LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan osasto
BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

KUOPPAKULUMISEN MITTAAMINEN

Lappeenrannassa 11.4.2008
0242401 Paavo Lachouk

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 1

1.1 Työn tausta ja rajaus 1

1.2 Työn rakenne 2

2 LASTUAMINEN 3

2.1 Lastuamisgeometria 3

2.2 Lastuamisarvot 5

3 LASTUAVAN TYÖKALUN KESTOAIKA 8

3.1 Kuoppakuluminen 12

3.1.1 Diffuusio 14

3.1.2 Abrasiivinen kuluminen 14

3.1.3 Adhesiivinen kuluminen 15

3.3 Lastuavan työkalun murtuminen 15

3.3.1 Terärikkojen syyt 16

3.3.2 Terän rikkoutumistavat 17

4 KUOPPAKULUMISEN MITTAUS 19

4.1 Vaihesiirtomenetelmä 20

4.1.1 Vaihesiirtomenetelmän periaate 21

4.2 Automaattisen fokusoinnin menetelmä 24

4.2.1 Reunaviivojen ja terävyyden tunnistaminen 25

4.3 Stereonäkö 26

4.4 Interferometri 27

5 KAUPALLISET MITTALAITTEET 30

5.1 MicroCAD 30

5.2 Leica 33

5.3 Ranger 34

6 ANALYSOINTI 36

7 JOHTOPÄÄTÖKSET 37

LÄHDELUETTELO 39

LIITE I. VAIHESIIRTOMENETELMÄN MATEMAATTISEN YHTÄLÖN JA MITATTAVAN KAPPALEEN MUOTOJEN YHDISTÄMINEN

LIITE II. MICROCAD MITTALAITTEISTON ERI VERSIOIDEN TEKNISET TIEDOT

LYHENTEET JA SYMBOLIT

3D	Three-dimensional, kolmiulotteinen
a_p	Lastuamissyvyys [mm]
CCD	Charge coupled device, varauskytketty laite
f_n	Syöttö [mm/r]
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardointijärjestö
κ_r	Asetuskulma [°]
n	Karanopeus [r/min]
LCD	Liquid crystal display, nestekidenäyttö
LWDM	Long Working Distance Microscope, pitkän etäisyyden mikroskooppi
KT	Kuopan syvyys kuoppakulumisessa [mm]
v_c	Lastuamisnopeus [m/s] tai [m/min]
v_f	Syöttönopeus [mm/min]

1 JOHDANTO

Lastuavan terän hinta on vain murto-osa työkappaleen koneistuksen kokonaiskustannuksista. Suurin osa valmistuskustannuksista muodostuu raaka-ainekustannuksista, yleiskustannuksista, työntekijän palkasta sekä konekustannuksista. Edullisimpiin tuotantokustannuksiin päästään valitsemalla optimaaliset lastuamisarvot. Tämä tarkoittaa lastuamisarvoja, joilla valmistettavan tuotteen läpimenoaika on lyhyimmillään ja joilla saavutetaan vaadittu pinnankarheus ja tarkkuus.

Optimaaliset lastuamisarvot tarkoittavat yleensä korkeita lastuamisarvoja ja korkeilla lastuamisarvoilla lastuttaessa leikkuuterä joutuu koville ja kuluu nopeasti. Kun voimakkaasti kuluneella terällä jatketaan työstämistä, terä saattaa lopulta murtua. Murtumisen johdosta lastuava terä saattaa vaurioitua niin, ettei sillä enää voida aikaansaada pintaa, joka täyttäisi työstettävälle kappaleelle asetettuja pinnanlaatuvaatimuksia. Jotta terästä voitaisiin ottaa kaikki taloudellinen hyöty irti, on ymmärrettävä työkalun kulumismekanismit. Näistä tärkein terärikon kannalta on kuoppakuluminen.

Lastuavan työkalun viistekulumista on tutkittu paljon, ja sen mittaaminen on suhteellisen yksinkertaista. Vastaavasti kuoppakulumista on tutkittu vähemmän, ja sen mittaaminen on haastavaa. Haastavinta siinä on syvyyden tarkka mittaaminen sekä kuluneen kuopan muotojen mallintaminen. Tässä työssä perehdytään tarkemmin kuoppakulumisen mittaukseen.

1.1 Työn tausta ja rajaus

Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston Konepajatekniikan laboratoriossa on kaksi työkalujen mittausjärjestelmää. NC-sorvin yhteydessä on kamerajärjestelmä, jolla mitataan sorvin lastuavan työkalun viistekulumista. Koneistuskeskuksen työkalujen, kuten esimerkiksi porien, kulumisen mittaukseen käytetään työkalujen

esiasetuslaitetta ja siihen yhdistettyä mikroskooppia. Kummallakaan mittalaitteella ei tällä hetkellä pystytä mittaamaan kuoppakulumista.

Tämä kandidaatintyö on tehty Lappeenrannan Teknilliselle Yliopistolle. Kandidaatintyössä selvitetään lastuavan työkalun kuoppakulumisen mittaukseen soveltuvat mittausmenetelmät ja markkinoilla olevat mittalaitteet. Tämän työn käytännön sovelluskohteena on löytää Lappeenrannan Teknilliselle Yliopistolle sopiva mittalaitteisto porien ja sorvin teräpalojen kuoppakulumisen mittaukseen. Mittalaitteistolla on pystyttävä tutkimaan myös muita kulumismuotoja. Mittausjärjestelmän on oltava sellainen, että työkalun kulumisen mittaus onnistuu sekä NC-sorvissa, työkalujen ollessa kiinni revolverissa että koneen ulkopuolella kaikista lastuavista teristä. Koska mittalaitteistolle on asetettu näin suuret vaatimukset automaation, nopeuden ja tarkkuuden suhteen, aikaa vievät menetelmät, kuten mekaaniset menetelmät, on jätetty vähemmälle. Työssä esitetyt mittausmenetelmät perustuvat pääosin kameratekniikkaan, joissa kameroiden ottamia kuvia pystytään tulkitsemaan ohjelmiston avulla.

1.2 Työn rakenne

Työn teoriaosan alussa perehdytään lyhyesti lastuamiseen. Lastuamiseen kuuluu useita käsitteitä, joista lastuamisgeometriaan ja lastuamisarvoihin perehdytään tarkemmin. Kolmannessa luvussa perehdytään lastuavan työkalun kestoaikaan sekä pyritään selventämään, mitkä seikat vaikuttavat työkalun kestoikään. Luvun alkupuoli painottuu terän kulumismuotoihin, joista tarkimmin käydään läpi kuoppakuluminen. Kolmannen luvun loppupuolella perehdytään lastuavan terän murtumiseen, sillä kuoppakulumisella on siinä suuri rooli. Neljännessä luvussa tutustutaan kuoppakulumisen mittauksessa käytettyihin ja tutkittuihin mittaustapoihin ja mittausmenetelmiin. Viidennessä luvussa käydään läpi joitakin markkinoilla olevia valmiita mittalaitteita sekä esitellään komponenteista räätälöity mittalaitteisto. Johtopäätökset luvussa tarkastellaan edellä esiteltyjen mittalaitteiden soveltuvuutta Lappeenrannan Teknisen Yliopiston konepajatekniikan laboratorion tutkimuksiin.

2 LASTUAMINEN

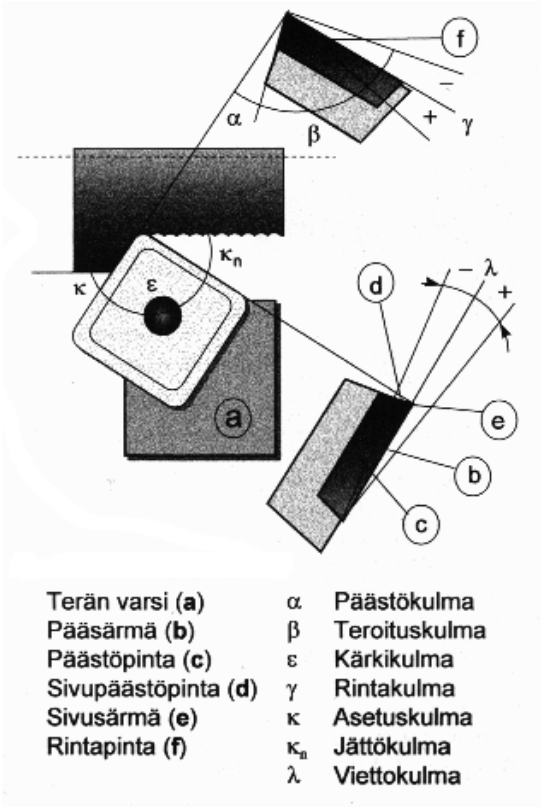
Koska lähes jokaisessa mekaanisessa laitteessa on koneistettuja osia, lastuaminen on tärkeä työstömenetelmä. Lastuamisessa työkalu, jonka kovuus on huomattavasti suurempi kuin lastuttavan työkappaleen materiaalin, tunkeutuu työkappaleeseen ja irrottaa siitä ainetta. (Aaltonen 2000, s. 140.) Erilaisia lastuamismenetelmiä ovat sorvaaminen, jyrsiminen, poraaminen, avartaminen, höyläämineni, aventaminen, sahaaminen, hiominen, hiertäminen, hoonaaminen ja hiveltäminen. (Andersson 1997a, s. 3; Aaltonen et al. 2000, s. 139-217.)

Sorvauksessa työstettävä kappale kiinnitetään istukkaan, joka saatetaan pyörivään liikkeeseen. Sorvin teräkelkkaan kiinnitetty terä suorittaa asetus- ja työstöliikkeet. (Maaranen 2007, s. 96.) Jyrsinnässä on pyörivä, tavallisesti monihampainen työkalu, joka irrottaa lastuja työkappaleesta. Työkappale kiinnitetään työstökoneen pöytään, joka suorittaa syöttöliikkeen. (Maaranen 2007, s. 173.) Poraamisessa työkaluna käytetään poraa, joka pyöriessään ja työkappaleeseen syötettynä työstää pyöreän, lieriömäisen reiän (Maaranen 2007, s. 43).

Lastuamiseen liittyy useita käsitteitä jotka ovat läsnä lastuamisprosessissa, sen valinnassa ja ohjauksessa. Nämä käsitteet ovat lastuamisgeometria, lastuamisarvot, lastuttavuus, teräaineet, terän kuluminen ja -vauriot, lastuamisnesteet, lastun muoto ja murtaminen. (Andersson 1997a, s. 5-173.)

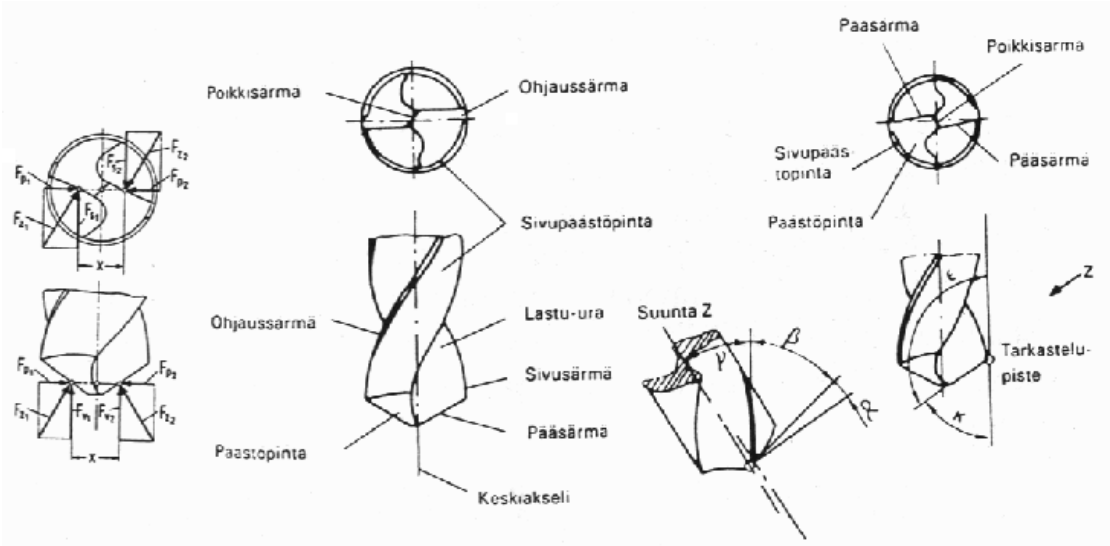
2.1 Lastuamisgeometria

Lastuamisgeometrialla tarkoitetaan lastuavan terän kulmia ja niiden keskinäisiä suhteita. Jokaisella lastuamismenetelmällä on omanlainen lastuamisgeometria. Kuvassa 1 on esitetty lastuamisgeometria sorvattaessa. Lastuamisgeometrialla on suuri vaikutus lastuamisvoimiin, työkalun lämpötilaan, lastunmuodostukseen ja -murtumiseen. (Andersson 1997a, s. 5.)



Kuva 1. Lastuamisgeometria sorvattaessa (Andersson 1997a, s. 5).

Terän rintapinnan geometria edesauttaa lastun murtumista. Kukin terän rintapinnan geometria on kehitetty tiettyä käyttöaluetta varteen, jolle on määritetty tietty syöttö- ja lastuamissyvyyssuositus. Sorvausterän nirkonsäde on monissa sorvausvaiheissa avainasemassa, sillä se vaikuttaa niin särmänlujuuteen kuin työkappaleen pinnanlaatuun. (Sandvikin 2005, s. A10–11.) Porauksessa tärkeät terägeometrian osat ovat esimerkiksi teräsärmien kulmat, lastu-ura ja lastuamisnesteen syöttökanava. (Sandvikin 2005, s. E6). Kuvassa 2 on esitetty kierukkaporan geometria.

