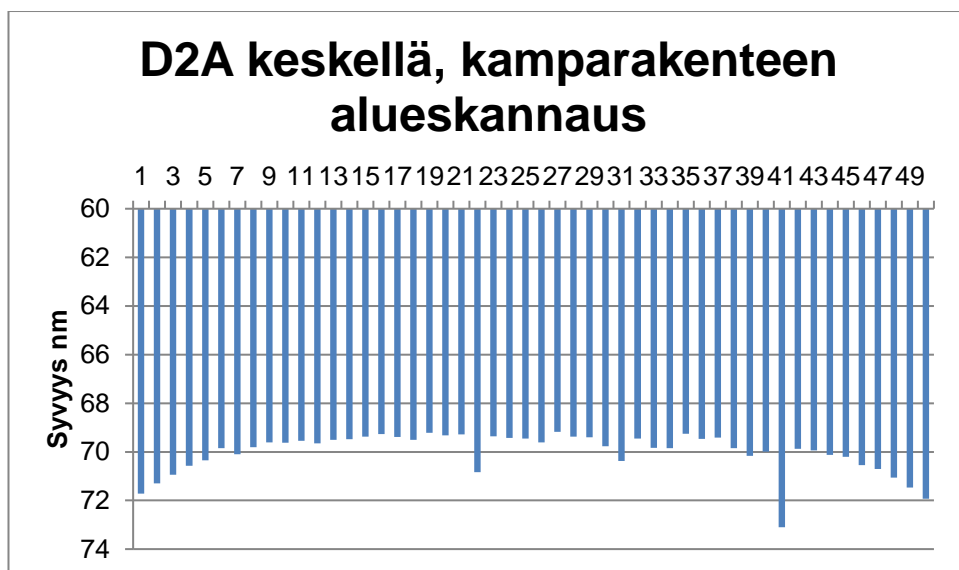


Kuva 2. Elementin alueen leveän pystyuran syvyys, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.

(76)

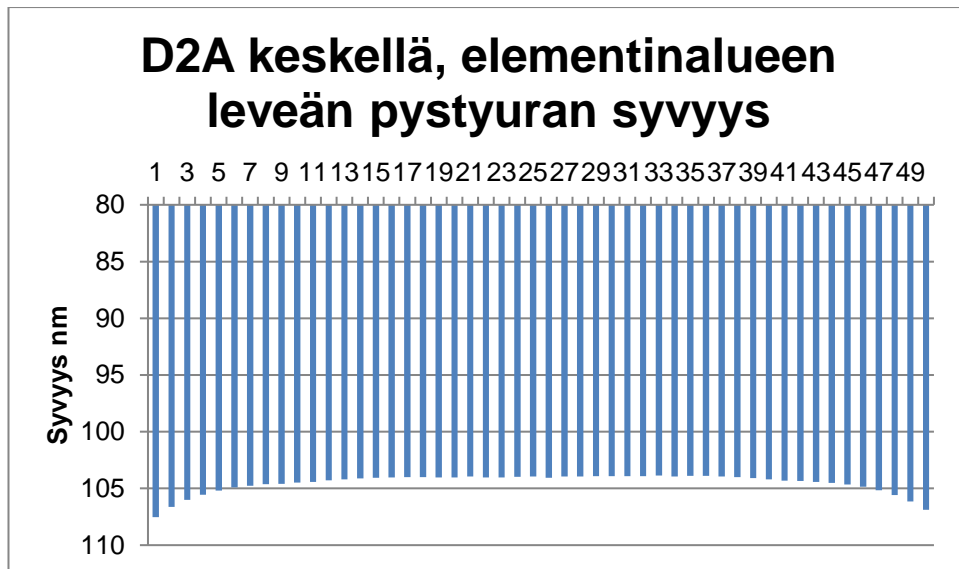


Kuva 3. Elementin alueen keskimmäisen kamparakenteenpäädyn poikittaisuran syvyys, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.

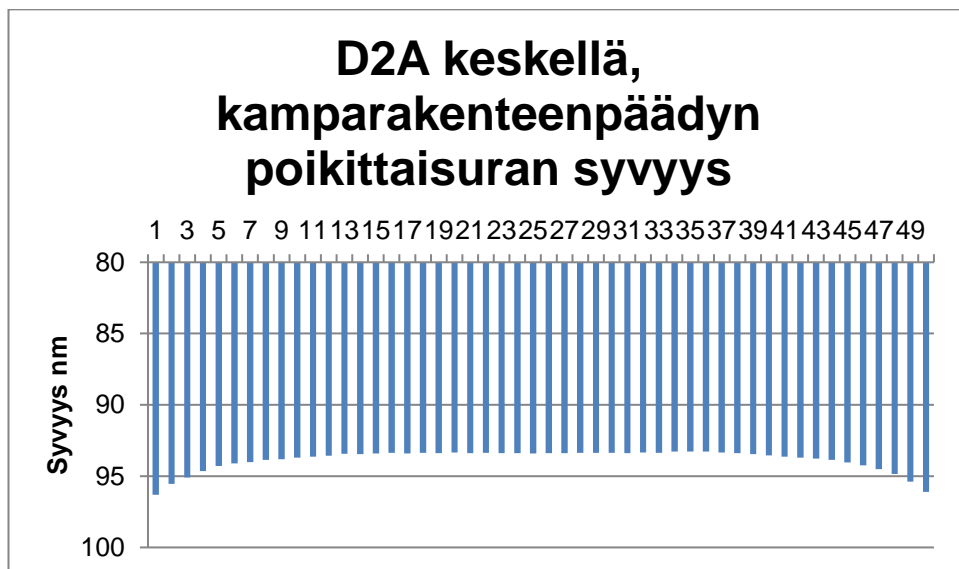


Kuva 4. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko keskellä.

(76)

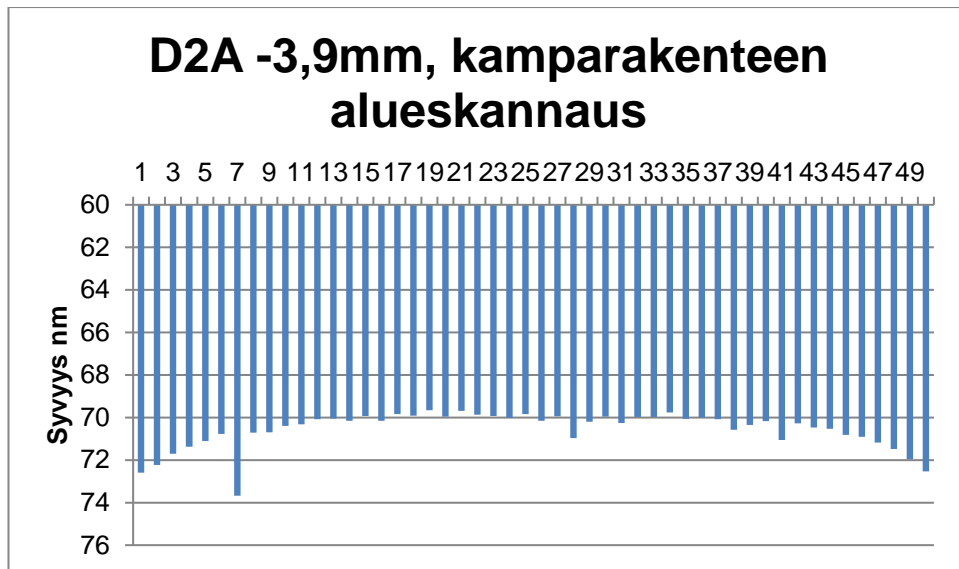


Kuva 5. Elementin alueen leveän pystyuran syvyys, kiekko keskellä.

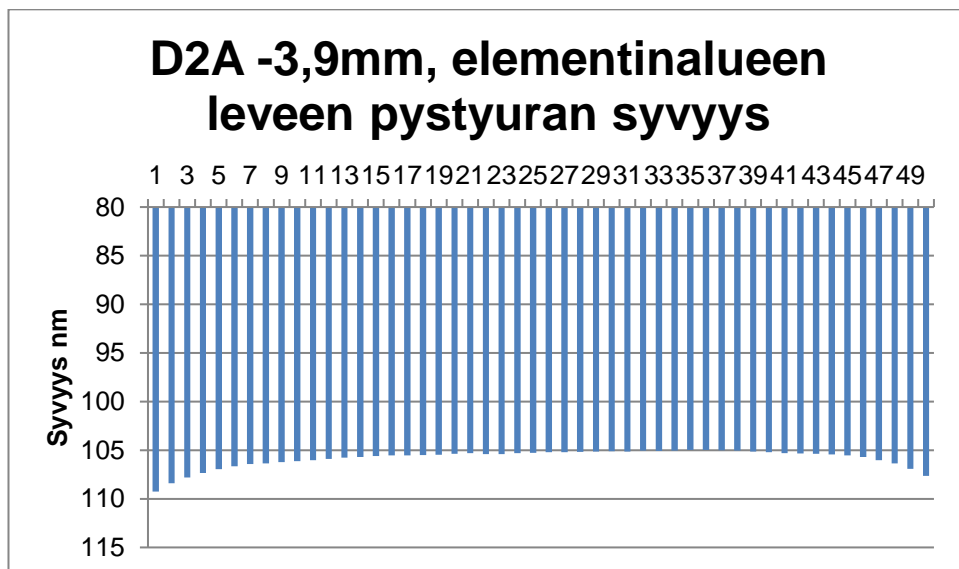


Kuva 6. Elementin alueen keskimmäisen kamparakenteenpäädyn poikittaisuran syvyys, kiekko keskellä.

(76)

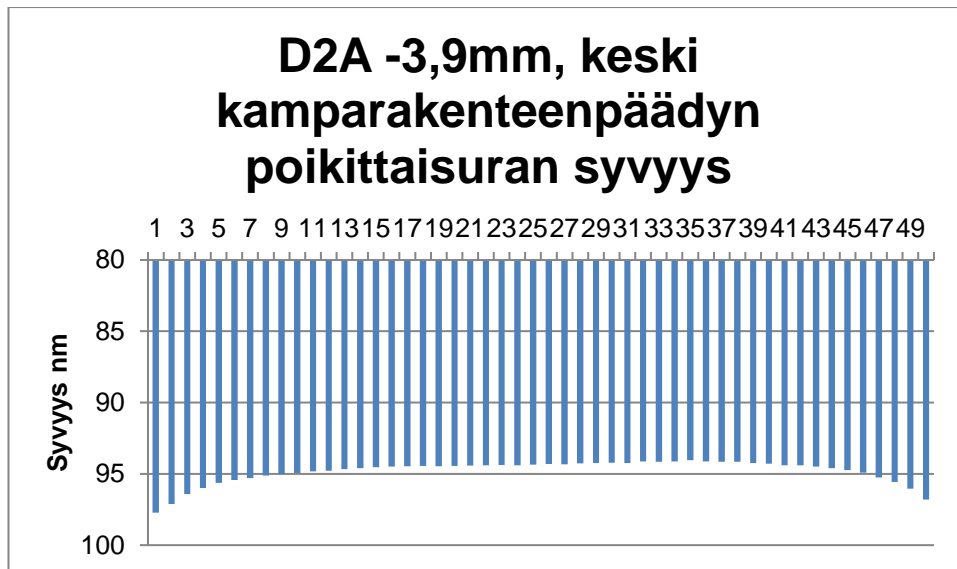


Kuva 7. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 8. Elementin alueen leveän pystyuran syvyys, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.

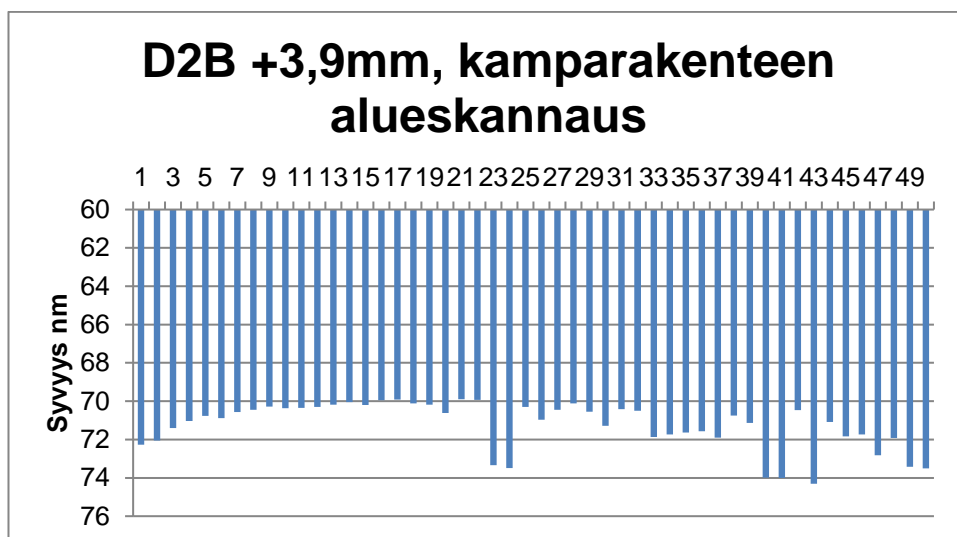
(76)



Kuva 9. Elementin alueen keskimmäisen kamparakenteenpäädyn poikittaisuran syvyys, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.