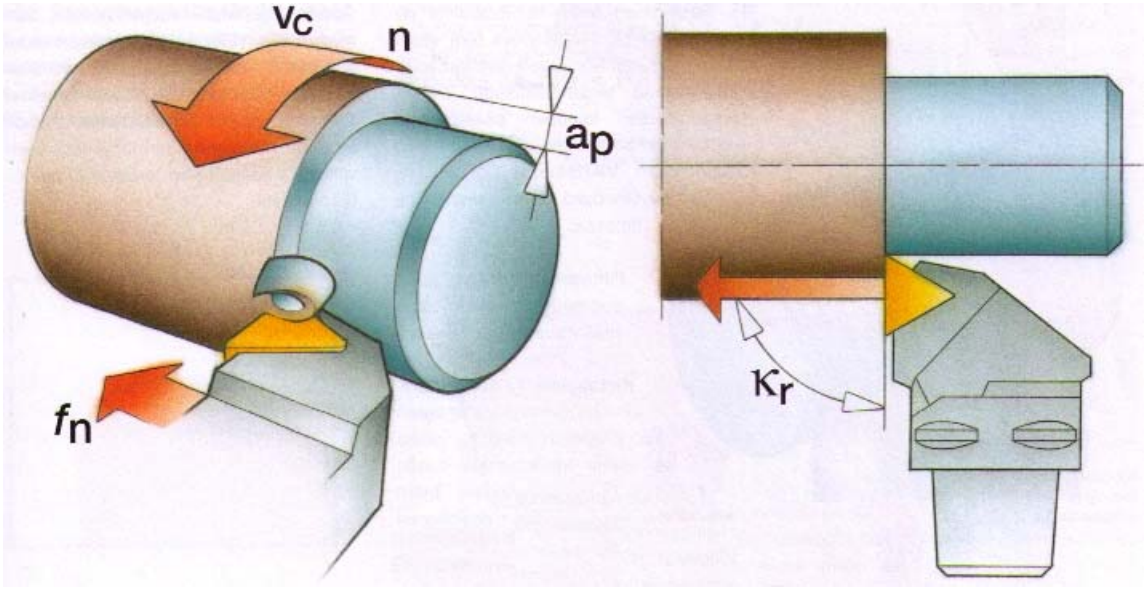


Kuva 2. Poran geometria (Andersson 1997a, s. 215).

2.2 Lastuamisarvot

Lastuamisarvot ovat parametreja, jotka määrittävät työkalun ja työkappaleen keskinäiset liikkeet. Terävalmistajilla on tarjolla erilaisia taulukoita ja ohjelmia, joilla voidaan valita optimaalisia lastuamisarvoja eri terille ja materiaaleille. Kuvassa 3 on esitetty sorvauksen lastuamisarvot, jotka ovat

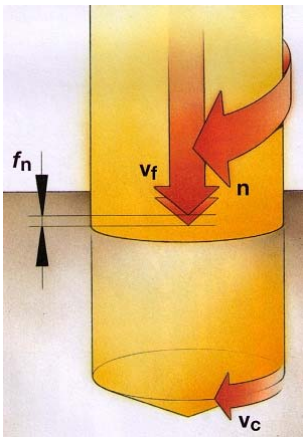
- karanopeus (n) [r/min]
- lastuamisnopeus (v_c) [m/min]
- syöttö (f_n) [mm/r]
- lastuamissyvyys (a_p) [mm]
- asetuskulma (κ_r) [°]. (Sandvikin 2005, s. A9.)



Kuva 3. Sorvauksen lastuamisarvot (Sandvik 2005, s. A9).

Kuvassa 4 on esitetty porauksen lastuamisarvot, jotka Sandvikin (2005, s. E4) mukaan ovat

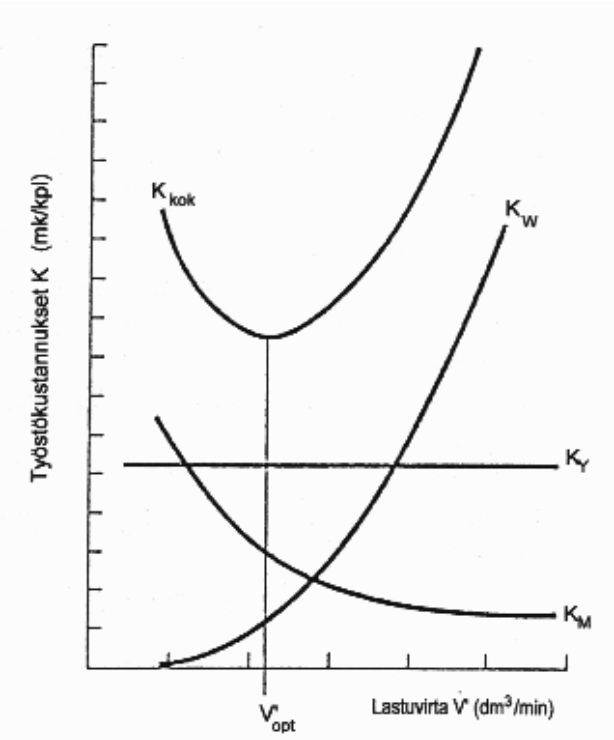
- karanopeus (n) [r/min]
- lastuamisnopeus (v_c) [m/min]
- syöttönopeus (v_f) [mm/min]
- kierroskohtainen syöttö (f_n) [mm/r].



Kuva 4. Porauksen lastuamisarvot (Sandvik 2005, s. E4).

Lastuamisarvoilla on suuri vaikutus tuottavuuteen. Valitsemalla lastuamisnopeus ja syöttö suuriksi saadaan työstettävän kappaleen läpäisyaikaa lyhennettyä. Toisaalta lastuamisnopeuden ja syötön lisääminen lisää myös terän kulumista. Tällöin työkaluja joudutaan vaihtamaan useammin. Työkalun vaihtamiseen kuluva

aika, työkalun hinta sekä työstökoneen ja työkalun ominaisuudet määräävät sen, kuinka suuret työstöarvot voidaan valita. Käytännössä tämä tarkoittaa kaikkien kustannustekijöiden optimointia niin, että päästään mahdollisemman pieniin kokonaiskustannuksiin. Kuvassa 5 on esitetty työstökustannukset lastuamisnopeuden funktiona. (Sandvik 2007, s. 2; Andersson 1997a, s. 162–166.)



Kuva 5. Lastuamiskustannukset lastuamisnopeuden funktiona (Andersson 1997a, s. 166). K_{kok} =kokonaiskustannukset, K_w =teräkustannukset, K_m =kone- ja palkka-kustannukset, K_y =yleiskustannukset

3 LASTUAVAN TYÖKALUN KESTOAIKA

Lastuavassa työstössä työstövoimat ovat suuria, jolloin terä joutuu alttiiksi suurille mekaanisille rasituksille. Teriin kohdistuva voima ei ole pelkästään staattinen. Työstettävän kappaleen pinnan epätasaisuus, terän liike työstettävään kappaleeseen nähden sekä värähtely aiheuttavat dynaamista eli hakkaavaa kuormitusta. Terään kohdistuvat voimat yhdessä terän lämpötilan muutoksien aiheuttamien lämpöjännitysten kanssa aiheuttavat sen, että terästä irtoaa jatkuvasti ainehiukkasia. (Aaltonen 2000, s. 141.) Lastuavan terän käyttöikään vaikuttavat seikat ovat

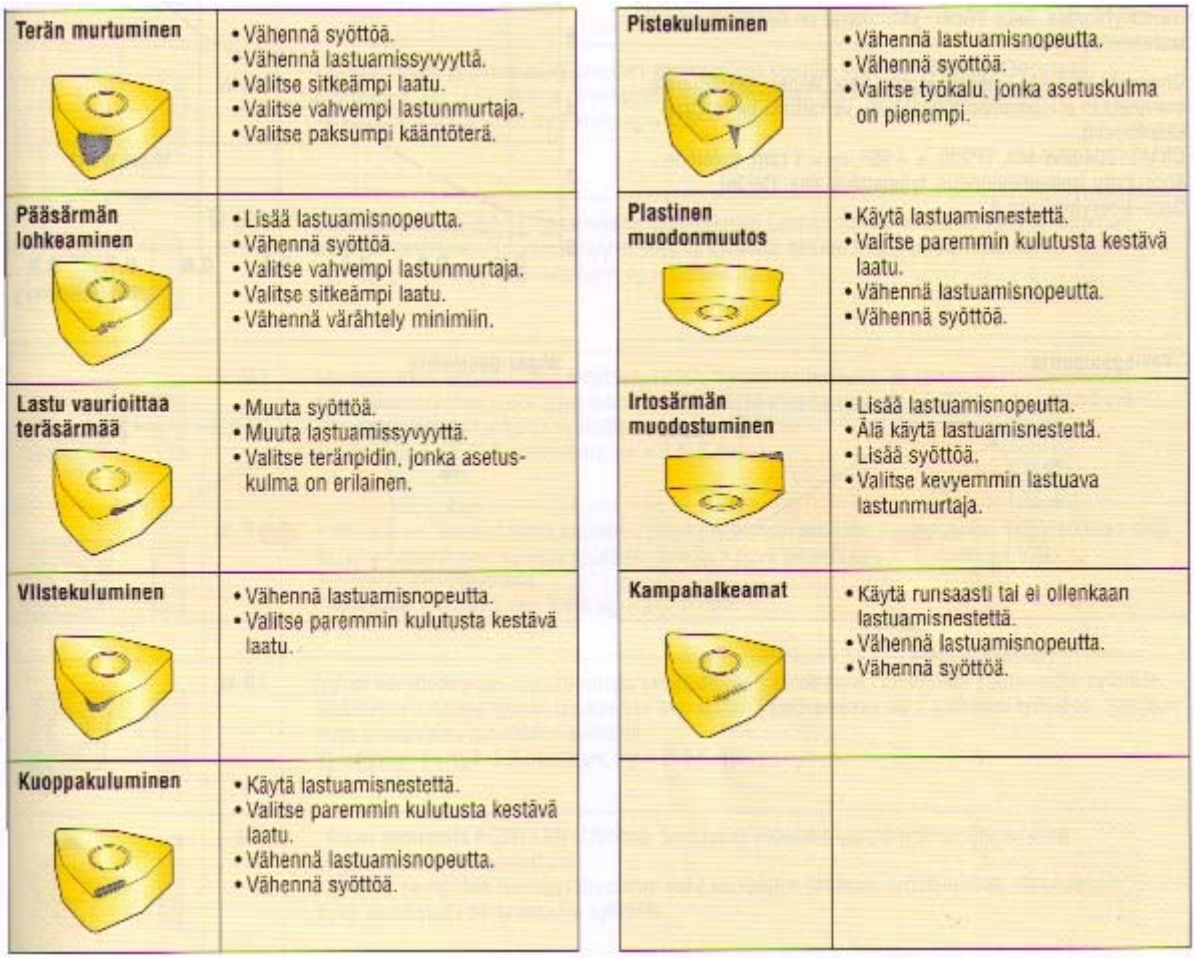
- työstettävä raaka aine
- terämateriaali
- terämateriaalin laatu
- terän geometria
- työstöarvot
- työstötapa (rouhintasorvaus, viimeistelysorvaus jne.)
- työkappaleen muoto
- terän ja työkappaleen värähtely
- sorvin kunto
- sorvaajan ammattitaito (Maaranen 2007, s. 105).

Lastuavan työkalun kulumismekanismeja ja kulumisen aiheuttajia ovat

- abrasiivinen kuluminen eli hankauskuluminen
- adhesiivinen kuluminen eli puristushitsautuminen
- diffuusio
- hapettuminen
- terän pehmeneminen
- vaihtelevat lämpöjännitykset
- mekaaniset jännitykset
- sähkömotoriset voimat (Aaltonen 2000, s. 141–142).

Käytännössä lastuamishetkellä kulumista tapahtuu useammalla kuin yhdellä mekanismilla (Salonen 1997, s. 105).

Terän kulumisen ja tylsymisen myötä lastuamisvoimat sekä lastuavalta työkoneelta vaadittava tehontarve kasvavat. Lisäksi mittatarkkuus ja pinnanlaatu huononevat. (Aaltonen 2000, s. 141.) Tämä tulee ottaa huomioon etenkin viimeistelyssä, sillä silloin on tarkoitus päästä vaadittuun pinnanlaatuun ja mittatarkkuuteen. Kuvassa 6 on esitetty lastuavan terän yleisimmät kulumismuodot, terävauriot sekä ohjeet niiden välttämiseksi.



Kuva 6. Lastuavien työkalujen valmistajan ohje työkalun kestoiän pidentämiseen (Seco 2005, s. 41).

Taloudellista kestoaikaa arvioitaessa voidaan käyttää helposti mitattavia viiste- ja kuoppakulumisen raja-arvoja. (Aaltonen 2000, s. 141). Yksikärkisen sorvin teräpalan kulumiskoe sekä raja-arvot ovat esitetty standardissa ISO 3685. Standardin mukaan kovametallisille teräpaloille, joiden testiolosuhteet on määritelty taulukossa 1.

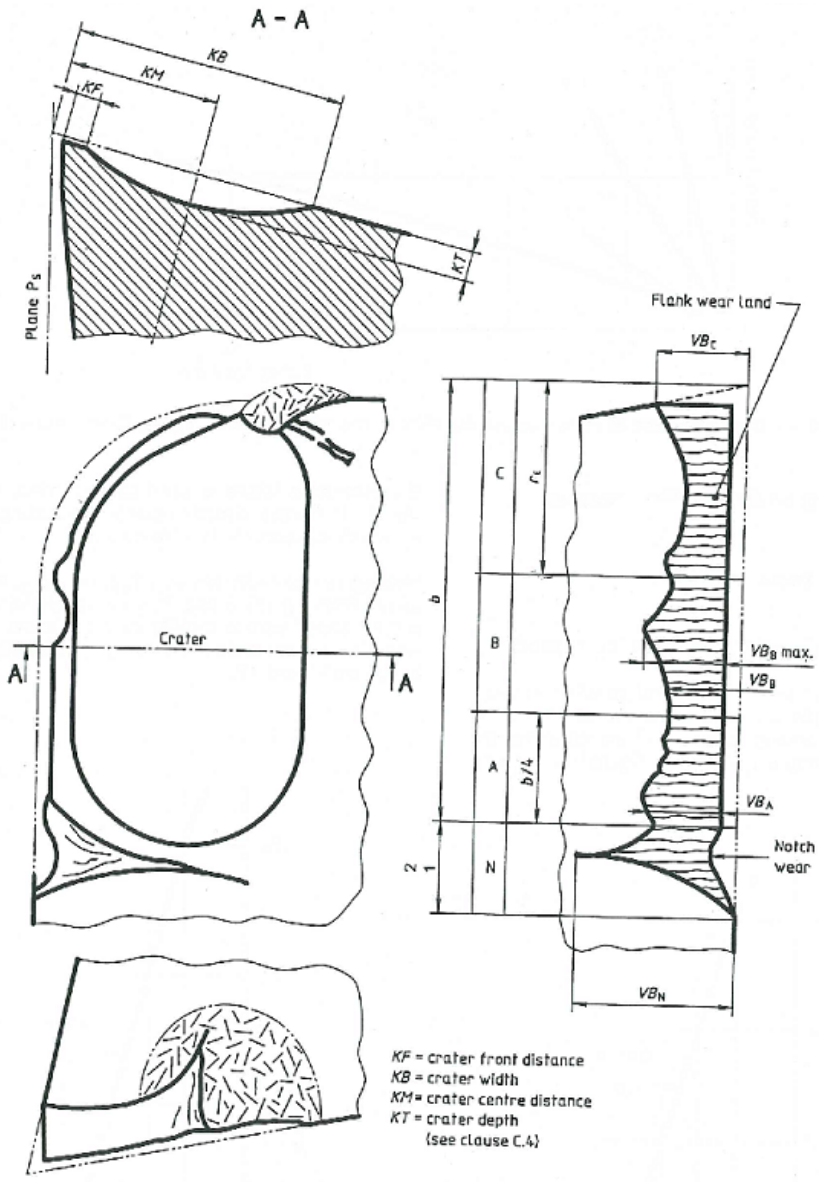
Taulukko 1. Standardin ISO 3685 mukaiset lastuamisparametrit, kun tehdään kulumiskokeita (ISO 3685). Suomennos: Cutting condition = lastuamisolosuhteet, Feed = syöttö, Depth of cut = lastuamissyvyys ja Corner radius = nirkonsäde.