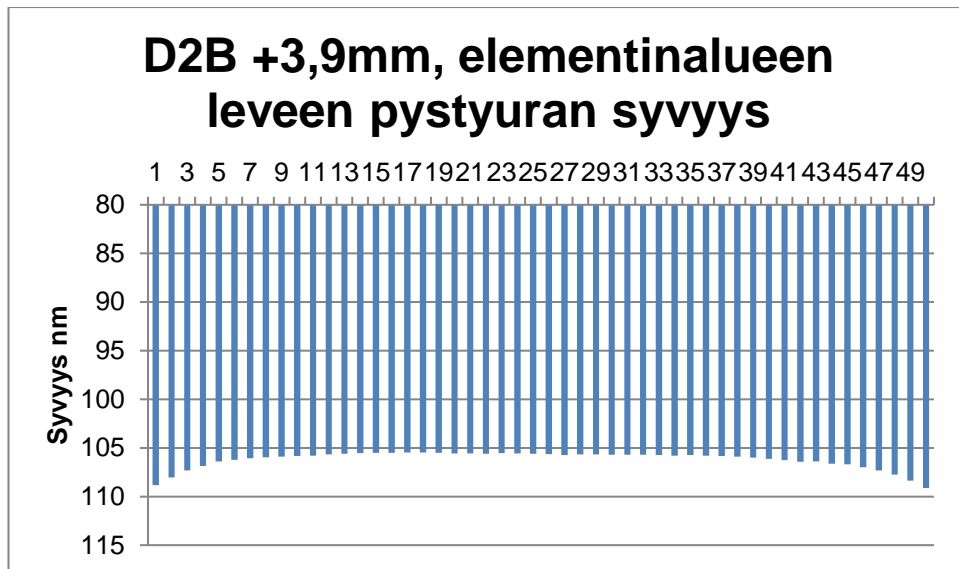
#### DRIE\_02B-kiekot

Kuviointikiekkojen graafiset syvyysmittaustulokset. Kiekot mitattiin optisella profiilometrillä kun syövytettiin syövytysalustalla kiekko 3,9 mm vasemmalle keskipisteestä kuvat 10, 11, 12. Keskellä alustaa kiekko kuvat 13, 14, 15 ja 3,9 mm kiekko oikealle keskipisteestä kuvat 16, 17, 18.

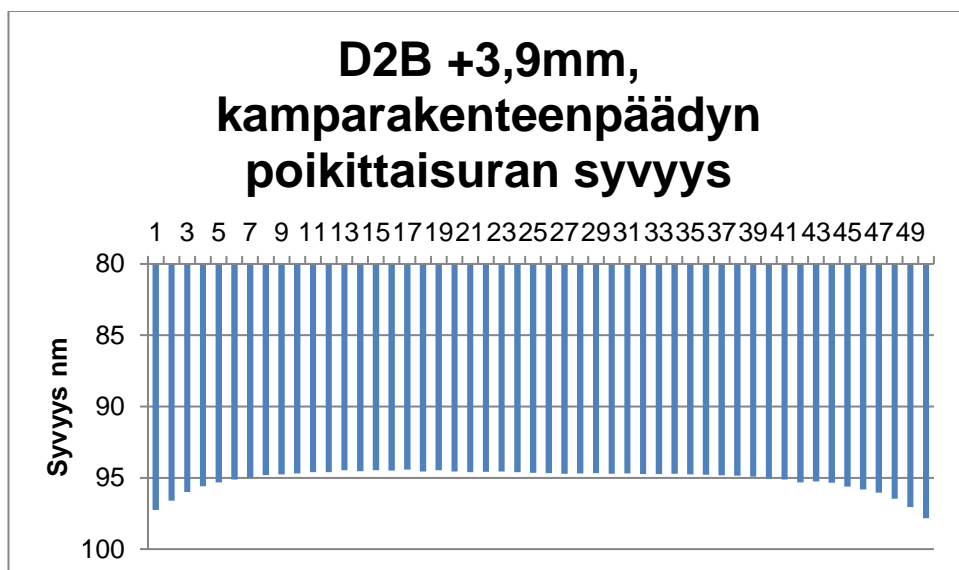


Kuva 10. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.

(76)

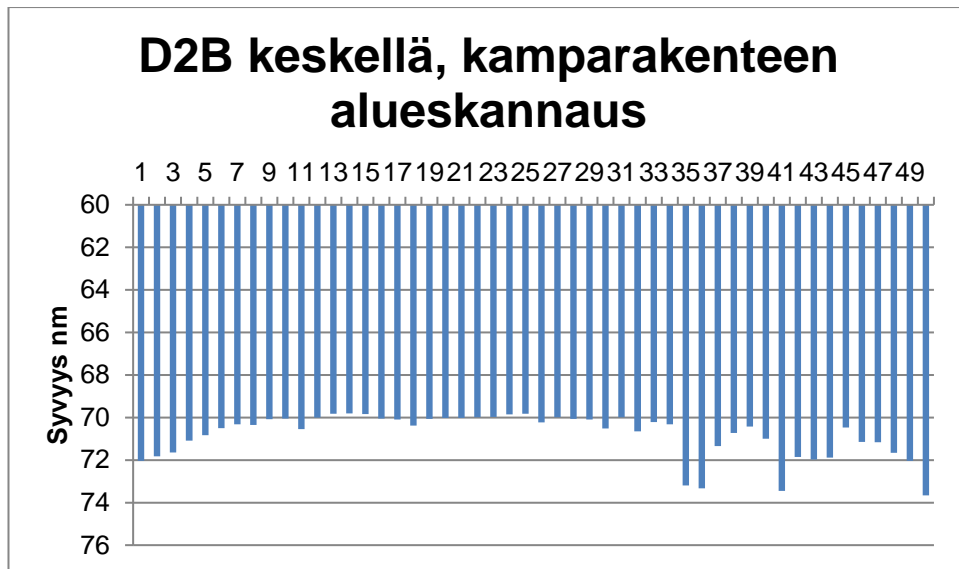


Kuva 11. Elementin alueen leveän pystyuran syvyys, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.

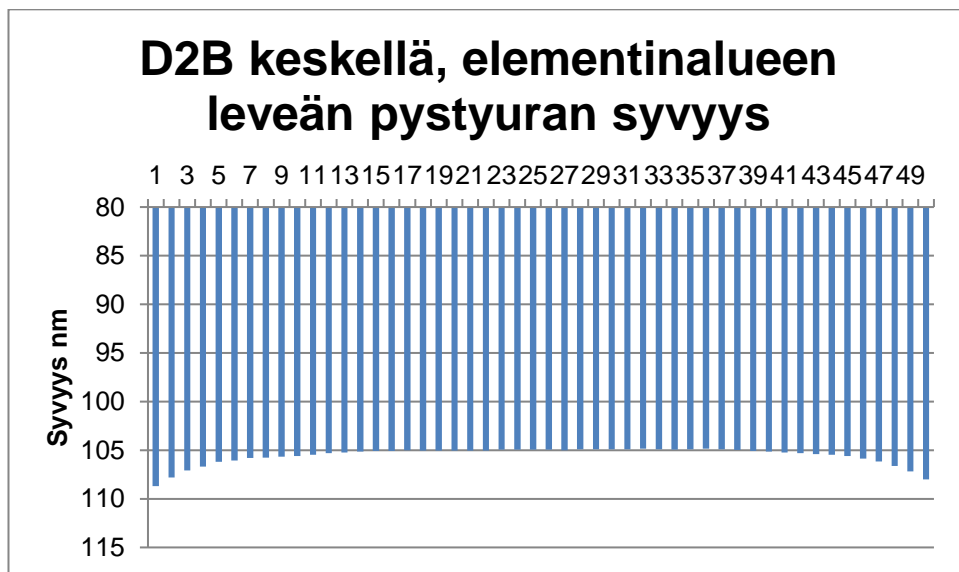


Kuva 12. Elementin alueen keskimmäisen kamparakenteenpäädyn poikittaisuran syvyys, kiekko 3,9 mm vasemmalla keskipisteestä.

(76)

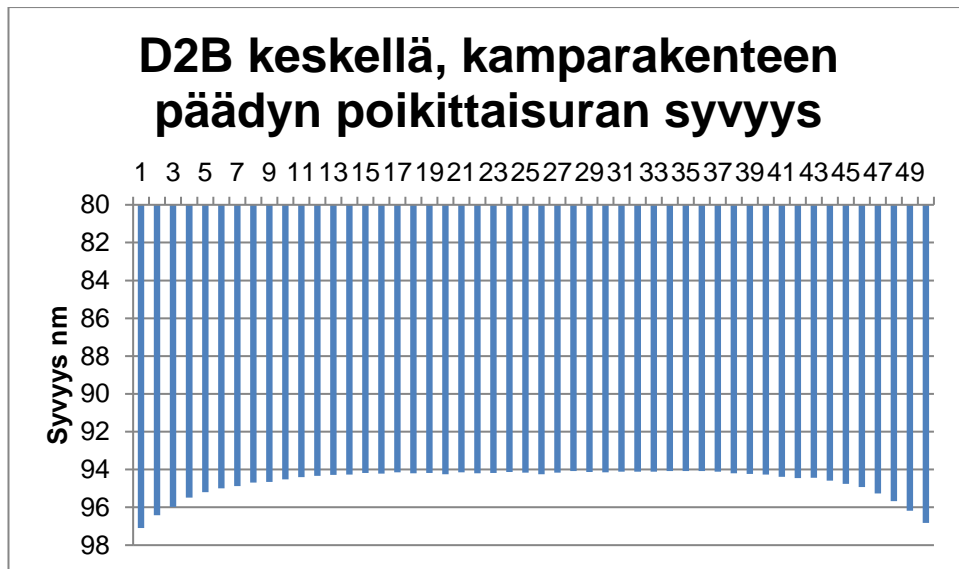


Kuva 13. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko keskellä.

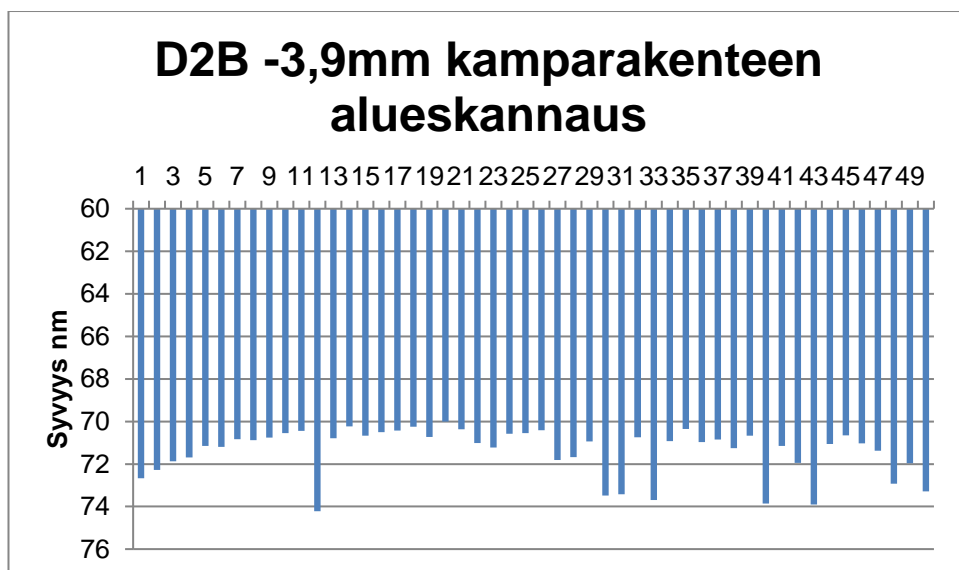


Kuva 14. Elementin alueen leveän pystyuran syvyys, kiekko keskellä.

(76)

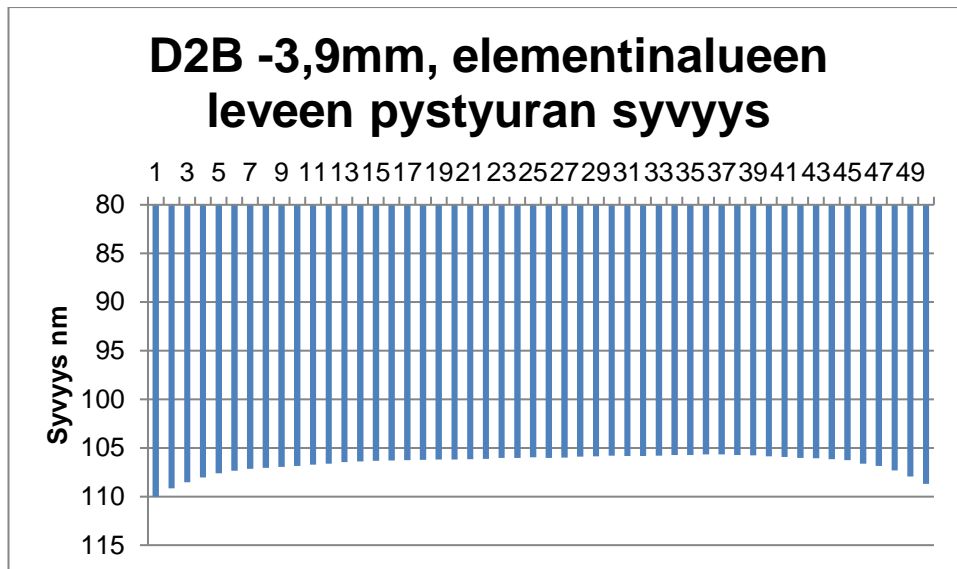


Kuva 15. Elementinalueen keskimmäisen kamparakenteen päädyn poikittaisuran syvyys, kiekko keskellä.

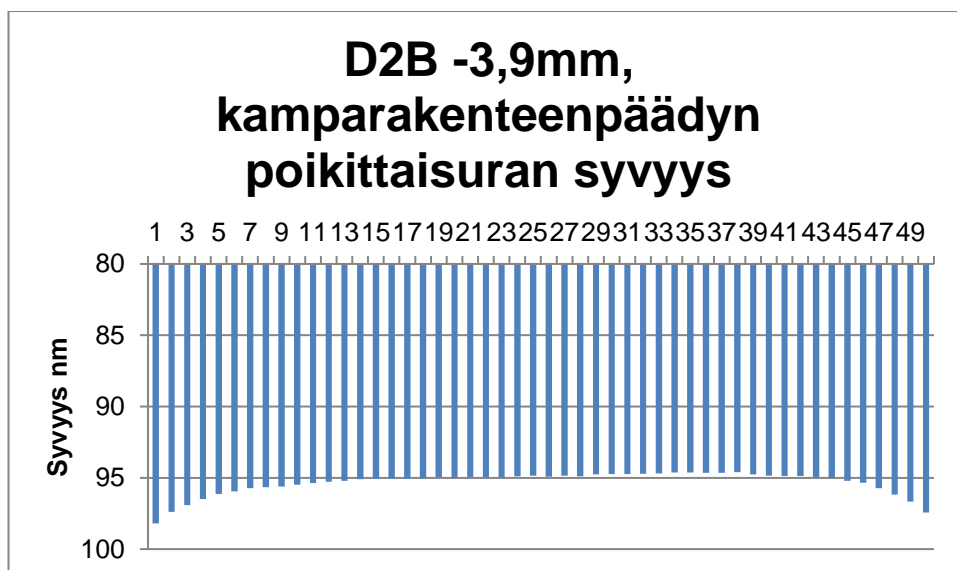


Kuva 16. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.

(76)



Kuva 17. Elementinalueen leveän pystyuran syvyys, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.

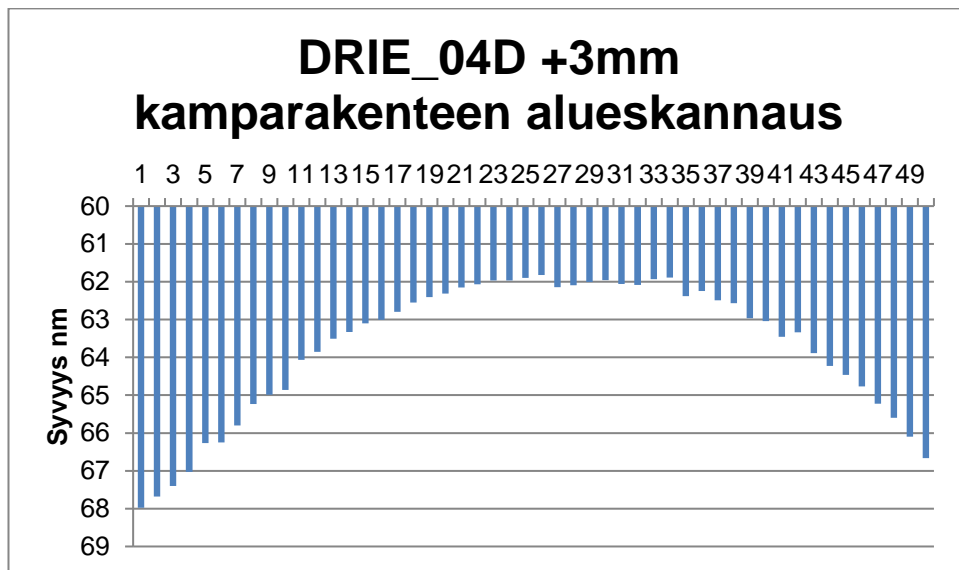


Kuva 18. Elementinalueen keskimmäisen kamparakenteen päädyn poikittaisuran syvyys, kiekko 3,9 mm oikealla keskipisteestä.

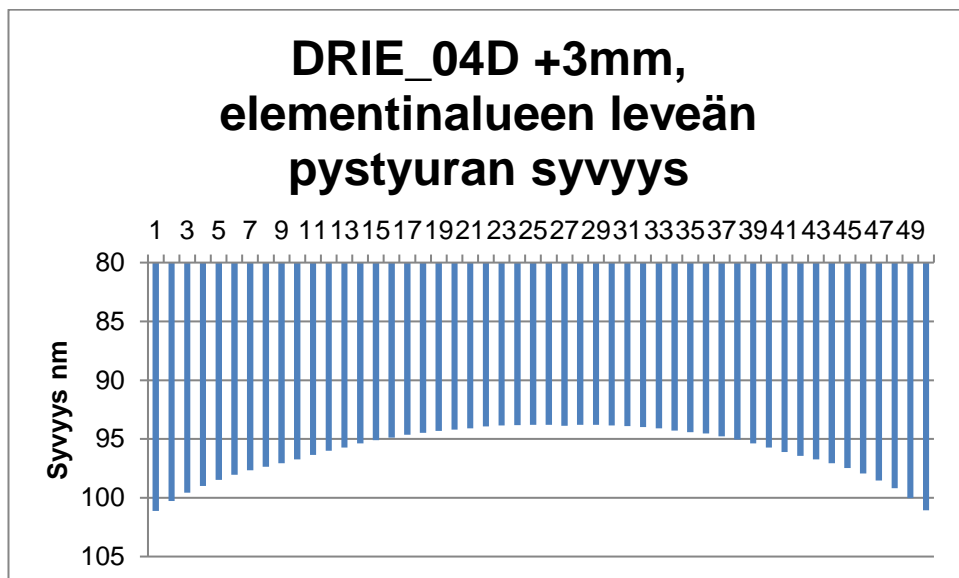
#### DRIE\_04D-kiekot

Kuvointi kiekkojen graafiset syvyysmittaustulokset. Kiekot mitattiin optisella profiilometrillä kun syövytettiin syövytysalustalla kiekko 3 mm vasemmalle keskipisteestä kuvat 19, 20, 21. Keskellä alustaa kiekko kuvat 22, 23, 24 ja 3 mm kiekko oikealle keskipisteestä kuvat 25, 26, 27.

(76)

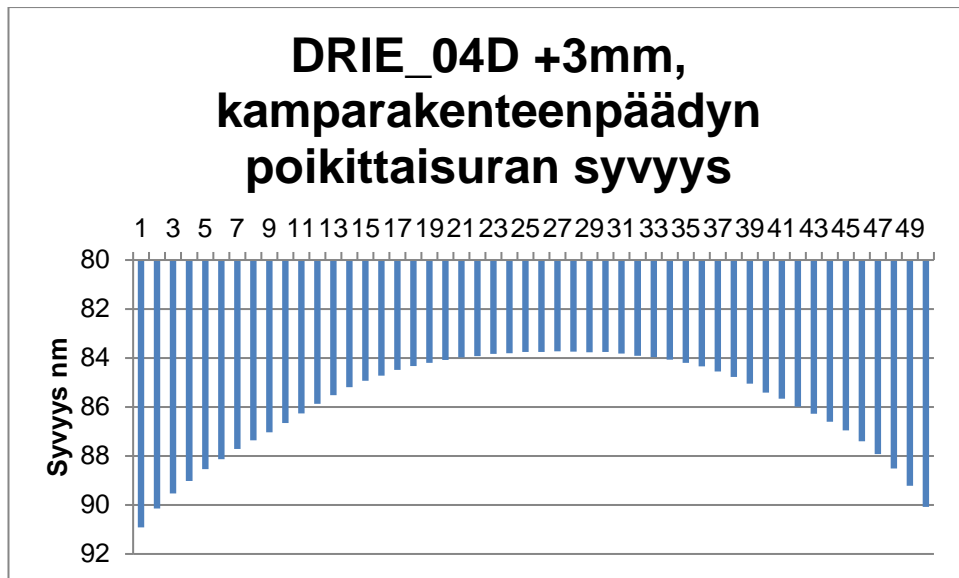


Kuva 19. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko 3 mm vasemmalla keskipisteestä.

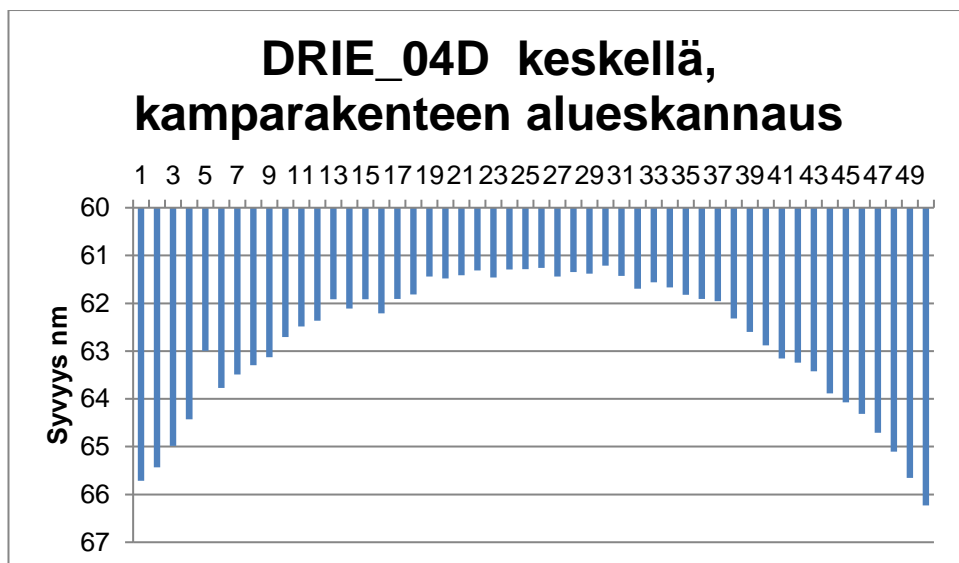


Kuva 20. Elementin alueen leveän pystyuran syvyys, kiekko 3 mm vasemmalla keskipisteestä.

(76)

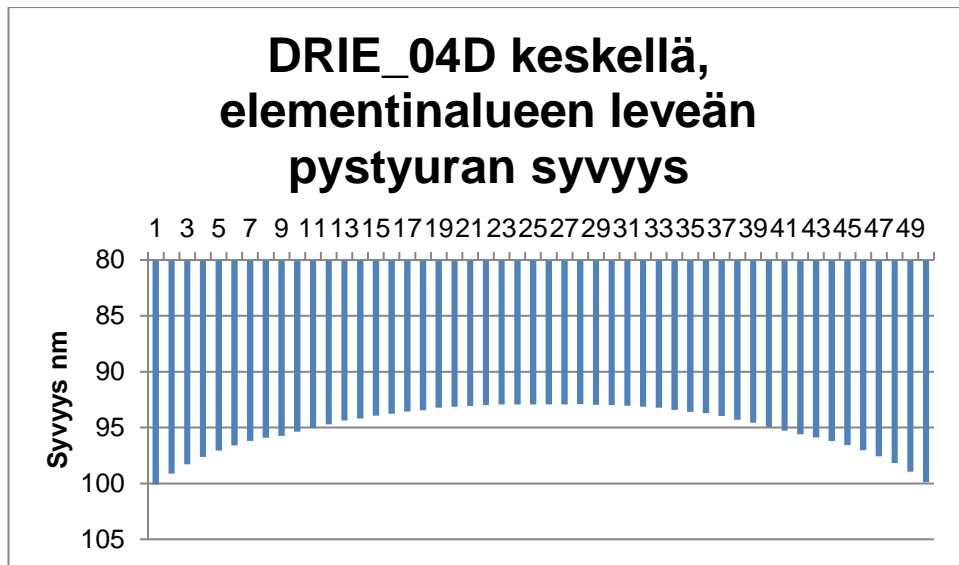


Kuva 21. Elementin alueen keskimmäisen kamparakenteen päädyn poikittaisuran syvyys, kiekko 3 mm vasemmalla keskipisteestä.

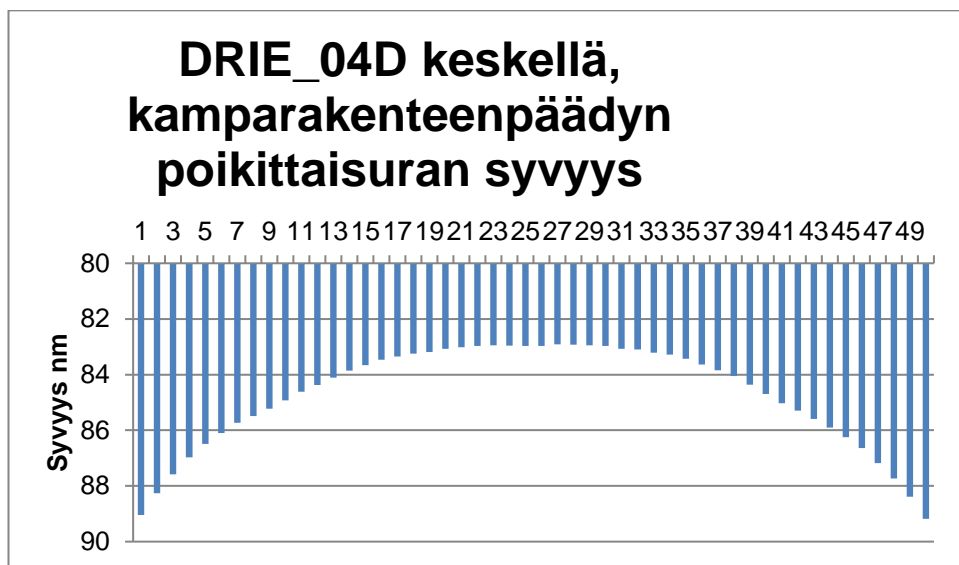


Kuva 22. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko keskellä.