Cutting condition	**A**	**B**	**C**	**D**
Feed, f, mm/rev	0,1	0,25	0,4	0,63
Depth of cut, a_p, mm	1	2,5	2,5	2,5
Corner radius, r_ε, mm	0,4	0,8	0,8	1,2

Taloudellista kestoaikaa arvioitaessa kulumiskriteerit ovat

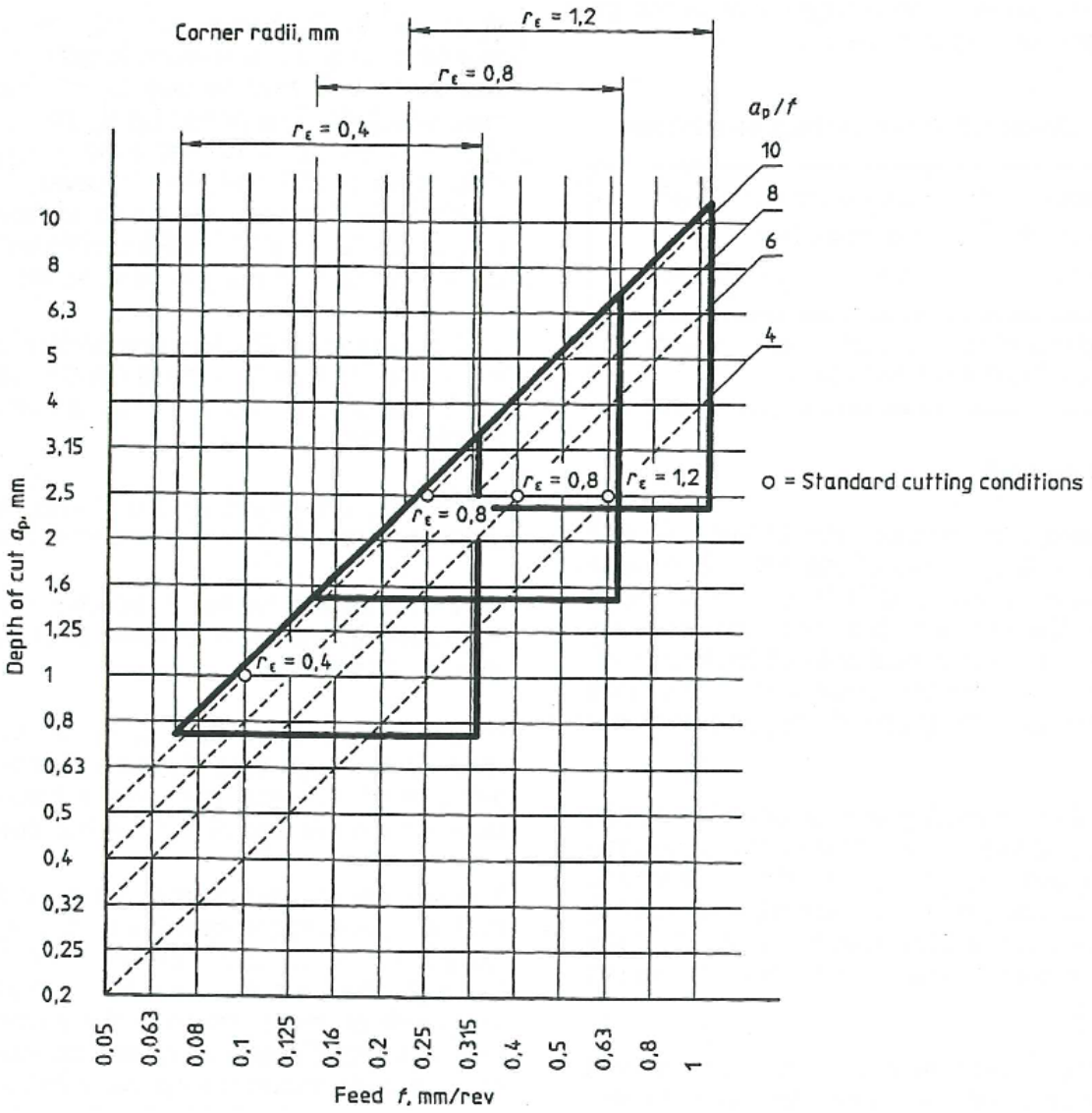
- maksimi viistekuluminen $VB_B \max = 0{,}6$ mm, jos viistekuluminen ei ole tasaista
- Keskimääräinen viistekuluminen $VB_B = 0{,}3$ mm, jos viistekuluminen on tasaista
- kulumiskuopan syvyys $KT = 0{,}06 + 0{,}3f$, jossa f on syöttö
- Kulumiskuopan etureunan lyhin etäisyys lastuavasta särmästä $KF = 0{,}02$ mm
- Kuoppa yhtyy sivusärmään.

Kuvassa 7 on esitetty, kuinka viistekulumista ja kuoppakulumista mitataan (ISO 3685, s. 11).



Kuva 7. Esimerkki kuoppakulumisesta ja viistekulumisesta (ISO 3685 s. 12).

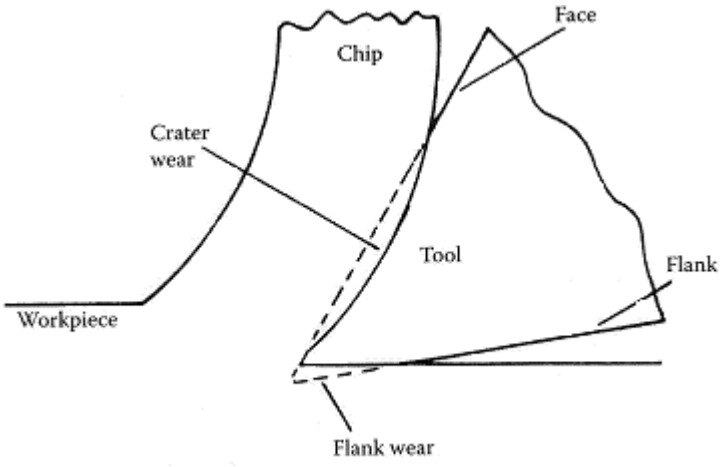
Mikäli lastuamiskoe joudutaan suorittamaan lastuamisparametrilla, joka poikkeaa edellisessä taulukossa esitetyistä arvoista, lastuamisparametrin valinta suoritetaan kuvan 8 kuvaajan avulla. (ISO 3685).



Kuva 8. Lastuamisolosuhteiden rajat (ISO 3685). Suomennokset: Feed = syöttö, Depth of cut = lastuamissyvyys, Corner radii = nirkonsäde, Standard cutting conditions = standardinmukaiset lastuamisolosuhteet.

3.1 Kuoppakuluminen

Kuoppakulumisessa lastun mekaaninen hankaus kuluttaa työkalun rintapintaan kuopan. Kyseinen tapahtuma on esitettynä kuvassa 8. Kulumiskuopan syvyys ja leveys etenevät suhteellisen lineaarisesti lastuamisajan funktiona. (Andersson 1997a, s.84; Maaranen 2007, s. 108.)

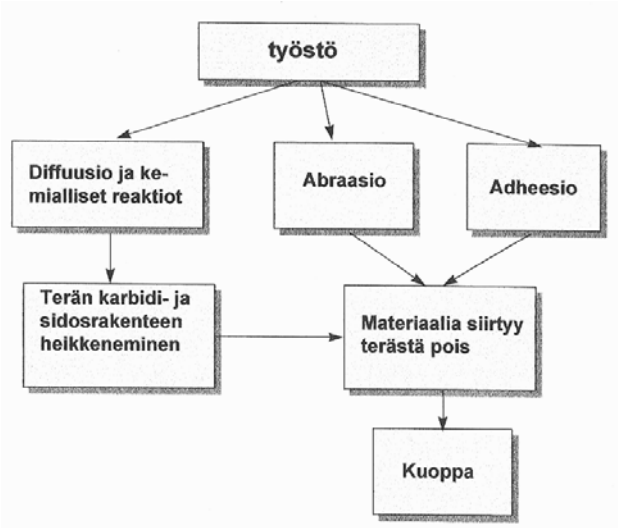


Kuva 9. Metallin lastuamisessa syntyvien terän kulumien sijainnit (Boothroyd & Knight 2006, s. 142). Suomennokset: Crater wear = kuoppakuluminen, Flank wear = viistekuluminen, Workpiece = työkappale, Chip = lastu, Tool = työkalu, Flank = päästöpinta ja Face = rintapinta.

Kuppakuluminen määrittelee usein työkalun kestoajan, kun työkappaletta lastutaan erittäin suurilla nopeuksilla. Tällöin työkalun rintapinnan lämpötila voi helposti kohota yli 1000 °C:een. Kuumenemisen myötä työkalun rintapinta pehmenee ja näin olleen on alttiina kuoppakulumiselle. Vaikka kovametalliset työkalut säilyttävät kovuutensa korkeissakin lämpötiloissa, kulumiskuoppa voi silti syntyä diffuusion johdosta. (Boothroyd & Knight 2006, s. 143.)

Kulumiskuopan syventyminen aiheuttaa tehollisen rintakulman suurenemisen ja teroituskulman pienenemisen heikentäen teräpalan nirkkoa. Kulumiskuopan vähitellen suurentuessa teräpalan nirkko murtuu. Kuoppakulumisen vaikutus terän murtumiseen on sitä suurempi mitä lähemmäksi leikkaavaa särmää kuoppa muodostuu. (Boothroyd & Knight 2006, s. 143; Ansaharju et al. 1989, s. 168.)

Lastuavien terien kuoppakulumiseen vaikuttavat pääsääntöisesti kaksi mekanismia: diffuusio ja abraasio. Näistä diffuusiolla on todettu olevan suurin merkitys. (Sandvik 1994, s. IV-13.) Anderssonin (1997a, s. 84) mukaan myös adheesio vaikuttaa kuoppakulumiseen. Kuvassa 10 on esitetty Anderssonin (1997a, s. 84) kirjassa esitetty Mullerin näkemys kuoppakulumisen synnystä.



Kuva 10. Kuoppakulumiseen johtavat mekanismit lastuavassa työstössä (Andersson 1997a, s. 84).

3.1.1 Diffuusio

Diffuusiossa työkalumetallin atomeita siirtyy lastuun sen virratessa terän rintapinnan yli. Atomien siirtyminen heikentää terän rakennetta. Terän rakenteen heikkenemisen myötä abrasiivinen ja adhesiivinen kuluminen kiihtyvät. (Andersson 1997a, s. 76–77.)

Diffuusioreaktion käynnistyminen edellyttää korkeaa lämpötilaa, kahden metallin välistä kosketusta sekä terämateriaalin ja työstettävän materiaalin faasien keskinäistä liukoisuutta (Andersson 1997a, s.76). Diffuusioreaktio alkaa suunnilleen 900 °C:ssa, jonka vuoksi se esiintyy pääasiassa vain kovametalleilla. (Andersson 1997a, s. 76–77).

3.1.2 Abrasiivinen kuluminen

Abrasiivinen kuluminen eli mekaaninen hankautuminen on tavallisin kulumismekanismi, joka esiintyy kaikissa lastuamisolosuhteissa. Abrasiivinen kuluminen syntyy kun irtoamassa olevan lastun alapinta hankaa työkalun rintapintaa. Tämä ilmenee työkalun rintapinnan kuoppakulumisena. Myös

työkappaleen juuri paljastuneen uuden pinnan ja päästöpinnan välinen suhteellinen liike aiheuttaa abrasiivista kulumista. Tämä ilmenee esimerkiksi työkalun viistekulumisena. (Andersson 1997a, s. 74.)

Työstettävä materiaali ei milloinkaan ole täysin homogeeninen, vaan se sisältää erilaisia sulkeumia tai tiivistymiä, jotka saattavat olla paljon kovempia kuin perusaine. Nämä perusaineen rakennevirheet toimivat kuin hiovat hiukkaset, jotka kuluttavat työkalun rinta- ja päästöpintaa. Tämän vuoksi abrasiivista kulumista tapahtuu, vaikka työkalun materiaali olisi paljon kovempaa kuin työstettävän. (Andersson 1997a, s. 74.)

3.1.3 Adhesiivinen kuluminen

Adhesiivinen kuluminen syntyy kuin rinta- ja päästöpinnan sekä työkappalemateriaalin välille syntyy puristushitsautumia. Hitsautumien leikkautuessa irti, materiaalien välinen raja ei palaudu täysin alkuperäiseen muotoon, vaan pieniä määriä työkalun materiaalia irtoaa lastun mukaan. (Andersson 1997a, s. 75 & Shaw 1986, s. 225.)

Adhesiivisen kulumisen ehtona on työkaluun kohdistuva voimakas kuormitus, joka aikaansaa työkalun ja irtoavan lastun hitsautumisen. Koska lastuamisprosessissa lastun muovautuminen työkalun rintapintaa vasten aiheuttaa suuren pintapaineen (kuormituksen), on adheesio kuoppakulumisen todennäköisin aiheuttaja hitailla lastuamisnopeuksilla. (Andersson 1997a, s. 75.)

3.3 Lastuavan työkalun murtuminen

Terärikot voidaan jakaa esimerkiksi seuraavaan tapaan kahteen pääryhmään, ennustamattomiin ja niihin, joiden todennäköisyys kasvaa lastuamisen edetessä. Ennustamattomat rikot edustavat vain noin 10 prosenttia kaikista terärikoista, mutta seurauksiltaan ne voivat olla tuhoisampia kuin kulumisesta suoranaisesti tai

yhdessä muiden tekijöiden kanssa johtuvat ennustettavissa olevat rikot. (Andersson 1997a, s. 89.)