(76)

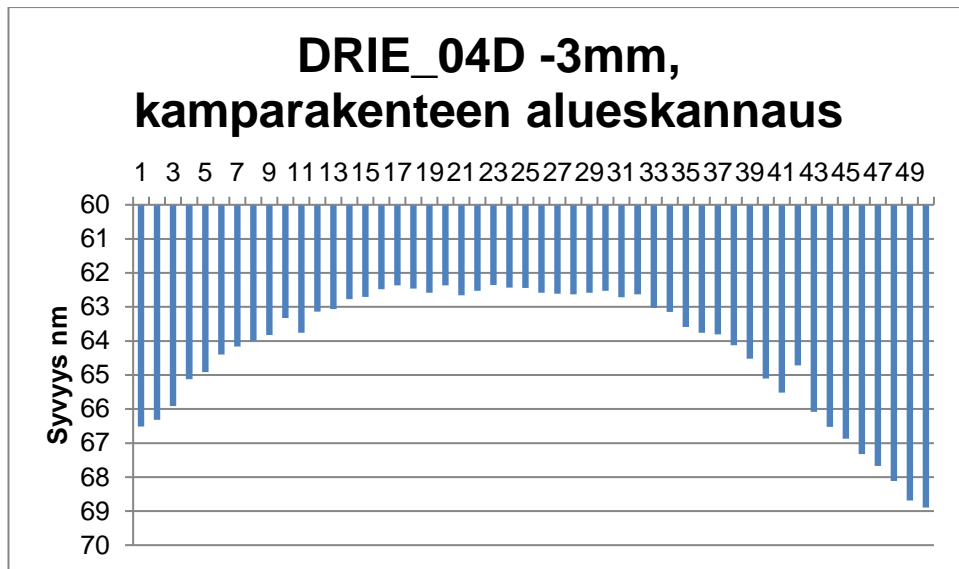


Kuva 23. Elementinalueen leveän pystyuran syvyys, kiekko keskellä.

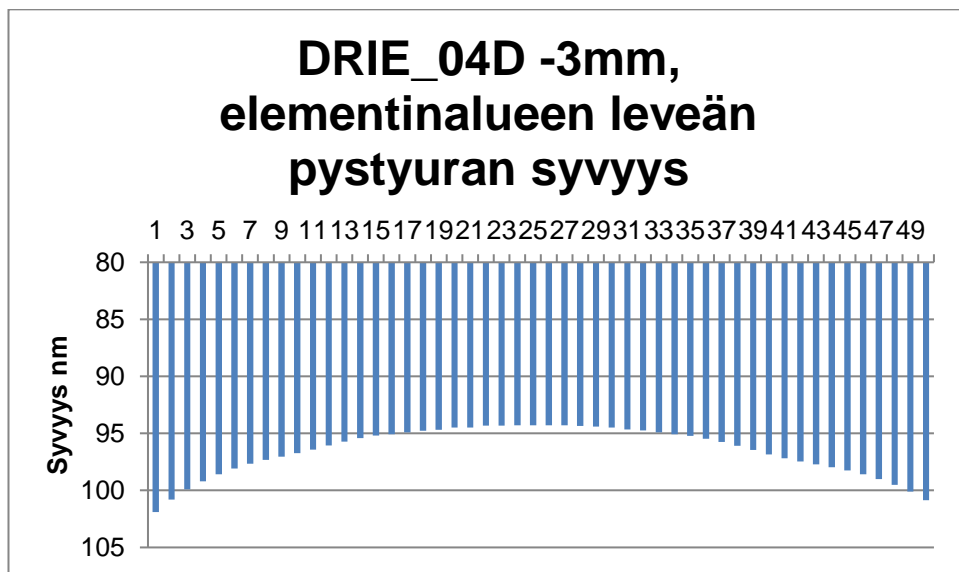


Kuva 24. Elementinalueen keskimmäisen kamparakenteen päädyn poikittaisuran syvyys, kiekko keskellä.

(76)

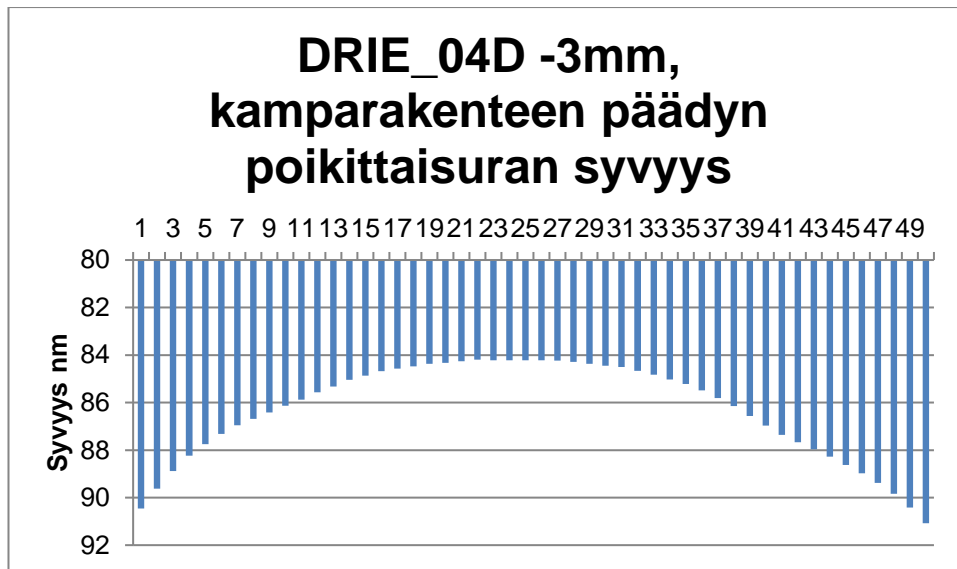


Kuva 25. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko 3 mm oikealla keskipisteestä.



Kuva 26. Elementin alueen leveän pystyuran syvyys, kiekko 3 mm oikealla keskipisteestä.

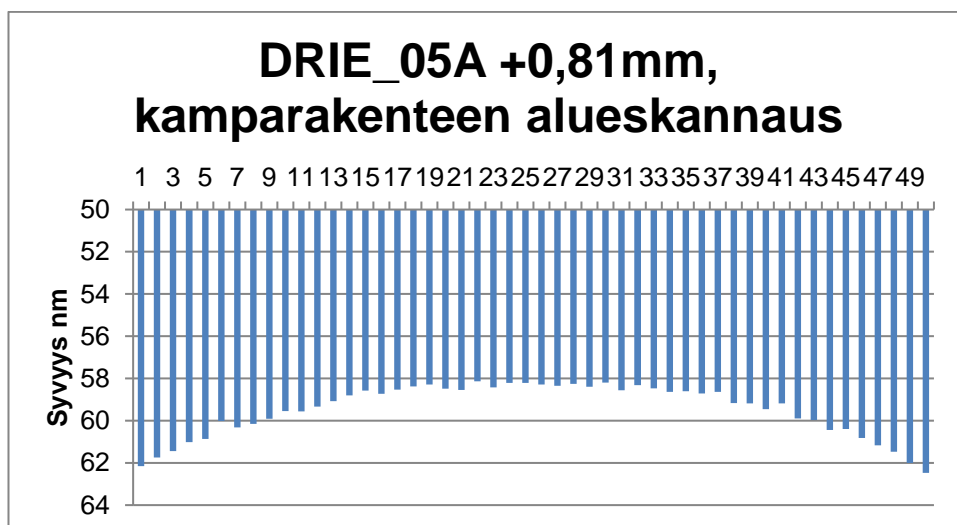
(76)



Kuva 27. Elementinalueen keskimmäisen kamparakenteen päädyn poikittaisuran syvyys, kiekko 3 mm oikealla keskipisteestä.

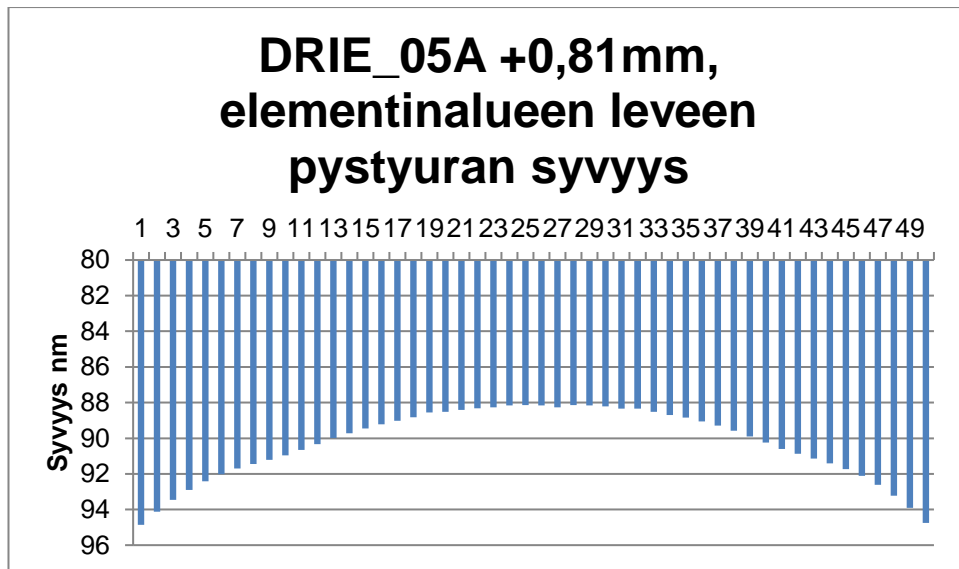
#### DRIE\_05A-kiekot

Kuviointikiekkojen graafiset syvyysmittaustulokset. Kiekot mitattiin optisella profiilometrillä kun syövytettiin syövytysalustalla kiekko 0,81 mm vasemmalle keskipisteestä kuvat 28, 29, 30. Keskellä alustaa kiekko kuvat 31, 32, 33 ja 3,9 mm kiekko oikealle keskipisteestä kuvat 34, 35, 36.

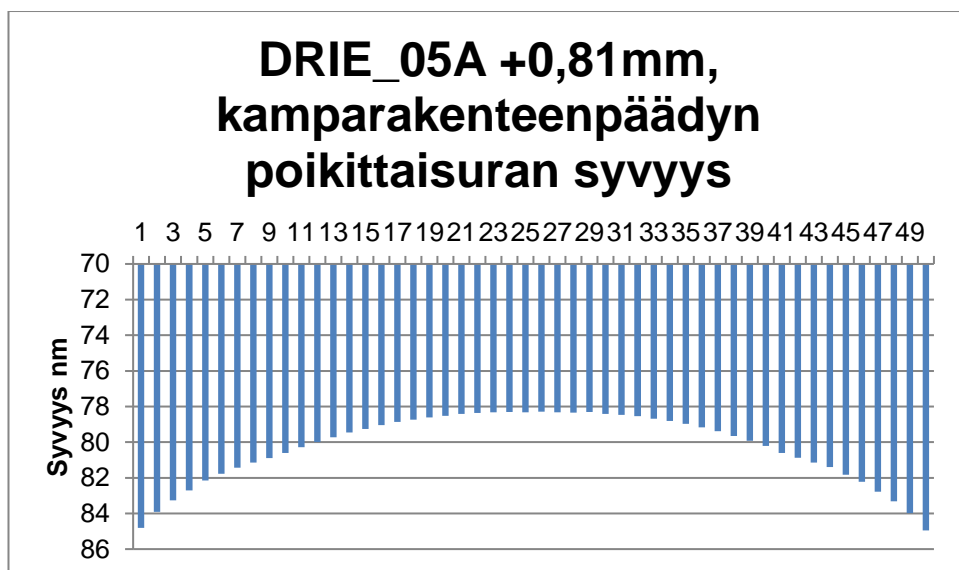


Kuva 28. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko 0,81 mm vasemmalla keskipisteestä.

(76)

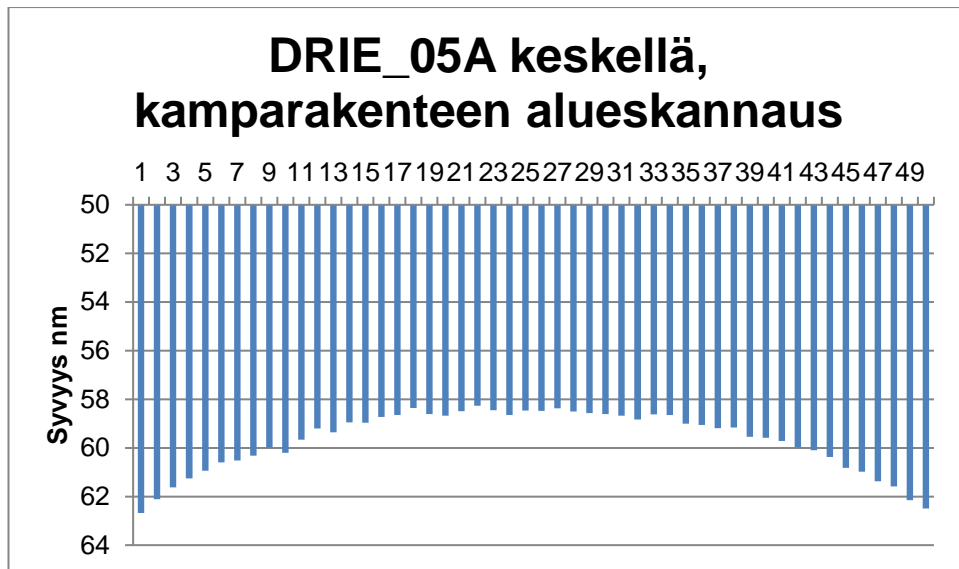


Kuva 29. Elementinalueen leveän pystyuran syvyys, kiekko 0,81 mm vasemmalla keskipisteestä.

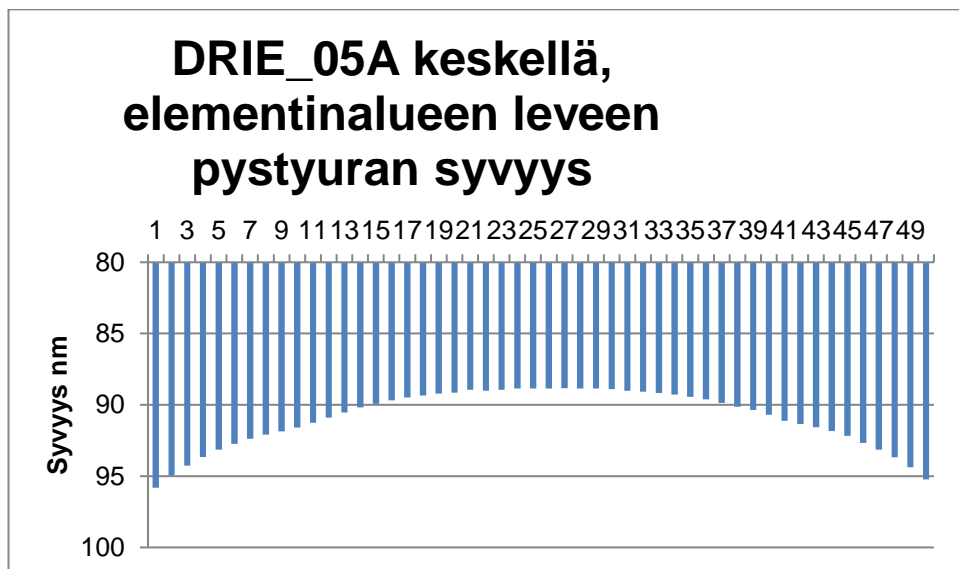


Kuva 30. Elementinalueen keskimmäisen kamparakenteen päädyn poikittaisuran syvyys, kiekko 0,81 mm vasemmalla keskipisteestä.

(76)

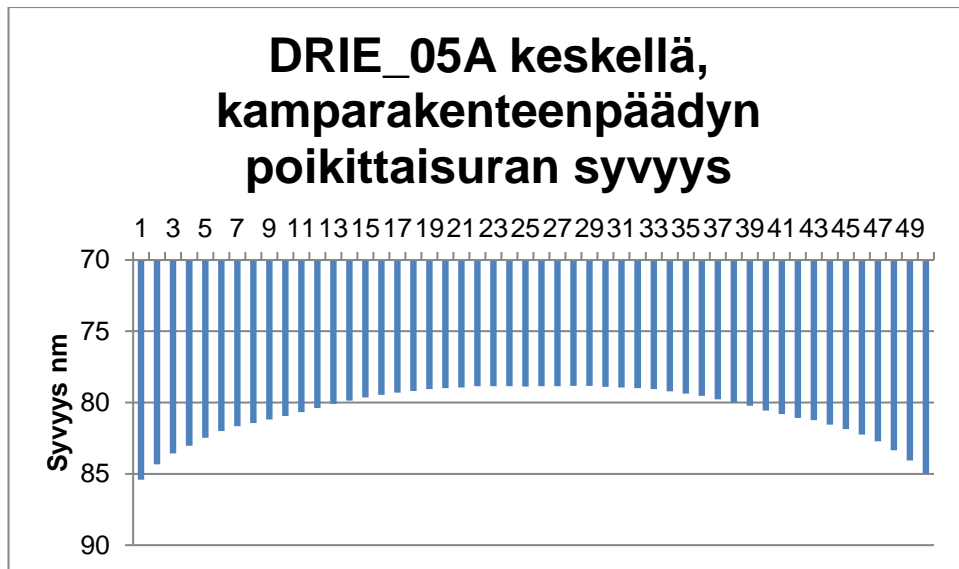


Kuva 31. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko keskellä.

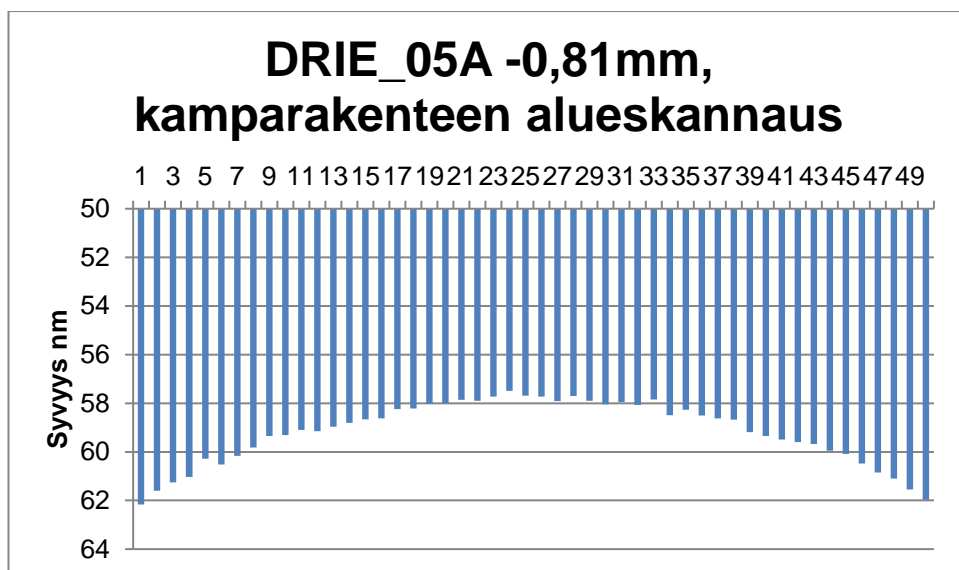


Kuva 32. Elementin alueen leveän pystyuran syvyys, kiekko keskellä.

(76)

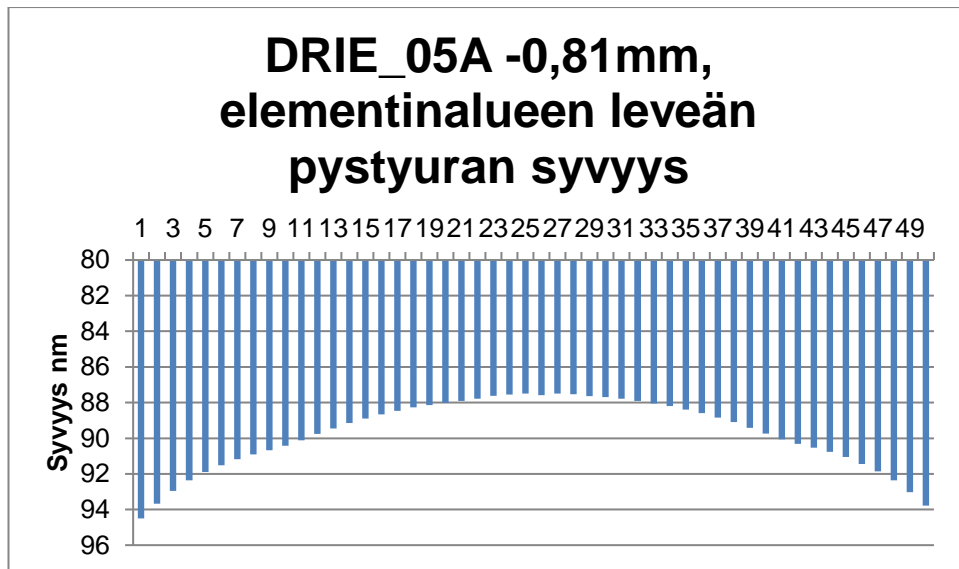


Kuva 33. Elementin alueen keskimmäisen kamparakenteen päädyn poikittaisuran syvyys, kiekko keskellä.

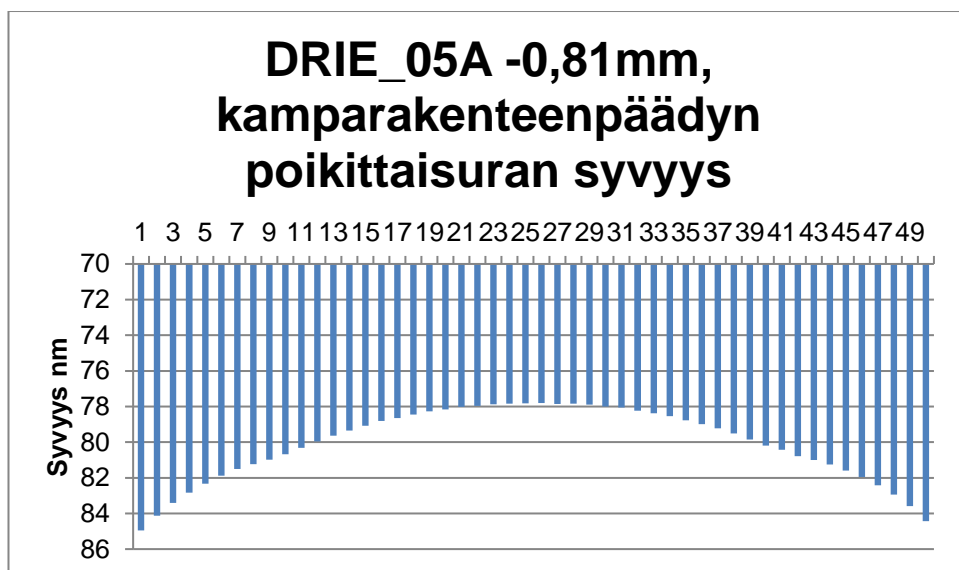


Kuva 34. Kamparakenteen alueskannaus, kiekko 0,81 mm oikealla keskipisteestä.

(76)



Kuva 35. Elementinalueen leveän pystyuran syvyys, kiekko 0,81 mm oikealla keskipisteestä.

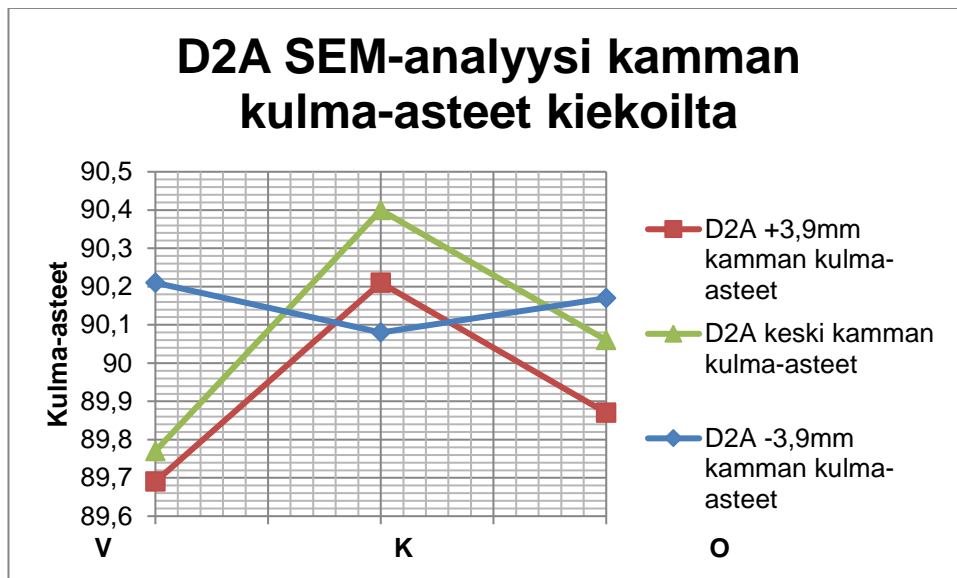


Kuva 36. Elementinalueen keskimmäisen kamparakenteen päädyn poikittaisuran syvyys, kiekko 0,81 mm oikealla keskipisteestä.

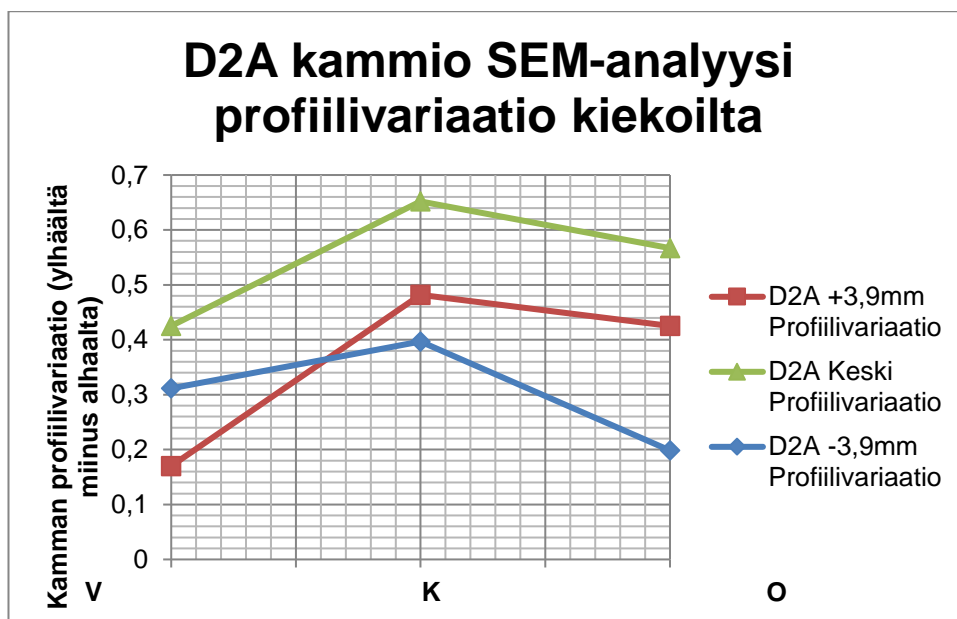
(76)

**DRIE\_02A-kiekot**

Kuviointikiekon eri paikoituksen vaikutus kammanrakenteen kulma-asteeseen graafinen esitys. Kiekkojen profiilivariaatio graafinen esitys. Variaatio laskettiin kiekkoilta kammanrakenteen leveys ylhäältä vähennettynä kammanrakenteen leveys alhaalta.



Kuva 1. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin kamman kulma-asteet mittaustulokset kiekkoilta.