3.3.1 Terärikkojen syyt

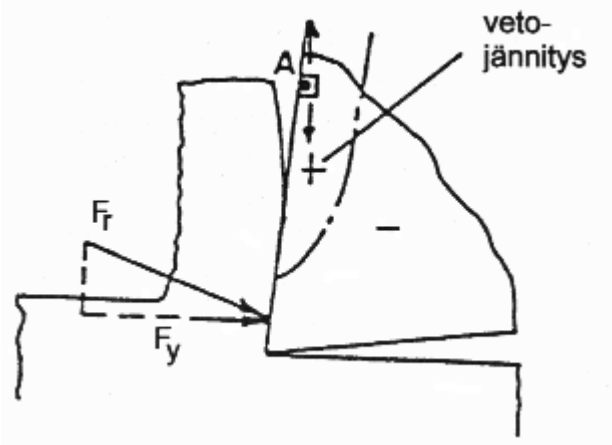
Terärikkojen syntymiseen johtavat syyt ovat selkeät. Kun terämateriaali on korkean lämpötilan vuoksi pehmentynyt siten, että lastuamisvoimien aiheuttama jännitys ylittää materiaalin kimmorajan, terän särmä muotoutuu plastisesti. Terä murtuu kun sen sisäiset jännitykset ylittävät nirkon murtorajan. Tilannetta kiihdyttävät entisestään kulumisviisteen vuoksi kasvaneet lastuamisvoimat ja kulumiskuopan tai -loven takia heikentynyt nirkko. Terä voi myös lohkeilla. Lohkeaminen tapahtuu kun terän dynaamisen kuormituksen vuoksi syntyneiden halkeamien väliin jäävissä lohkoissa jännitys ylittää murtorajan. (Andersson 1997a, s. 89.)

Myös muilla tekijöillä on vaikutusta terän rikkoutumiseen. Näitä sekundaarisia tekijöitä Anderssonin (1997a, s. 90–91.) mukaan ovat

- terä
    - o rakenneviat
    - o virheellinen geometria
    - o virheellinen asento
- työkappale
    - o lastuttavuuden vaihtelu eri toimituserissä
    - o epäedullinen muoto
    - o epähomogeenisuus
    - o mittavirheet
- lastuaminen
    - o sopimaton lastuamisarvojen yhdistelmä
    - o lastuamisprosessin epästabiilisuus (värähtelyt yms.)
    - o lastuamisnesteen virheellinen suuntaus tai käyttämättömyys
- inhimilliset tekijät
    - o virheellisesti kiinnitetty kappale tai terä
    - o esiasetusvirheet

    - o ohjelmointivirheet
    - o väärin asetettu kestoaika
- muut
    - o työstökoneen toimintahäiriöt ja sähkökatkokset.

Lastuamisen aikana terässä vaikuttavia jännitystiloja on tutkittu runsaasti, sillä juuri ne ovat terän rikkoutumisen ratkaisevat tekijät. Terän sisäisiin jännityksiin vaikuttavat lastuamisvoimat, -lämpötila, terän ja työkappaleen lähestymiskulma sekä lastuamisen stabiilius. Kuvassa 12 on esitetty kuvaus terän mekaanisista jännityksistä lastuttaessa tiettynä ajanhetkenä. Epäjatkuvien lastuamismenetelmien kuten jyrsimen terien jännitystiloissa on useita jännitysjakaumaltaan erilaisia vaiheita. (Andersson 1997, s. 91–92.)



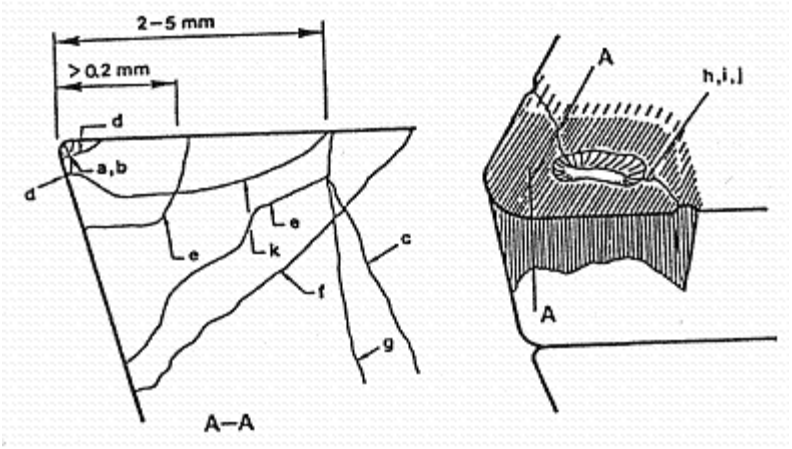
Kuva 12. Lastuavan terän jännitystila tiettynä ajanhetkenä *T* (Andersson 1997a, s. 92).

3.3.2 Terän rikkoutumistavat

Koska lastuavan terän mekaaninen ja terminen kuormitustila erilaisissa lastuamistiloissa on erittäin vaikeaa jäljittää, on mekaanisten simulaatiomallien soveltuvuus käytännön tilanteisiin huono. Kuvassa 13 on esitetty terärikkomorfologiaan perustuvia murtumistyyppejä. Kuvan kirjainselitteet on esitetty alla:

a. Mureneminen irtosärmän muodostumisen yhteydessä.
b. Mureneminen terän poistumisvaiheessa.

c. Suuren mekaanisen kuormituksen aiheuttama totaalirikko.
d. Säröily lastuttaessa kovia materiaaleja pienellä syötöllä.
e. Mekaanisista ja termisistä halkeamista johtuva lohkeilu.
f. Plastisen muodonmuutoksen aiheuttama murtuminen.
g. Puutteellisesta alatuennasta johtuva murtuminen.
h. Päästöpinnan lovikulumisen aiheuttama murtuminen.
i. Kuoppakulumisen aiheuttama murtuminen.
j. Kulumiskuopan yhtyminen sivupäästöpinnan loveen.
k. Epäjatkuvan työstön aiheuttama säröily. (Andersson 1997a, s. 95.)

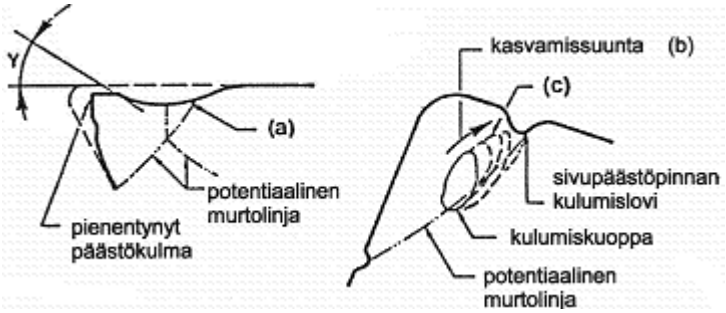


Kuva 13. Terärikkojen murtolinjat (Andersson 1997a, s. 95).

Terän murtumisen aiheuttaa ylikuormitus. Tämä ylikuormitus voi olla joko väsyttävä tai suoranainen murtorajan ylitys. Murtopinta kehittyy kohtisuoraan suurinta pääjännitystä vastaan. Murtuminen on haurasmurtuma, joka alkaa yleensä 1-2 mm nirkosta pääsärmän puolelta. Tällä alueella lämpöjännitys on pieni, mikä auttaa murtuman etenemistä. Koska kosketusvaiheessa terän vetojännitykset ovat suurimmillaan, murtuminen tapahtuu usein juuri silloin. (Andersson 1997a, s. 98.)

Terän murtumiseen liittyy useimmiten kuluneisuus. Etenkin rintapinnan kuoppakuluminen nostaa murtumisriskiä. Kuoppakulumisen johdosta kuormituskestävyys pienenee ja rintakulman muutos aiheuttaa lastuamisvoimien suuruuden ja suunnan muutoksia. Anderssonin (1997a, s. 98) mukaan tavallisimmin terä murtuu kuluneisuuden vuoksi silloin, kuin kuoppakuluminen ja

sivupäästöpinnan lovikuluminen esiintyvät voimakkaina yhtä aikaa. Kuva 14 esittää tilannetta, jossa terä murtuu kulumiskuopan ja sivupäästöpinnan kulumisloven muodostamaa linjaa pitkin.



Kuva 14. Terän kulumisen vaikutus murtumiseen (Andersson 1997a, s. 98).

4 KUOPPAKULUMISEN MITTAUS

Lastuavan työkalun kulumisen mittauksessa kulunutta terää verrataan alkuperäiseen kulumattomaan terään. Kulumisviisteen ja -kuopan leveyden likimääräiseen mittaamiseen voidaan käyttää asteikolla varustettua luuppia. Tarkempaan mittaustulokseen päästään käyttämällä esimerkiksi työkalu- tai yleismittausmikroskooppia. Jos tutkittava terä on pinnoittamaton, voidaan alkuperäisen särmän aseman varmistamiseen käyttää esimerkiksi Vickersin kovuuskokeen painannetta. Kuopan syvyys voidaan mitata statiiviin kiinnitetyn tuhannesosamittakellon, kapasitiivisen tai induktiivisen anturin, tai profiilipiirturin avulla. (Andersson 1997a, s. 141.)

Edellä mainituilla menetelmillä voidaan kulumiskuoppa mitata suhteellisen tarkasti yksinkertaisista työkaluista. Yksinkertaisilla kappaleilla tarkoitetaan esimerkiksi sorvin teräpalaa, jossa on suora, tasomainen rintapinta. Yksinkertaisissa kappaleissa on selvä referenssitaso, johon kuopan pohjaa on helppo verrata. Kun mitattavan kappaleen geometria on monimutkainen eikä selvää referenssitasoa ole, johon verrata, tarkan ja luotettavan mittaustuloksen saaminen näillä menetelmillä on vaikeaa. Tällöin mitattavalle kappaleelle voidaan suorittaa koordinaattimittaus. Koordinaattimittauksella tarkoitetaan mitattavan kappaleen koordinaattien määrittämistä avaruudessa. Erilaisia koordinaattimittausmenetelmiä

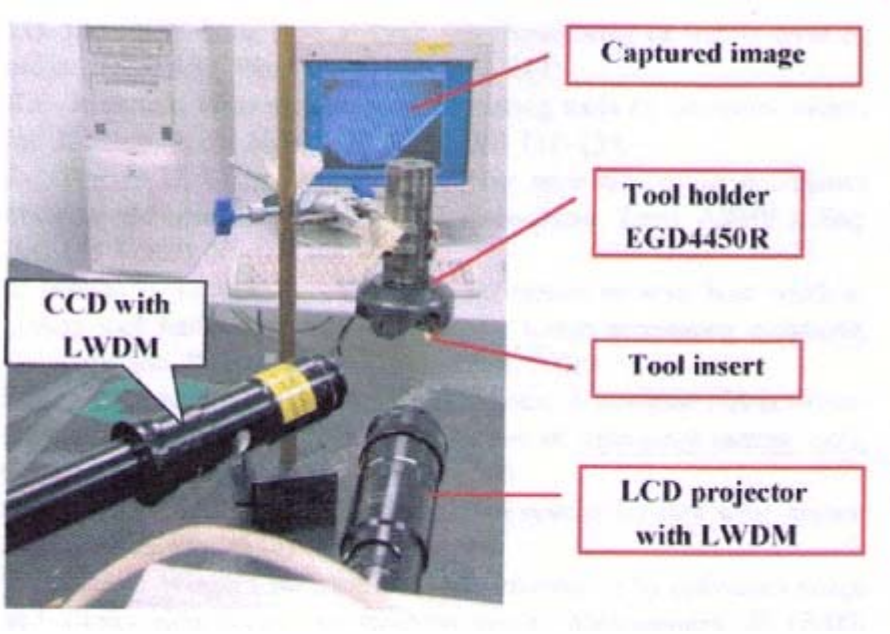
on olemassa kymmeniä ja joidenkin soveltuvuutta kuoppakulumisen mittaukseen on tutkittu. (Tikka 2007, s. 16.)

4.1 Vaihesiirtomenetelmä

Singaporen yliopistossa (The National University of Singapore) on tutkittu vaihesiirtomenetelmän soveltuvuutta kuoppakulumisen kolmiulotteiseen mittaukseen. Tutkimuksessa vaihesiirtomenetelmällä saadut kolmiulotteiset kuvat verrattiin laser skannerin antamaan karttaan. Vaihesiirtomenetelmä osoittautui nopeammaksi ja tarkemmaksi mittausmenetelmäksi kuoppakulumisen mittaukseen kuin laserskannaus. Tutkimuksessa päästiin siihen tulokseen, että vaihesiirtomenetelmän oikeanlaista laitteistoa voitaisiin teollisuudessa soveltaa kuoppakulumisen reaaliaikaisen mittaamiseen. Reaaliaikaisella mittauksella tarkoitetaan tapausta, jossa esimerkiksi sorvin työkalu ajetaan tiettyyn pisteeseen, jossa kamera ottaa kuvan ja muodostaa kuvan tiedoista kolmiulotteisen kuvan. (Wang et al. 2006.)

Vaihesiirtomenetelmä (Phase Shifting method) on tarkka menetelmä kolmiulotteisten (3D) kappaleiden mallintamiseen. Menetelmä ei ole herkkä tausta- tai kontrastivaihteluille eikä epäpuhtauksille. Se ei myöskään vaadi projektorin ja kameran tarkkaa suuntaamista, ja sillä pystyy rakentamaan 3D-mallin työkalusta tarkasti ja automaattisesti. (Wang et al. 2006, s. 164-165.)

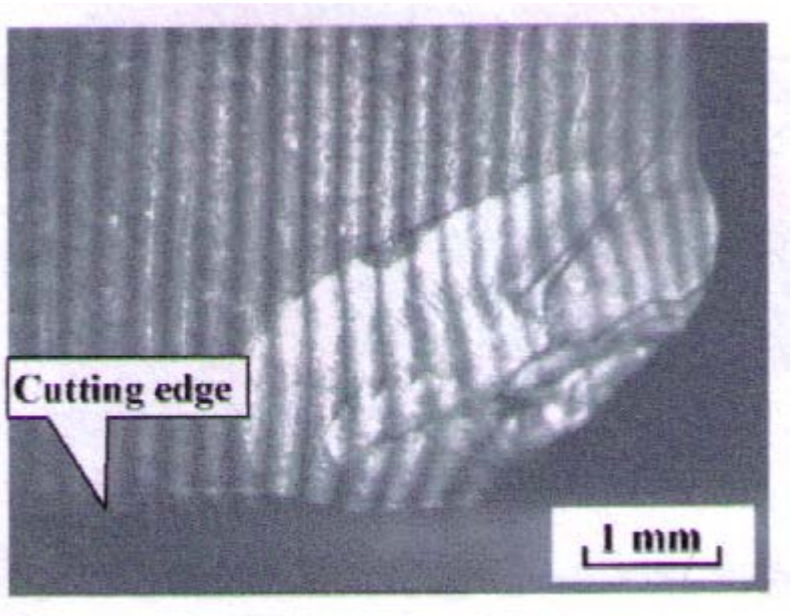
Vaihesiirtomenetelmän laitteisto koostuu LCD-projektorista, johon on kytketty pitkän etäisyyden mikroskooppi (LWDM), LCD-ohjaimesta sekä CCD-kamerasta, johon kytketty toinen LWDM. Lisäksi tarvitaan ohjelma, joka kykenee tulkitsemaan CCD-kameran ottamaa kuvaa ja tekemään siitä 3D-mallin. Kyseinen kokoonpano on esitetty kuvassa 15. (Wang et al. 2006, s. 165-166.)