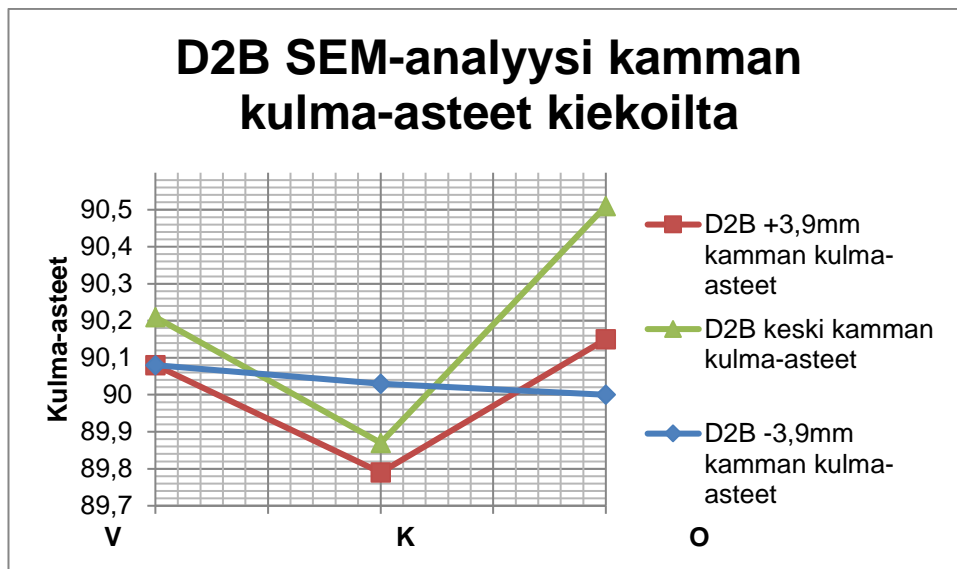


Kuva 2. Pyyhkäisyelektronimikroskooppi mittaustulokset profiilivariaatio.

(76)

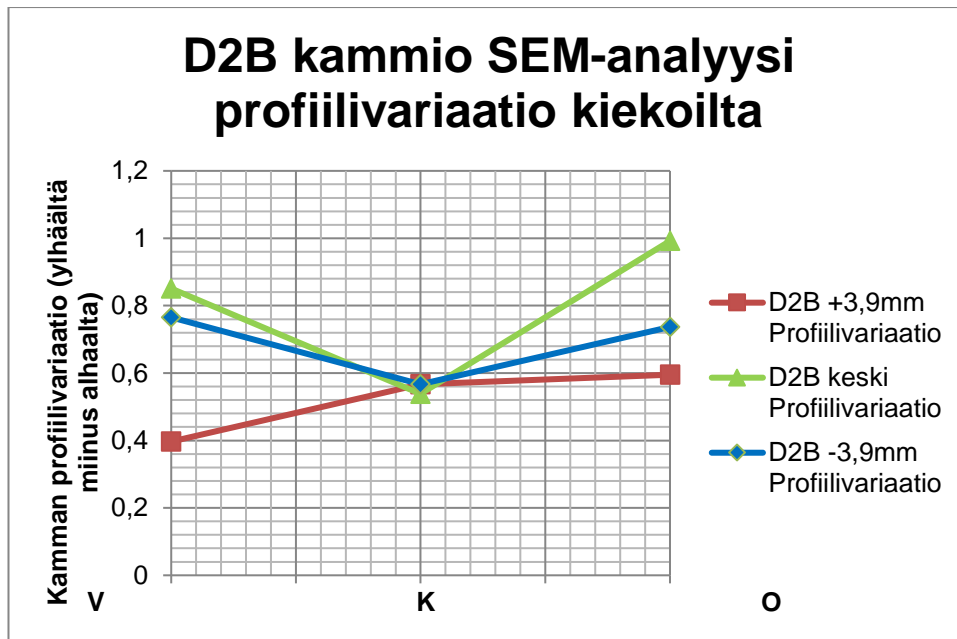
**DRIE\_02B-kiekot**

Kuviointikiekon eri paikoituksen vaikutus kammanrakenteen kulma-asteeseen graafinen esitys. Kiekkojen profiilivariaatio graafinen esitys. Variaatio laskettiin kiekoilta kammanrakenteen leveys ylhäältä vähennettynä kammanrakenteen leveys alhaalta.



Kuva 3. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin mittaustulokset kamman kulma-asteet.

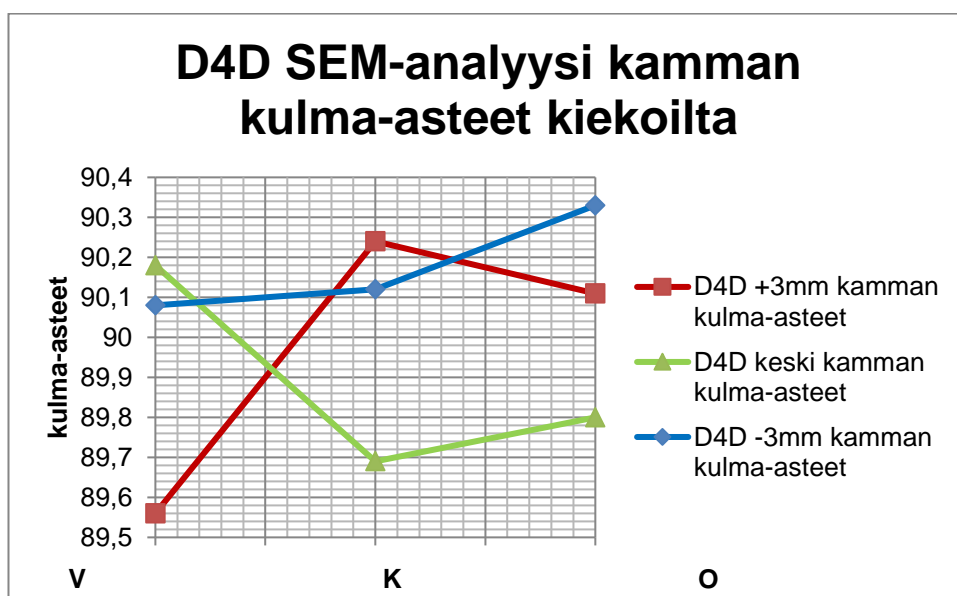
(76)



Kuva 4. Pyyhkäisyelektronimikroskoopi mittaukset profiilivariaatio tulokset kiekoilta.

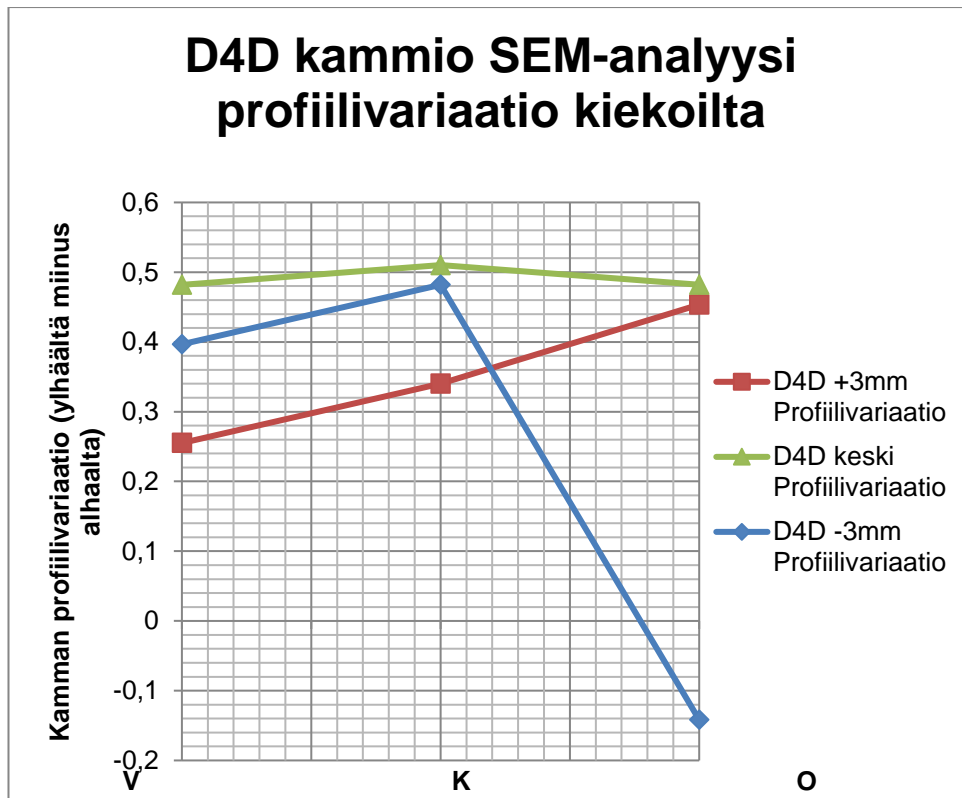
#### DRIE\_04D-kiekot

Kuviointikiekon eri paikoituksen vaikutus kammanrakenteen kulma-asteeseen graafinen esitys. Kiekkojen profiilivariaatio graafinen esitys. Variaatio laskettiin kiekoilta kammanrakenteen leveys ylhäältä vähennettynä kammanrakenteen leveys alhaalta.



Kuva 5. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin mittaustulokset kamman kulma-asteet.

(76)

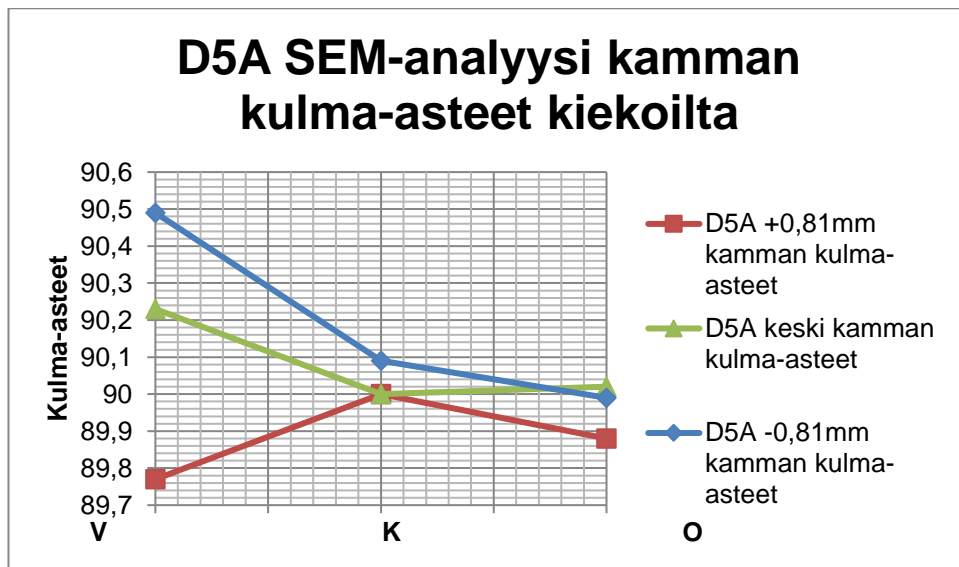


Kuva 6. Pyyhkäisyelektronimikroskoopi mittaukset profiilivariaatio tulokset kiekoilta.

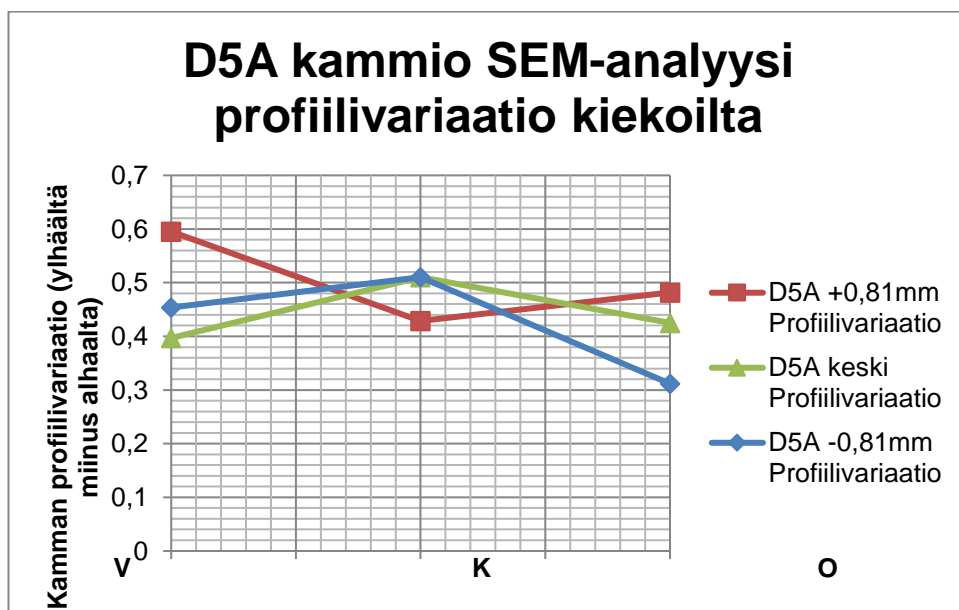
(76)

**DRIE\_05A-kiekot**

Kuviointi kiekon eri paikoituksen vaikutus kammanrakenteen kulma-asteeseen graafinen esitys. Kiekkojen profiilivariaatio graafinen esitys. Variaatio laskettiin kiekoilta kammanrakenteen leveys ylhäältä vähennettynä kammanrakenteen leveys alhaalta.



Kuva 7. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin mittaustulokset kamman kulma-asteet.

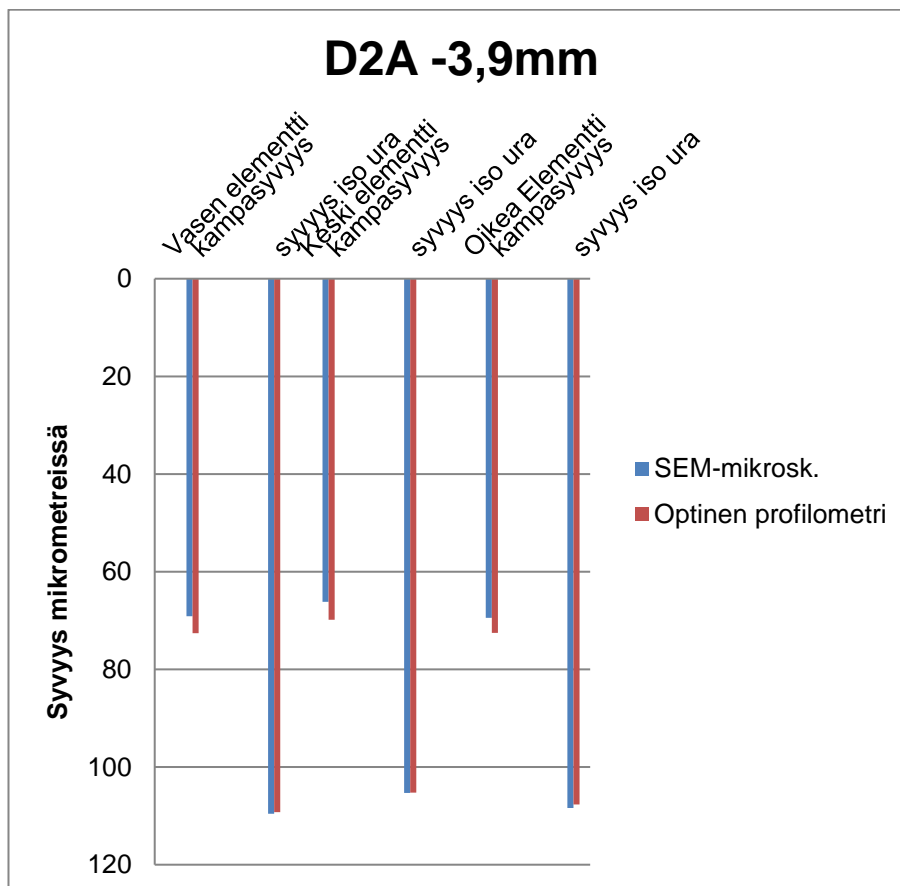


Kuva 8. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin mittaukset profiilivariaatio tulokset kiekoilta.

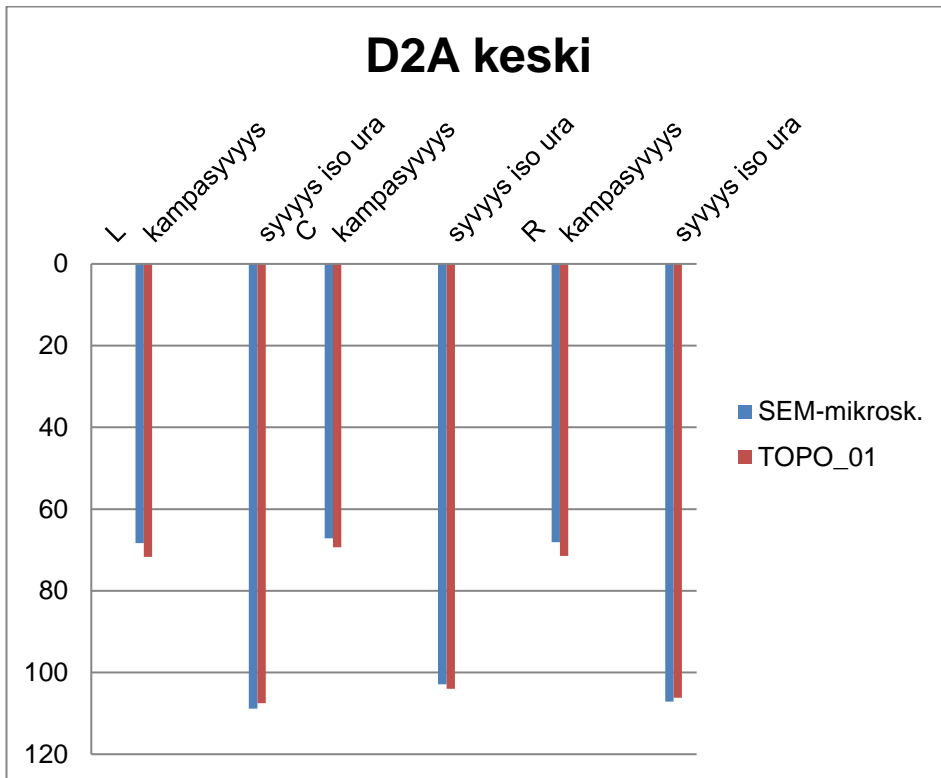
## Eri mittausmenetelmien vertailu

Eri mittausmenetelmissä tehtiin syvyysmittausvertailua pyyhkäisyelektronimikroskoopin ja Optisen profilometrin välillä. Syvyysmittaukset tehtiin kuviointikiekoilta ja mittauskohdat laitteilla olivat suurin piirtein samat.