Kuva 15. Esimerkkikokoonpano vaihesiirtomenetelmän laitteistosta. (Wang et al. 2006, s. 169). Suomennokset: Captured image = otettu/kaapattu valokuva, Tool holder = työkalupidin, Tool insert = teräpala.

4.1.1 Vaihesiirtomenetelmän periaate

Vaihesiirtomenetelmässä LCD-projektorilla heijastetaan tasaisesti viivoitettu kuva kolmiulotteisen mitattavan kohdan päälle. Kun mitattavan kappaleen pinta ei ole referenssitasossa, näkyy se heijastuneen viivan kaareutumisena. Kuvasta 16 nähdään kuinka heijastetut suorat viivat eivät ole kulumiskuopan kohdalla suoria kuten muualla teräpalan pinnalla. Tarkka sijainti viivojen nähden saadaan intensiteettieroista. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi kuva 16 tapauksessa sitä, että kun siirrytään kuvan vasemmasta laidasta oikealle ja tutkitaan intensiteetin muutosta, saadaan sinimuotoinen kuvaaja. Kuvaajan vaihekulmasta voidaan laskea tarkka sijainti. (Wang et al. 2006, s. 166.)

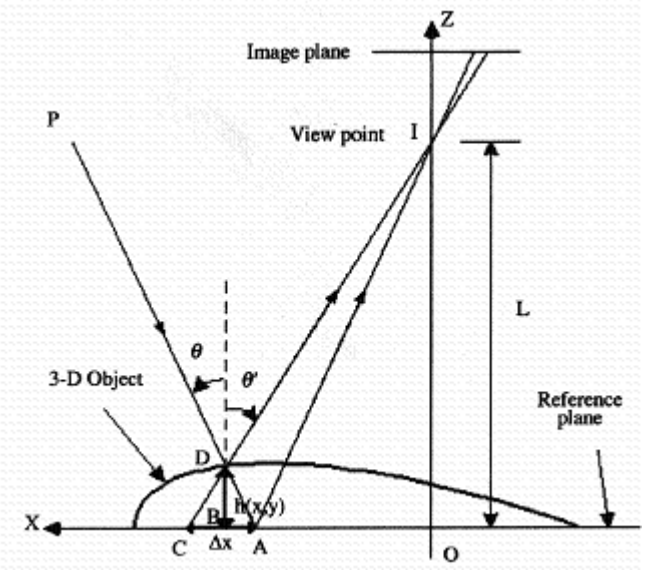


Kuva 16. Kameralla otettu kuva projektorin lähettämästä viivoituksesta teräpalan pinnalle (Wang et al. 2006, s. 166). Suomennos: Cutting edge=lastuava särmä.

Viivojen kaareutumisen syy näkyy kuvassa 17. Jotta mittausmenetelmä olisi helppo ymmärtää, tarkastellaan menetelmää kahden erillisen tapauksen avulla. Molemmissa tapauksissa säde lähetetään pisteestä P, ja tilannetta tarkastellaan pisteestä I. Ensimmäisessä tapauksessa, säteen tielle ei osu mitään ja säde jatkaa matkaa referenssitasolle saakka. Tällöin pisteestä I tarkasteltuna, säde osuu referenssitason pisteeseen A. Toisessa tapauksessa, tilanne on samanlainen kuin edellisessä, mutta nyt säde osuu kohouman pisteeseen D, joka ei ole referenssitason piste. Pisteestä I tarkasteltuna säde osuu referenssitason pisteeseen C. Kun näitä kahta tapausta verrataan toisiinsa, saadaan säteiden eroksi referenssitasossa kaavalla 1

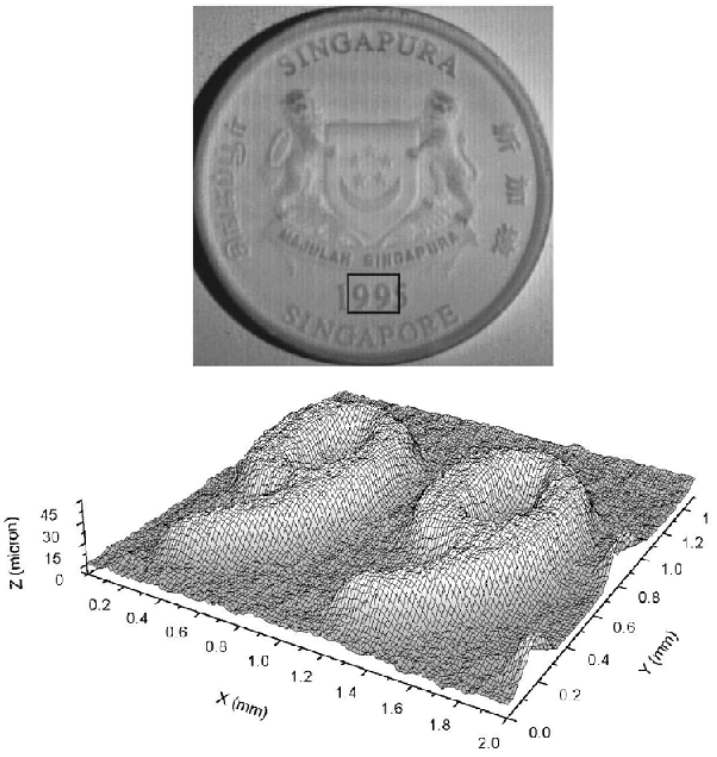
$$\Delta x = \overline{AC}\,. \qquad (1)$$

Kun Δx lisäksi tiedetään tarvittavat kulmat ja etäisyydet, voidaan kohouman korkeuden laskea. (Wang et al. 2006, s. 165.)



Kuva 17. Vaihesiirtomenetelmän toimintaperiaate (Wang et al. 2006, s. 165).

Liitteessä I on esitetty pinnan matemaattinen malli, jolla voidaan ratkaista mitattavan kappaleen pinnan pisteiden korkeus referenssitasoon nähden. Käyttämällä sopivaa ohjelmistoa voidaan pisteiden korkeuksista muodostaa kolmiulotteisen kuvan. Kuvassa 18 on esitetty kolikon numeroluvuista muodostettu pinnan kolmiulotteinen kuva.

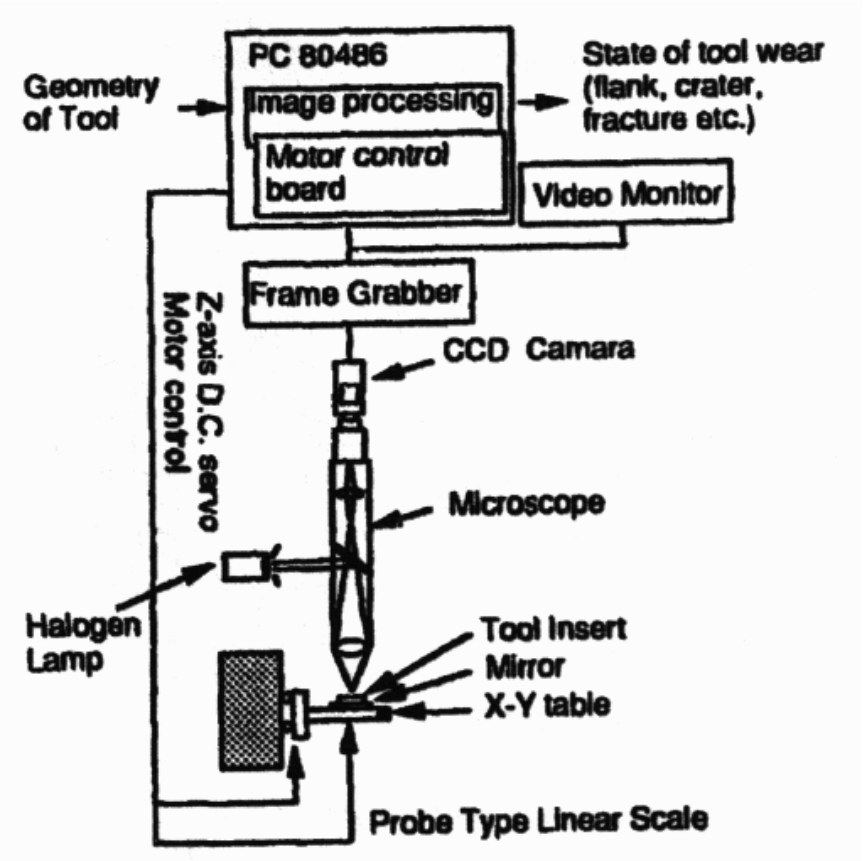


Kuva 18. Kolikon vuosiluvun keskimmäisistä numeroista tehty pinnan kartta (Quan et al. 2001, s. 25).

4.2 Automaattisen fokusoinnin menetelmä

Korean tieteen ja tekniikan instituutissa (Korean Advanced Institute of Science and Technology) on tutkittu konenäön ja automaattisen tarkennuksen soveltuvuutta kuoppakulumisen mittaukseen. Mittalaitteistona oli stereomikroskooppi, jota liikuteltiin servomoottorilla. (Yang et al. 1996, s. 363–365.)

Automaattisen fokusoinnin menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 19. Mitattava työkappale asetetaan X-Y-pöydässä sijaitsevaan työkalupitimeen, johon kamera mikroskooppeineen sekä valoineen on suunnattu. X-Y-pöytää, jonka tarkka sijainti tiedetään, voidaan siirtää Z-akselin suuntaisesti tasavirtamoottorilla. Kun parhaan tarkennuksen kriteerit ovat saavutettu ja sopiva piste on tunnistettu, otetaan kuva. Sopivalla ohjelmistolla otetusta kuvasta voidaan muodostaa pinnan kolmiulotteisen kuvan harmaasävytarkastelun avulla. (Yang et al. 1996, s. 363–365.)



Kuva 19. Automaattisen fokusointimenetelmän laitteisto (Yang et al. 1996, s. 365).

Suomennokset: Microscope = mikroskooppi, Frame Grabber = kuvan sieppaaja, Video monitor = videokuvan näyttö, Motor control board = moottorin ohjauspaneeli, Image processing = kuvankäsittely, Geometry of Tool = työkalun geometria, State of tool wear = tieto työkalun vauriomuodoista, Tool insert = työkalupidin, Halogen lamp = halogeenilamppu, Probe Type Linear Scale = luotain tyyppinen lineaarinen skaalain.

4.2.1 Reunaviivojen ja terävyyden tunnistaminen

Reunaviivan tai terävyyden tunnistaminen on käyttökelpoinen tekniikka kun halutaan tehdä yksinkertaisen ja pelkistetyn analyysin mitattavan kappaleen rakenteesta kuvan perusteella. Reunaviivan tunnistamisen periaate sopii hyvin kuoppakulumisen sijainnin ja laajuuden mittaamiseen. (Yang et al. 1996, s. 362.)

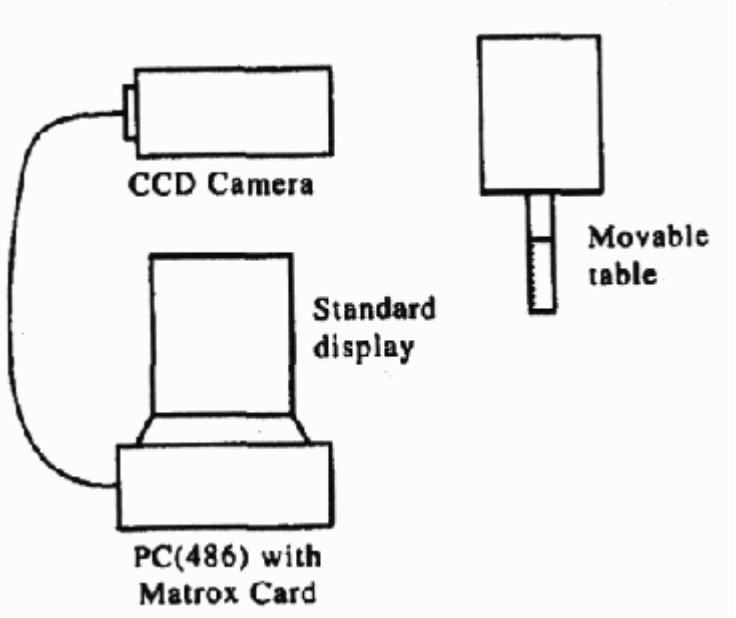
Menetelmässä on kuitenkin joitakin ongelmia. Suurimpia ongelmia kuoppakulumisen määrittämisessä ovat erilaiset häiriötekijät rintapinnalla. Näitä häiriötekijöitä ovat erilaiset lastut ja öljyroiskeet. Nämä häiriötekijät ovat kuitenkin poistettavissa suhteellisen yksinkertaisin keinoin kuten paineilmalla. Kun kuva lastuavasta työkalusta on tarkennettu (fokusoitu), tulee työkalun pintarakenne tarkasti näkyviin. Mikäli otetussa kuvassa on edelleen häiriötekijöitä, voidaan ne poistaa käyttämällä sopivaa alipäästösuodatinta. (Yang et al. 1996, s. 362.)

Kuoppakulumisen mittauksessa työkalun rintapinnasta otettu kuva voidaan jakaa kolmeen alueeseen: tausta, rintapinta ja kulumiskuoppa tai halkeama. Jotta kulunut osa voitaisiin erottaa kuvasta, vaaditaan riittävää harmaasävyn erottelukykyä. Kun reunakynnys on saavutettu, on suurin osa häiriötekijöistä poistettu ja ääriviivat on paikannettu Laplacian nollanylitysmenetelmällä (Laplacian zero-crossing method). Koska kuvassa saattaa vieläkin olla häiriötekijöitä, jotka tekevät ääriviivoista ja muotoviivoista epäjatkuvia, täytyy muotoviivat yhdistää häiriötekijöiden aiheuttamien vahingoittuneiden pikseleiden yli. Tämä suoritetaan reunojenlinkitystekniikalla (edge linking techniques). (Yang et al. 1996, s. 362-363.)