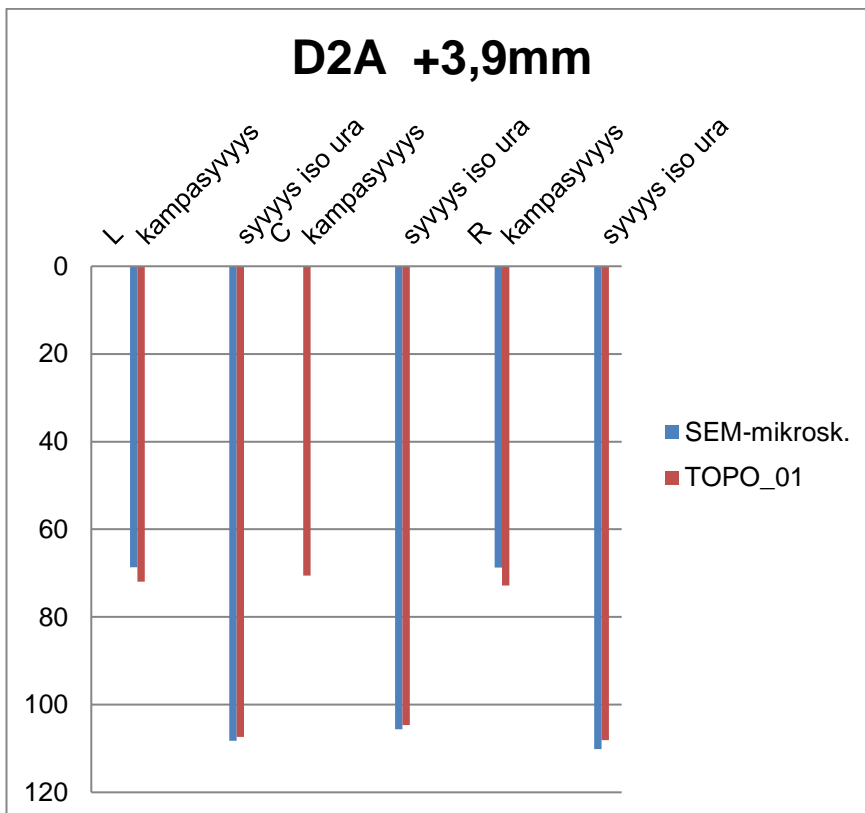
### DRIE\_02A-kiekot



Kuva 1. DRIE\_02A-kammion mittausmenetelmien vertailu

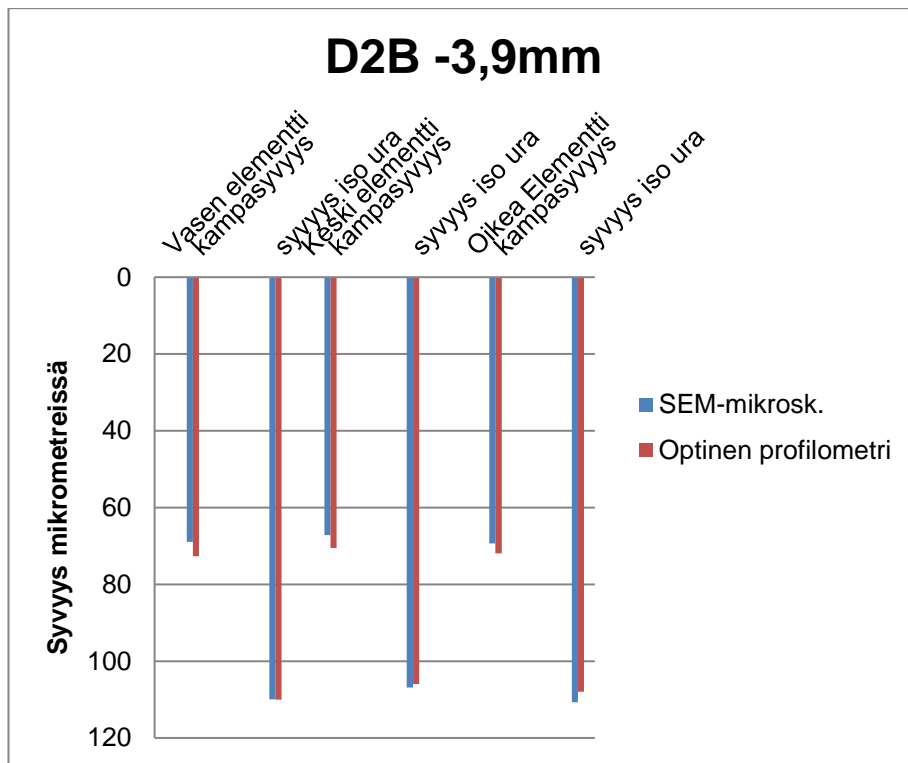


Kuva 2. DRIE\_02A-kammion mittausmenetelmien vertailu

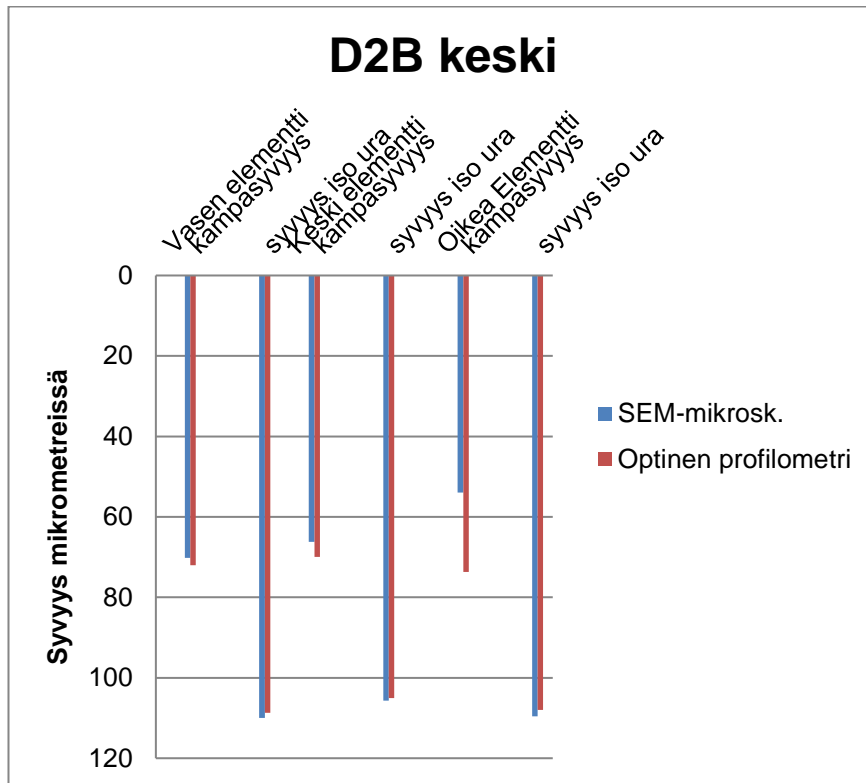


Kuva 3. DRIE\_02A-kammion mittausmenetelmien vertailu

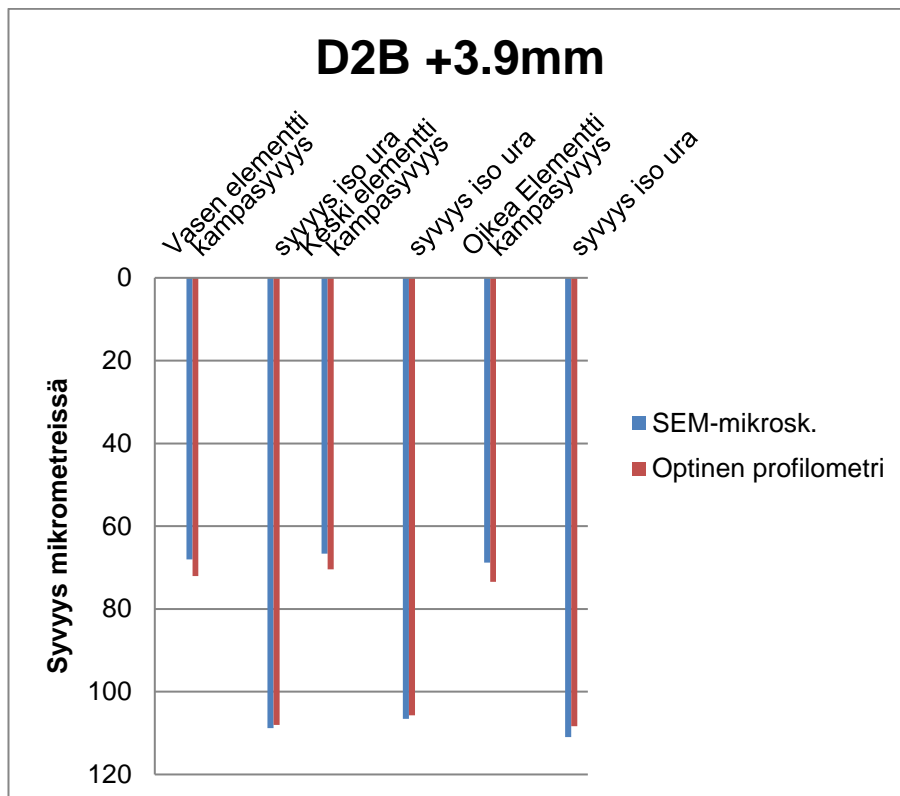
## DRIE\_02B-kiekot



Kuva 4. DRIE\_02B-kammion mittausmenetelmien vertailu

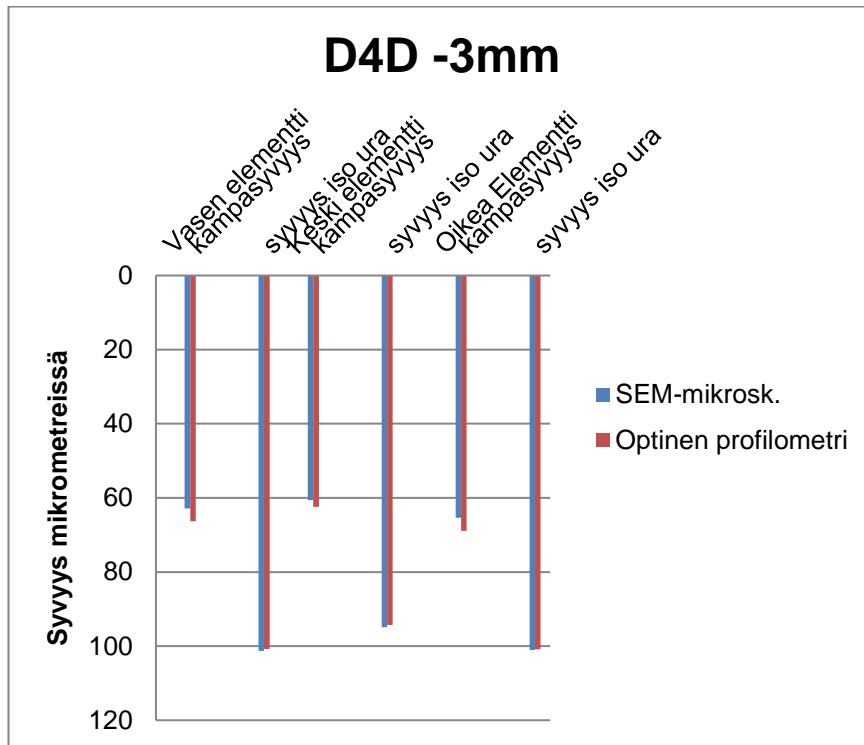


Kuva 5. DRIE\_02B-kammion mittausmenetelmien vertailu

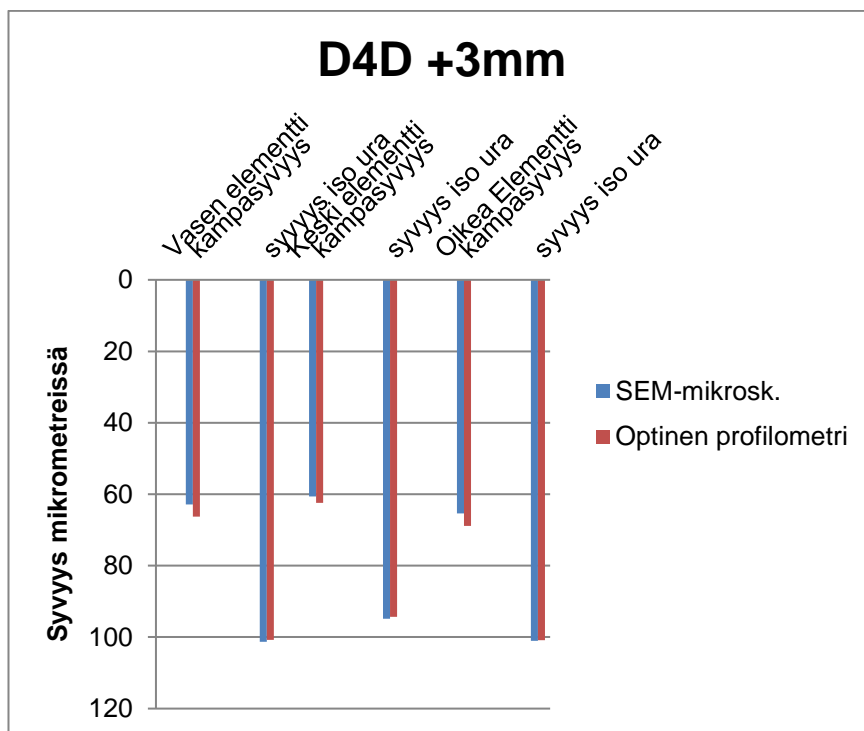


Kuva 6. DRIE\_02B-kammion mittausmenetelmien vertailu

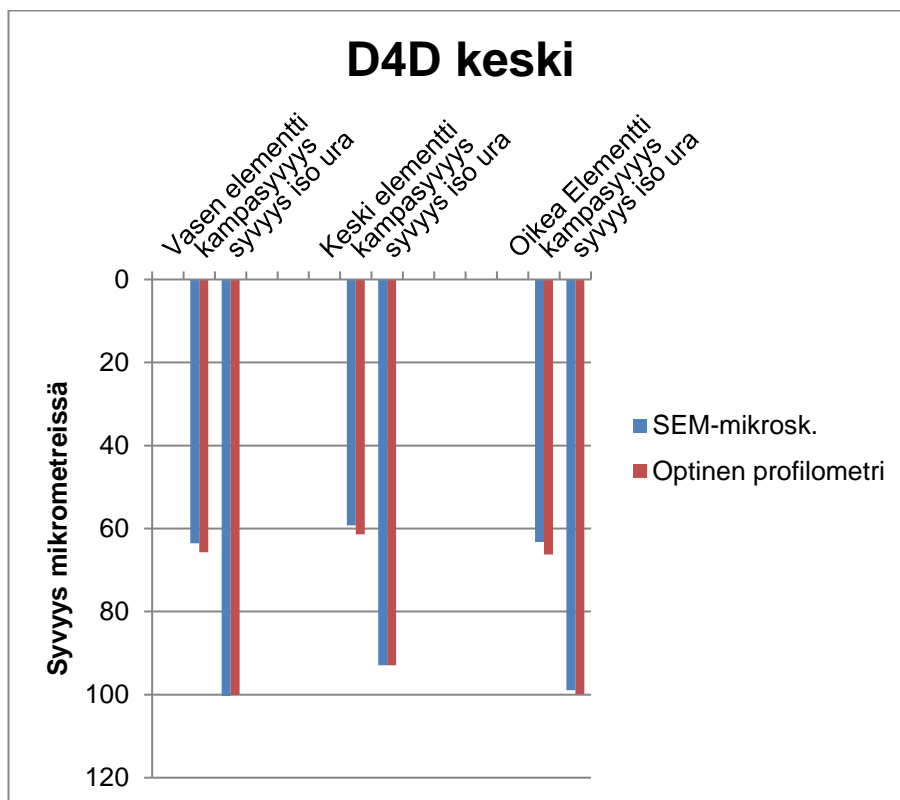
## DRIE\_04D-kiekot



Kuva 7. DRIE\_04D-kammion mittausmenetelmien vertailu

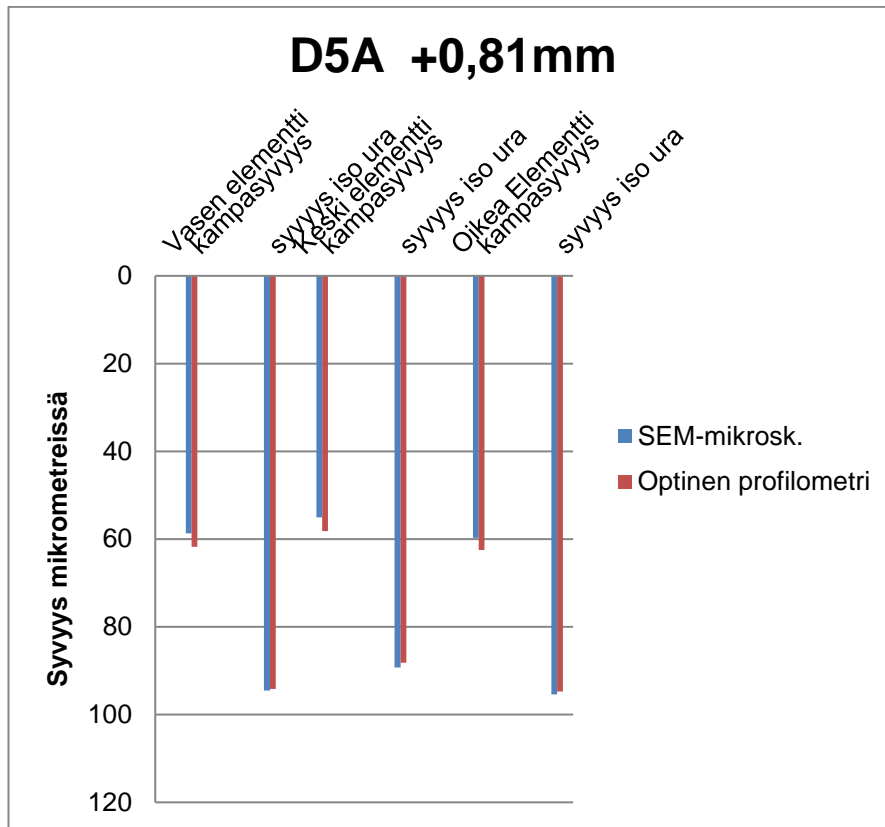


Kuva 8. DRIE\_04D-kammion mittausmenetelmien vertailu

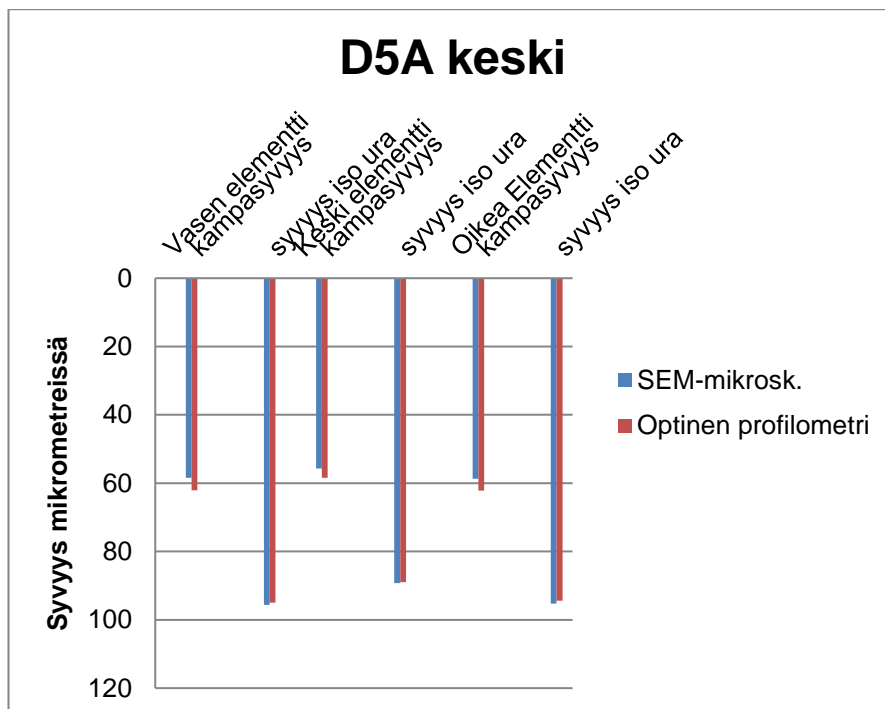


Kuva 9. DRIE\_04D-kammion mittausmenetelmien vertailu

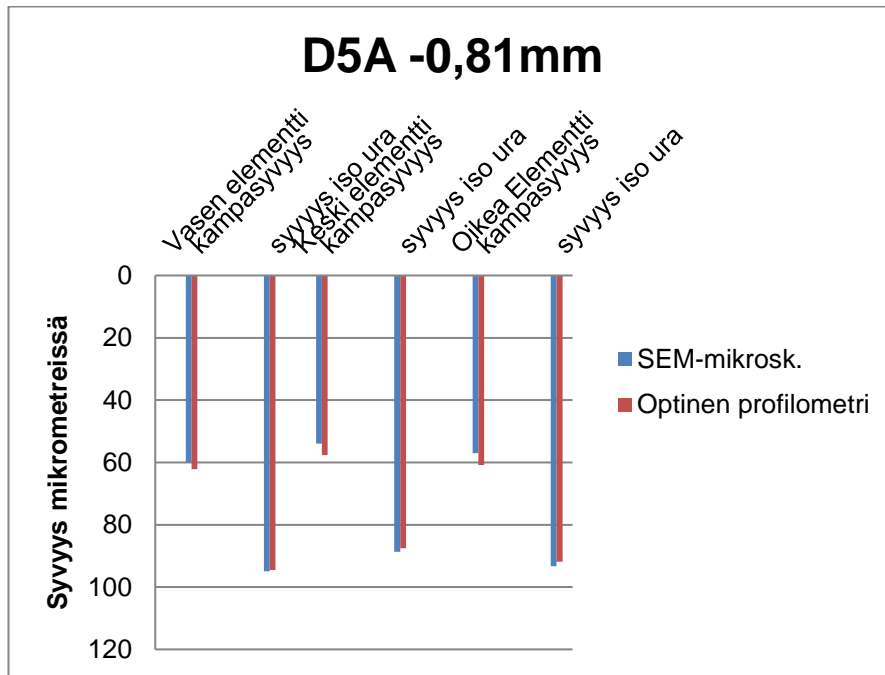
## DRIE\_05A-kiekot



Kuva 10. DRIE\_05A-kammion mittausmenetelmien vertailu



Kuva 11. DRIE\_05A-kammion mittausmenetelmien vertailu



Kuva 12. DRIE\_05A-kammion mittausmenetelmien vertailu