4.3 Stereonäkö

Stereonäkö on yksinkertainen menetelmä rakennelmien ja tilavuuksien mittaamiseen. Kun kolmiulotteista kappaletta valokuvataan eri suunnista, voidaan kappaleen mitat laskea vertailemalla otettuja kuvia. Kuvan vastinpisteen harmaasävyn taso kuvaa kameran etäisyyttä mitattavasta pisteestä. Niinpä vertailemalla valoisuutta ja kuvausetäisyyttä voidaan kuvista rakentaa kolmiulotteisen mallin. Kuvauksissa on kuitenkin muistettava, että kuvat on otettava samoilla kameran asetuksilla. (Karthik et al. 1997, s. 1573.)

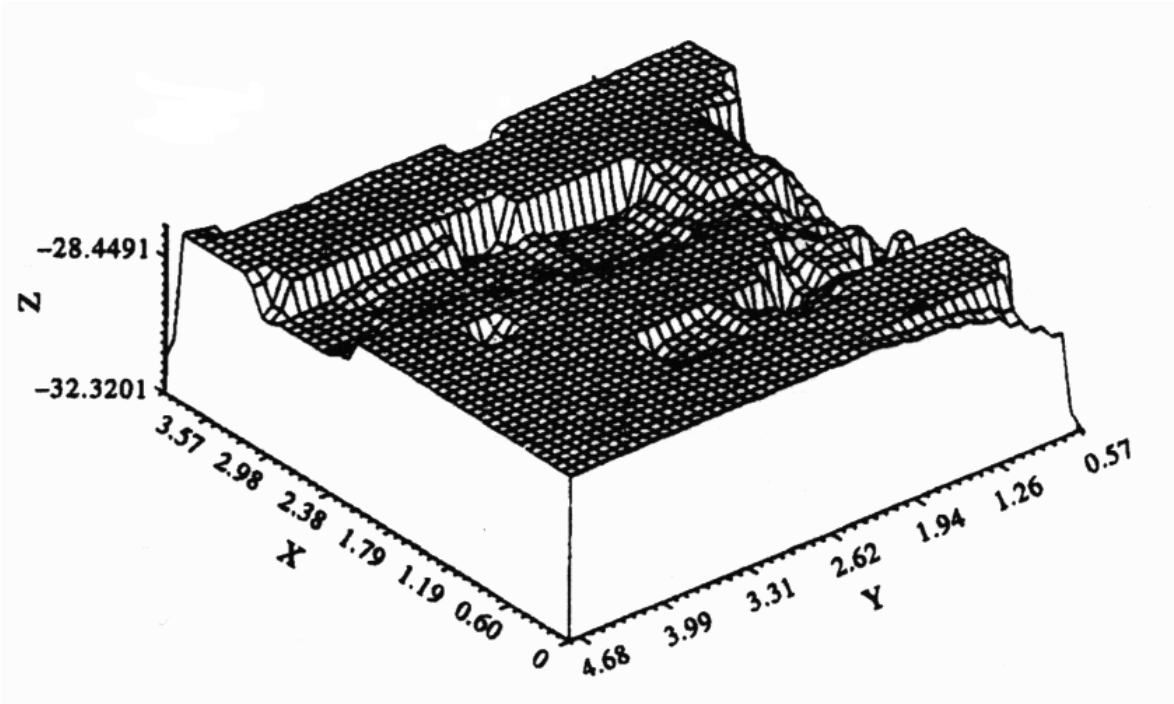
Alun perin stereonäkömenetelmä oli kehitetty toimimaan kahdella kameralla. Käytännössä mittaaminen onnistuu myös yhdellä kameralla. Samalla mittauslaitteiston koko pienenee ja laitteiston hinta laskee. Kuvassa 20 on esitetty Intian Teknillisessä Instituutissa tehdyn työkalun kulumisen mittaukseen tarkoitettu koelaitteisto. (Karthik et al. 1997, s. 1573-1575.)



Kuva 20. Stereonäköön perustuva koelaitteisto kuoppakulumisen mittaukseen (Karthik et al. 1997, s. 1575). Suomennos: Movable table = siirrettävä pöytä, Standard display = tavanomainen näyttö, PC(486) with Matrox Card = Matrox-kortilla varustettu ja 486-mallisella suorittimella toimiva PC-tietokone,

Intian Teknillisen Instituutin koelaitteiston tarkkuus oli 125 µm, joka suhteellisen epätarkka kuoppakulumiseen mittaukseen. Kuvien yhdistäminen kolmiulotteiseksi

kartaksi kesti 25–30 minuuttia. Syynä hitauteen oli C++ ohjelmointikielellä 386/486-alustalle tehty ohjelmisto, sekä tähän tarkoitukseen sopivien mittauskomponenttien puute. Tietokoneessa ollutta Matrox-merkkistä grafiikkakorttia ei käytetty, sillä se ei ollut yhteensopiva kyseisen ohjelmiston kanssa. Mikäli käytössä olisivat olleet paremmat komponentit, kuvien pinnan kartan muodostamiseen menisi muutama sekunti. Kuvassa 21 on esitetty koelaitteistolla saatu pinnan kartta. (Karthik et al. 1997, s. 1579.)

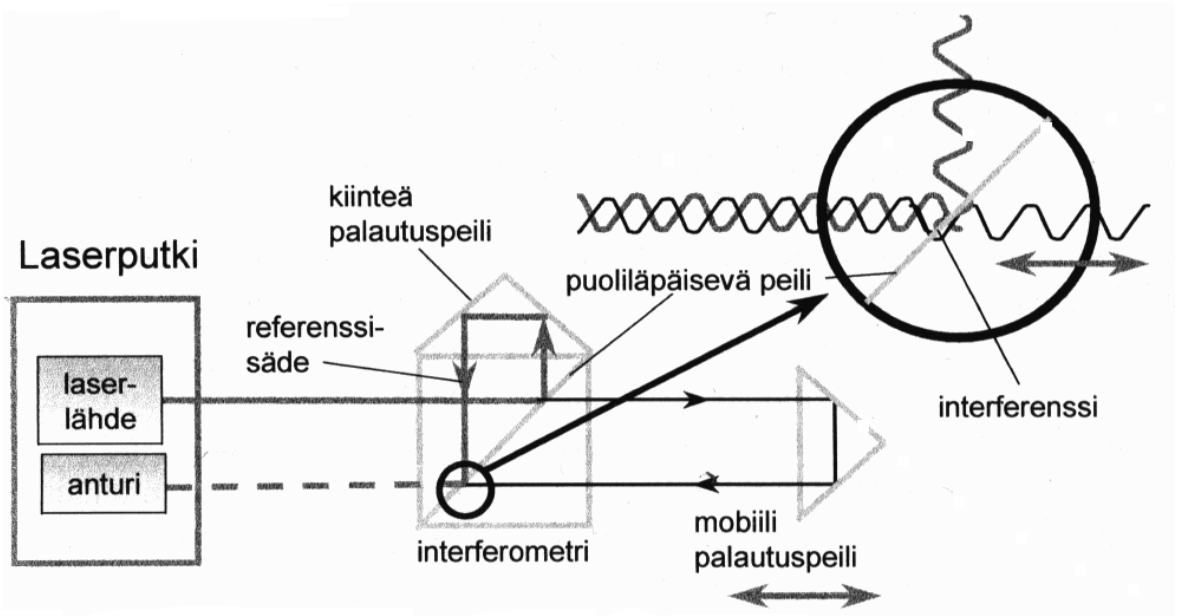


Kuva 21. Lastuavan työkalun rintapinnasta stereonäkömenetelmällä muodostettu kolmiulotteinen kuva. Kuvan terällä on lastuttu 4030 sekuntia. (Karthik et al. 1997, s. 1578.)

4.4 Interferometri

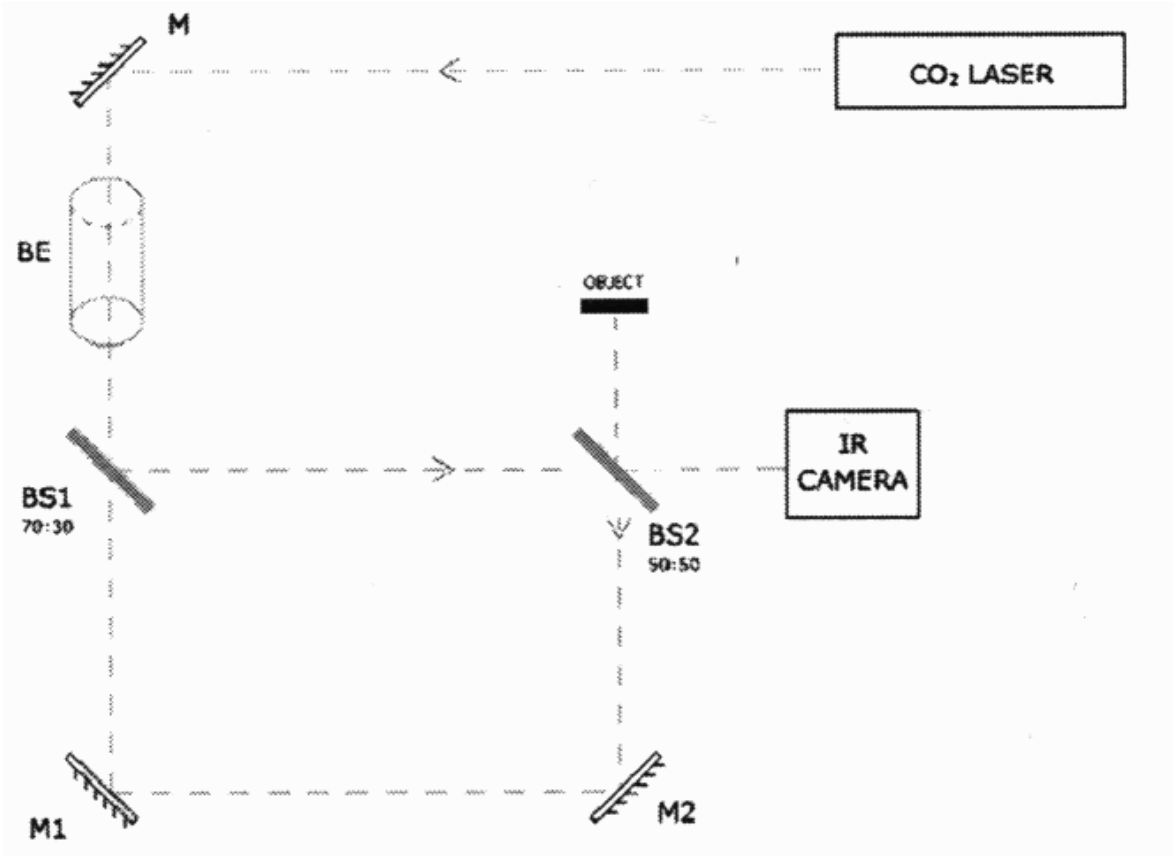
Pitkäaaltoista sovellusta interferometristä on käytetty laajalti erilaisissa sovelluksissa, kuten infrapunaoptiikassa. Pitkäaaltoista interferometrian sovellusta on käytetty myös pinnankarheuden määrittämiseen ja muihin sovelluksiin, jotka vaativat syvän asfäärin. (De Nicola et al. 2007, s. 1445.)

Interferometria perustuu valon aaltoluonteeseen, jossa valo taipuu kulkiessaan hilan lävitse. Tapahtuma on esitetty kuvassa 22. Laserputkesta lähetetty, yleensä kahta taajuutta sisältävä säde, jaetaan kahtia puoliläpäisevän peilin avulla. Erotetuista säteistä lyhyemmän (vakio) matkan kulkenut säde on referenssisäde. Kun pidemmän matkan kulkenut säde heijastuu esimerkiksi mobiilin palautuspeilin kautta takaisiin, säteet kerätään taas yhteen. Koska jaetut säteet ovat kulkeneet eri matkan, ne eivät välttämättä ole samassa vaiheessa. Kun mobiilin palautuspeilin etäisyyttä muutetaan, muuttuu palautuvan säteen vaihekulma referenssisäteen nähden. Tällöin referenssisäteen ja palautuvan säteen aallot välillä vahvistavat, välillä heikentävät toisiaan. Kun anturilla tutkitaan yhdistettyä sädettä eli niin kutsuttua interferenssiaaltoa, voidaan mobiilin palautuspeilin siirtymä mitata. (Andersson 1997b, s. 197.)



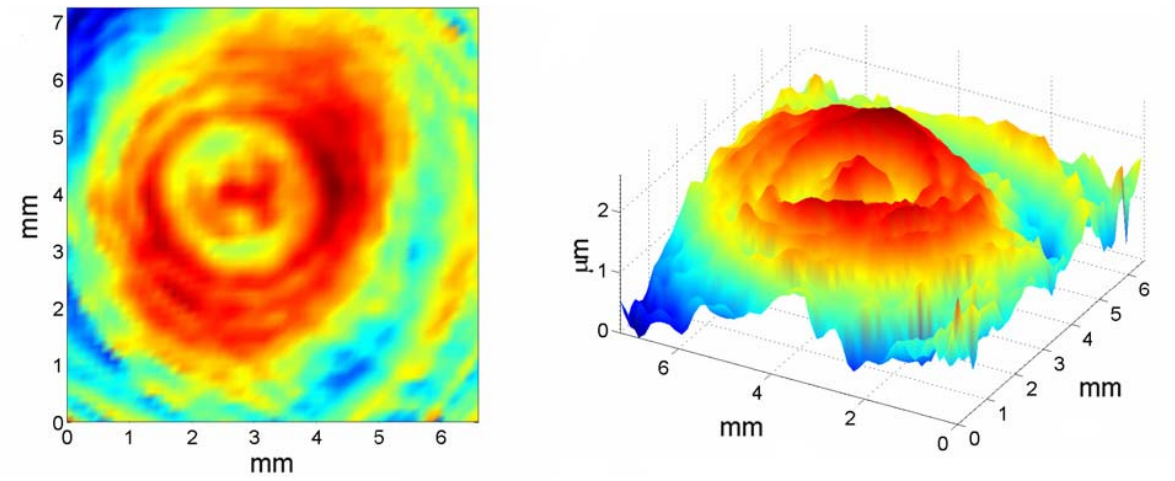
Kuva 22. Laserinterferometrin toimintaperiaate (Andersson 1997b, s.197).

Italian Instituuttien (Istituto di Cibernetica del CNR, Istituto Nazionale di Ottica Applicate del CNR), Firenzen yliopiston (University of Firenze), sekä Ghaanan yliopiston (University of Cape Coast) yhteisessä projektissa tutkittiin infrapunan digitaalista heijastus-holograppfista menetelmän tarkkuutta kolmiulotteisten muotojen mittauksessa. Kuvassa 23 näkyy Mach-Zender interferometriin perustuva koelaitteisto. (De Nicola et al. 2007, s. 1445.)



Kuva 23. Koelaitteiston toimintaperiaate, jossa M, M1, ja M2 ovat peilejä, BE on lasersäteen levitin (hila), BS1 ja BS2 ovat säteen hajottajat (puoliläpäisevät peilit) (De Nicola et al. 2007, s. 1445). Suomennos: IR camera = infrapunakamera.

Tutkimuksen laitteisto eroaa kuvan 22 laitteistosta siten, että lasersäde hajotetaan ensin kuvassa 23 näkyvällä hilalla (BE). Tämän jälkeen säde peitti koko mitattavan alueen, jolloin yhdestä infrapunakameran ottamasta kuvasta pystyttiin muodostamaan pinnan kolmiulotteisen kartan. Laserinterferometri osoittautui tutkimuksessa hyväksi menetelmäksi kolmiulotteisten muotojen mallintamiseksi. Kuvassa 24 on esitetty tutkimuksessa muodostettu kolmiulotteinen malli. Tutkimus suoritettiin laboratorio-olosuhteissa, ja mitattava muoto oli paineltu alumiiniseen kappaleeseen. Tämän vuoksi menetelmän soveltuvuus kuoppakulumisen mittaukseen teollisuusympäristössä jäi epäselväksi. (De Nicola et al. 2007, s. 1446-1448.)



Kuva 24. Vasemmalla on infrapunakameralla otettu kuva, josta on ohjelmistolla muodostettu oikealla oleva kolmiulotteinen malli. (De Nicola et al. 2007, s. 1448).

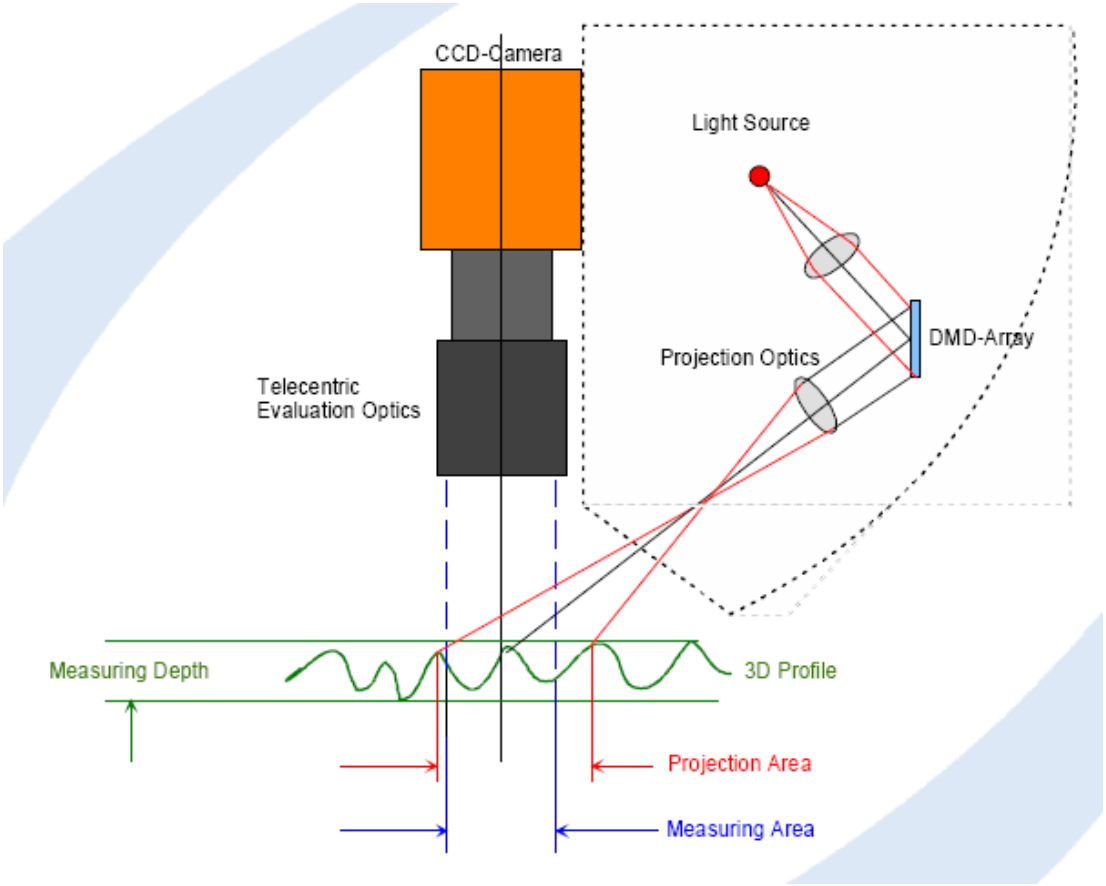
5 KAUPALLISET MITTALAITTEET

Markkinoilla on joitakin valmiita järjestelmiä kuoppakulumisen mittaukseen. Valmiiden järjestelmien hyvinä puolina on korkea automaatiotaso, helppokäyttöisyys, sekä kompakti muoto. Vastaavasti huonona puolena on niiden korkea hinta, joka lähtee kahdestakymmenestätuhannesta eurosta ylöspäin. Valmiiden järjestelmien lisäksi monet yritykset tarjoavat erilaisia räätälöityjä järjestelmiä, jotka kootaan asiakkaan tarpeiden mukaan erilaisista komponenteista, kuten CCD–kamerasta, laserista, projektorista ja niin edelleen. Räätälöityjen mittalaitteiden lähtöhinta on reilu kymmenentuhatta euroa.

5.1 MicroCAD

MicroCAD on GFMesstechnik GmbH yrityksen valmistama, vaihesiirtomenetelmään perustuva, pienten osien mittauksiin tarkoitettu mittalaite. MicroCAD:n toimintaperiaate on esitetty kuvassa 25. Määrätystä kulmasta projektisoidaan mitattavan kappaleen pintaan tasavälinen, raidallinen kuvio, jota kuvataan kameralla. Kolmiulotteinen kuva muodostetaan ohjelmistolla

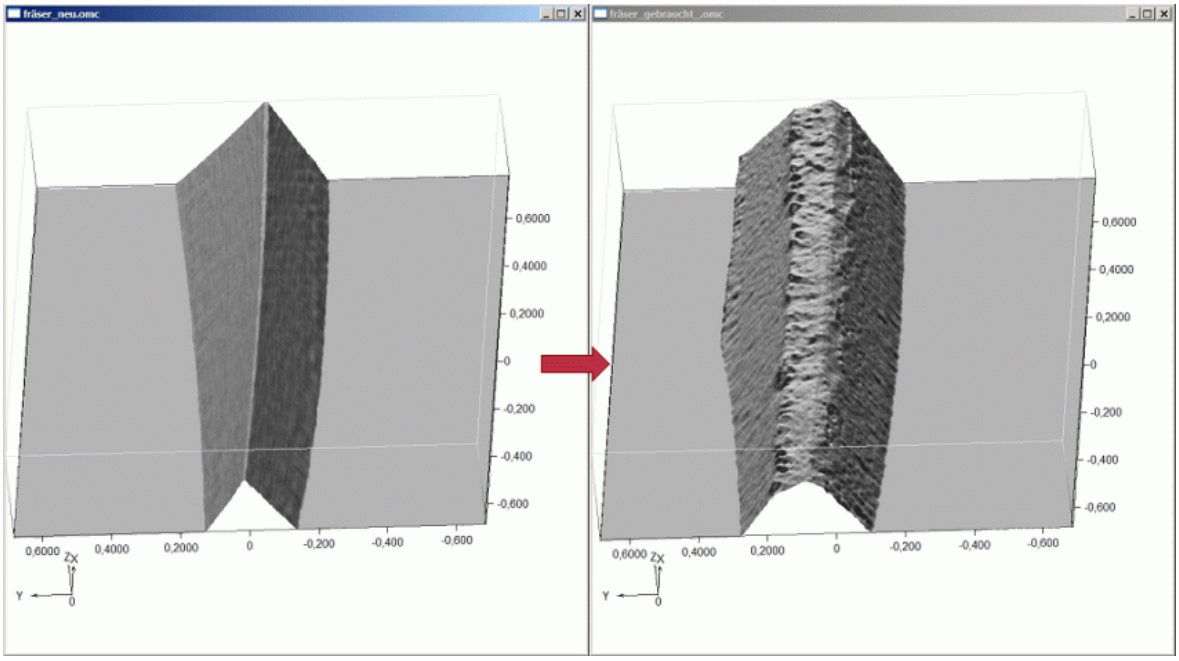
kamerakuvan viivojen (intensiteetin) ja harmaasävyn perusteella. Näiden kahden tunnistusmenetelmän avulla päästään erittäin hyvään mittatarkkuuteen. MicroCAD:n tekniset tiedot on esitetty liitteessä II. (MicroCAD – cutting edge geometry 2005.)



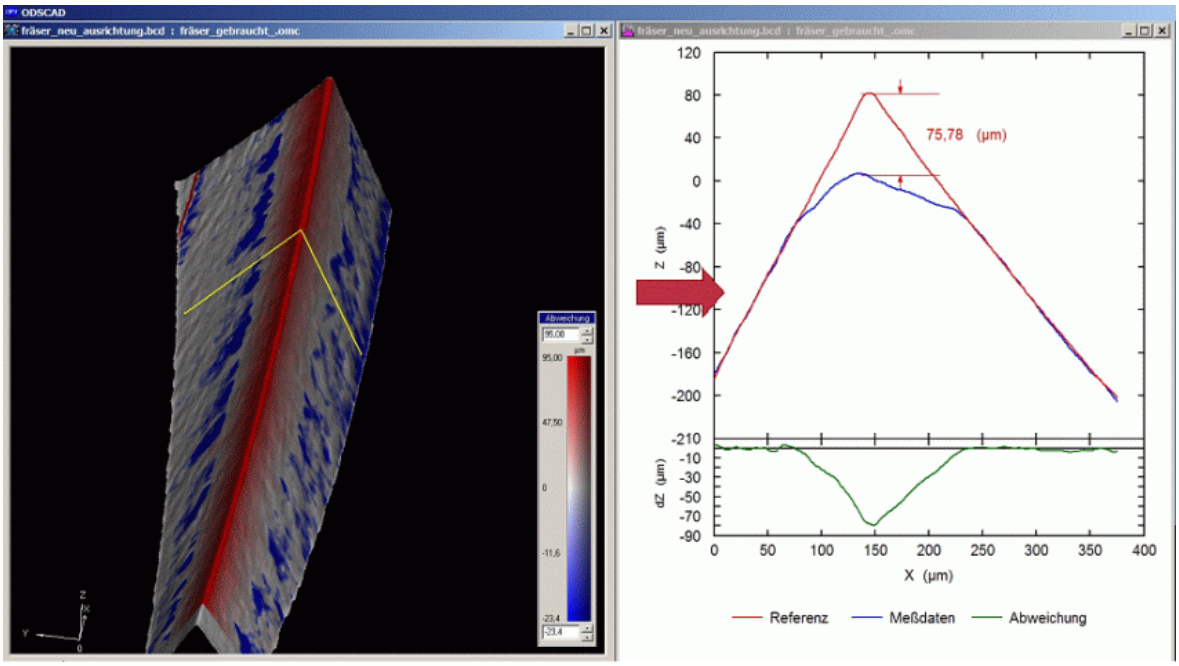
Kuva 25. MicroCAD mittalaitteiston toimintaperiaate (MicroCAD – cutting edge geometry 2005). Suomennos: Light Source = valon lähde, DMD-Array = Digitaalinen mikropeilijätjestelmä, Projection Optics = projektion optiikka, Measuring Area = mittausala, Projection Area = projektioala, Measuring Depth = mittaussyvyys, 3D Profile = kolmiulotteinen profiili, Telecentric Evaluation Optics = hyvän syvyyden ja terävyyden erottelukyvyllä varustettu optiikka

MicroCAD:ssa käytetään ODSCAD-ohjelmistoa, joka automaattisesti määrittää mitattavan lastuavan terän geometrian. Ohjelmisto mittaa automaattisesti lastuavan terän muodon, jonka jälkeen vertaa sitä alkuperäiseen, kulumattomaan terään muotoihin. Kuvassa 26 on esitetty MicroCAD:lla tallennetut geometriat uudesta sekä kuluneesta terästä. Kuvassa 27 uuden ja käytetyn terän muotoviivat

ovat astettu päällekkäin. Niitä vertailemalla on saadaan mitattua terän kuluminen. (3D measurement of cutting edges 2006.)



Kuva 26. Uuden ja kuluneen terän leikkausärmän geometria. (3D measurement of cutting edges 2006).



Kuva 27. ODSCAD ohjelman antama mittausteito terän kulumisesta (3D measurement of cutting edges 2006).

MicroCAD järjeselmällä ei ole Sumessa maahantuojaa, vaan suomalaisten asiakkaiden on tilattava kyseinen mittalaitteisto suoraan saksalaiselta valmistajalta.

5.2 Leica

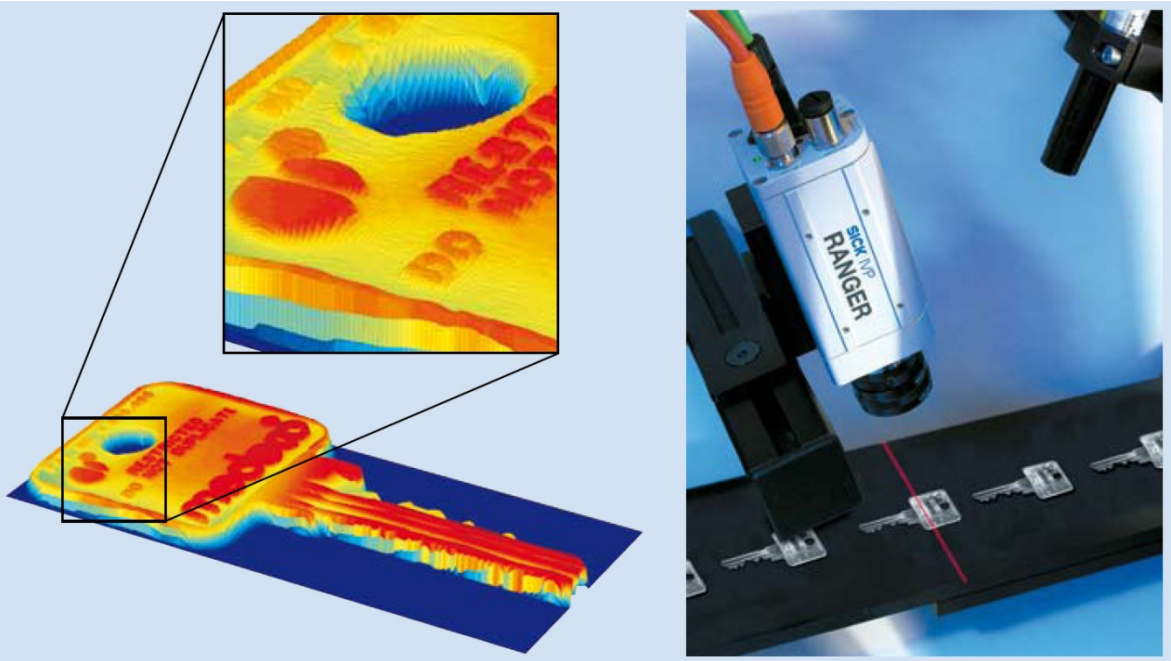
Leica Microsystemsillä on stereonäköön perustuva mittalaitteisto, joilla voidaan mitata pieniä yksityiskohtia kuten kuoppakulumista. Mittalaitteisto perustuu Leica MZ -malliseen mikroskooppiin, johon on kytketty IC3D-mallinen kamera sekä ohjelmisto. (Leica 3-D Imaging Systems 2005.)

Stereomikroskoopin optiikan suuri tarkennusväli mahdollistaa sekä pienien yksityiskohtien että suurempien vaurioiden mittaamisen. Mittausala vaihtelee mikroskoopin ja optiikan mukaan. Esimerkiksi stereomikroskoopin MZ10F mittausalan halkaisija vaihtelee 131–1,31 mm välillä. (The Leica MZ10 F Stereomicroscope 2006.) IC3D-kameran sisällä on oikeastaan kaksi 3,3 megapikselin CCD-kameraa. Kun edellä mainitulla optiikalla ja tällä korkearesoluutioisella kamerakokonaisuudella otetaan kuva, on mittaustarkkuus vakuuttava. Kuvassa 28 on esitetty esimerkki Leican mittalaitteistosta. (Leica 3-D Imaging Systems 2005.) Leica mittalaitteiden suomalainen maahantuoja on Leica Nilomark Oy.

Kuva 28. Leica MZ- mallistoon kuuluva stereomikroskooppi, joka yhdessä Leica IC3D kameran kanssa soveltuvat kuoppakulumisen mittaukseen. (Leica 3-D Imaging Systems 2005).

5.3 Ranger

Kuoppakulumisen mittaukseen voidaan soveltaa erilaisista komponenteista räätälöityä järjestelmää. Mittalaitteisto voidaan toteuttaa monella tavalla kuten topografiaan, intensiteettiin, sirontaan tai harmaasävyeroteluun perustuvilla menetelmillä. Mittalaitteiston mittatarkkuus riippuu käytettävästä optiikasta ja menetelmästä. Yksi vaihtoehto kuoppakulumisen mittaukseen on Sick Oy:n Ranger-kameraan perustuva mittalaitteisto. Kuvassa 29 on esitetty kyseinen laitteisto. (Ranger 3D 2007.)



Kuva 29. Ranger kameraan perustuva mittalaitteisto, jolla voi mitata kuoppakulumista (Ranger 3D 2007).

Kuvassa 29 esitetyn järjestelmä on laserskanneri, jonka toimintaperiaate perustuu laserin lähettämään laserjuovaan, jota kamera kuvaa. Juovasta lasketaan Y ja Z koordinaatit. Liikuttamalla kohdetta tai kameraa, kohteesta voidaan muodostaa 3D-kuva. Kolmiulotteisen kuvan muodostaminen tapahtuu sopivan ohjelmiston, kuten Matroxin avulla. (3D robotiikassa 2006.)

6 ANALYSOINTI

Kuoppakulumisen mittaukseen soveltuvia mittalaitteita on markkinoilla lukuisia. Halvimmat ja yksinkertaisimmat mittalaitteet ovat luuppi ja statiiviin kiinnitetty tuhannesosamittakello ja kalliimmat ovat täysin automaattiset mittausjärjestelmät. Mittalaitteiston valinta on tehtävä yrityksen tarpeiden mukaan. Mikäli kuoppakulumista mitataan harvoin, ja mitattavat työkalut ovat muodoltaan yksinkertaisia, on tuhannesosamittakello erinomainen valinta. Vastaavasti pitkälle automatisoitu mittausjärjestelmä on paras vaihtoehto yrityksille, jotka tekevät erilaisia lastuttavuuskokeita, joiden osana on myös lastuavan terän vaurioiden tutkiminen.

MicroCAD on ainoa mittalaite, joka on tehty lastuavan työkalun kulumisen tutkimuksiin. Tämän vuoksi se soveltuu parhaiten lastuavan terän kuoppakulumisen mittaukseen. Vastaavasti MicroCAD on ylivoimaisesti kallein, jolloin sen hankkiminen kannattaa vasta silloin, kun kulumisen mittauksia tehdään jatkuvasti. Leican MZ-stereomikroskooppiin perustuva mittalaitteisto on hitain käyttää, sillä lastuava teräpala tulisi irrottaa työkalupitimestä mittauksen ajaksi. Ranger kameraan perustuva mittalaitteiston etu on se, että mittalaitteisto kootaan tarvittavaa sovellusta varten. Näin mittalaitteistosta saadaan sellainen kuin halutaan. Toisaalta toimivan mittalaitteiston kokoaminen vaatii paljon osaamista ja aikaa, sillä kaikki mittaukseen tarkkuuteen vaikuttavat asiat, kuten esimerkiksi mitattavan terän pinnoitteen heijastuskyky, on tutkittava huolellisesti.

Nykyisten PC-tietokoneiden nopeus ja digitaalikameroiden tarkkuus on riittävä tarkkojen kolmiulotteisten muotojen mittaamiseen ja mallintamiseen. Tarkan mittaustuloksen saaminen edellyttää käytetyn mittausmenetelmän tuntemisen. Erilaisissa mittausmenetelmissä on eri vaatimukset puhtauden, lämpötilan, mitattavan kappaleen heijastuskyvyn ja valoisuuden suhteen. Lisäksi mittauslaitteiston kalibroinnilla on suuri merkitys luotettavan mittaustarkkuuden saamiseen.

Kuoppakulumisen mittauksen edellyttämä tarkkuus asettaa suuret vaatimukset mittalaitteiston asennukselle sekä kalibroinnille. Kiinnitys on toteutettava niin, että mittalaitteisto pysyy tiukasti kiinni, eikä suuntauskulma muutu sorvauksen aiheuttaman värinän vuoksi. Kun mittalaitteisto on asennettu, täytyy erilaisilla kokeilla varmistua siitä milloin ja miten kalibrointi kannattaa suorittaa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston Konepajatekniikan laboratorioon tarpeisiin soveltuvan mittalaitteiston valinta on vaikea, sillä laboratorion asettamat kriteerit ovat tiukat. Mittalaitteistolla on kyettävä mittaamaan porien kuoppakulumista sekä laitteiston sovelluttava NC-sorvin työkalujen kulumisenvalvontaan. Mikään tällä hetkellä markkinoilla olevista yksittäisistä mittalaitteistoista ei täytä näitä kriteereitä sellaisenaan.

MicroCAD täyttää parhaiten Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston Konepajatekniikan laboratorion asettamat vaatimukset, sillä se on helposti siirrettävissä, nopea, tarkka ja se sisältää valmiina olevat ohjelmistot työkalujen vaurioiden mittaukseen. Toisaalta MicroCAD on erittäin kallis, joten hankintahinnan puolesta se ei sovellu Konepajatekniikan laboratorion käyttöön.

Leican MZ-stereomikroskooppiin perustuva mittalaitteisto ei täytä Konepajatekniikan laboratorion asettamia vaatimuksia. Kyseisellä laitteistolla ei pystytä mittaamaan kuoppakulumista NC-sorvin sisällä, sillä mittalaitteisto ei mahdu sorvin sisään niin, ettei se häiritsisi lastuamista.

Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston Konepajatekniikan laboratoriolle soveltuvin mittalaitteisto on Ranger kameraan perustuva järjestelmä. Koska kyseisen mittalaitteiston siirrettävyys on huono, parhaan tulokseen päästään kahdella kameralla, joista ensimmäinen on NC-sorvissa ja toinen sorvin ulkopuolella. Ratkaisevin tekijä Ranger kameraan perustuvan mittalaitteiston soveltuvuudessa

yliopiston käyttöön on kyseisen mittalaitteen edullisuus sekä hyvä soveltuvuus myös muihin kuin terävaurioiden mittauksiin.

LÄHDELUETTELO

3D measurement of cutting edges. [GFMesstechnik GmbH:n www-sivuilla]. Päivitetty 2006. [Viitattu 12.02.2008]. Saatavissa: http://www.gfmesstechnik.com /en/industrial-metrology/cutting-edges.html.

Aaltonen, K. 2000. Lastuamisen perusteet. Teoksessa: Ihalainen, E & Aaltonen, K & Aromäki, M & Sihvonen, P. Valmistustekniikka. Kahdeksas muuttumaton painos. Helsinki. Otatieto Oy. s. 140-149. ISBN 951-672-205-9.

Andersson, P. 1997a. Terien kuluminen. Teoksessa: Aaltonen, K & Andersson, P & Kauppinen, V. Koneistustekniikat. Porvoo. Werner Söderström Osakeyhtiö. s. 72–99. ISBN 951-0-21437-x.

Andersson, P. 1997b. Pituudenmittaus. Teoksessa: Andersson, P & Tikka, H. Mittaus- ja laatutekniikat. Porvoo. Werner Söderström Osakeyhtiö. s. 72–99. ISBN 951-0-21440-x.

Ansaharju, T & Ilomäki, O & Maaranen, K. 1989. Lastuava työstö. Porvoo. WSOY:n graafiset laitokset. 398 s. ISBN 951-0-15342-7.

Boothroyd, G & Knight, W.A. 2006. Fundamentals of Machining and Machine Tools. Boca Raton, Florida. Taylor & Francis Group. 573 s. ISBN 1-57444-659-2.

Choudhury, S. K & Ganga Raju. 2000. Investigation into crater wear in drilling. International jounar of machine tools & manufacture. vuosikerta 40. s. 887-898.

Maaranen, K. 2007. Koneistustekniikat. 1-2 painos. Painopaikka tuntematon. Werner Söderström Osakeyhtiö. 329 s. ISBN 978-951-0-27156-8.

Karthink, A & Chandra, S & Ramamoorthy, B & Das, S. 1997. 3D Tool Wear Measurement and Visualisation using Stereo Imaging. Department of Computer Science and Engineering. Indian Institute of Technology.

MicroCAD – cutting edge geometry. [www-verkkodokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon). GFMesstechnik GmbH, 2005. [Viitattu 12.02.2008]. Saatavissa: http://www.gfmesstechnik.com/en/industrial-metrology/cutting-edges.html.

Leica 3-D Imaging Systems. [www-verkkodokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon). Leica Microsystems, 2005. [Viitattu 12.02.2008]. Saatavissa: http://www.leica-microsystems.com/pdfs.nsf/(ALLIDs)/BDFF7C2FE226990386 2570220047C2C8/$FILE/Leica_3D_Brochure_EN.pdf.

Leppäjärvi, S. 2006. Robotit ja älykkäät näköjärjestelmät tuotteistavassa teollisuudessa. [Verkkodokumentti]. Kuopio. [Viitattu 13.02.2008]. Saatavissa: http://www.ncp.fi/modernipuu/robo111006/Esitelm%C3%A4t/Seppo%20Lepp%C3 %A4j%C3%A4rvi/MAG_3D_in_Robotics.pdf.

Quan, C & He, X. Y & Tay, C. J & Shang, H. M. 2001. Optics Communications. vuosikerta 189. s. 21-29.

Ranger 3D-camera. [www-verkkodokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon). Sick Sensor Intelligence, 2007. [Viitattu 13.02.2008]. Saatavissa: www.mysick.com /saqqara/get.aspx?id=IM0016818.

Salonen, P. 2004. Kuluminen. Teoksessa: Kivioja, S & Kivivuori, S & Salonen, P. Tribologia – Kitka, Kuluminen ja Voitelu. Neljas korjattu painos. Helsinki. Hakapaino Oy. s. 97-129. ISBN 951-672-341-1.

Sandvik Coromant. 1994. Modern Metal Cutting. Sweden. Tofters Tryckeri AB. 606 s.

Sandvik Coromant. 2005. Lastuavat työkalut. Tekninen käsikirja. Sweden. 606 s.

Secotools. 2005. Tuoteluettelo. 528 s.

Shaw, Milton C.1986. Metal Cutting Principles. Oxford. Clarendon Press. 594 s.

Standardi ISO 3685. 1993. Tool life testing with single-point turning tools.

Tikka, H. 2007. Koordinaattimittaus. 1.painos. Tampere. Tampereen Yliopistopaino OY. 473 s. ISBN 952-5657-01-9.

The Leica MZ10 F Stereomicroscope. [www-verkkodokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon). Leica Microsystems, 2006. [Viitattu 12.02.2008]. Saatavissa http://www.leica-microsystems.com/pdfs.nsf/(ALLIDs)/AF8B31963C3F3086C12571E0004EDA18/$FILE/Leica_MZ10F_Brochure_EN.pdf.

Wang, W. H & Wong, Y. S & Hong, G.S. 2006. 3D measurement of crater wear by phase shifting method. Wear. vuosikerta 261. s. 164-171.

Yang, M & Kwon, O. 1996. Crater wear measurement using computer vision and automatic focusing. Journal of Materials Processing Technology. vuosikerta 58. s. 362-367.

PINNAN MATEMAATTINEN YHTÄLÖ

Kun sinimuotoinen tasaisesti viivoitettu kuva projektisoijaan 3D partikkelin pinnalle, saadaan viivojen vääristymisestä seuraavanlainen matemaattinen yhtälö

$$I(x,y) = R(x,y)\left[G(x,y) + H(x,y)\cos\varphi(x,y)\right]. \quad (13)$$

Yhtälössä $R(x,y)$ kuvaa partikkelin pinnan heijastuskykyä, $R(x,y)$ on taustan intensiteetti, $H(x,y)/R(x,y)$ viivojen kontrasti (fringe contrast) ja $\varphi(x,y)$ on vaihekulman funktio, joka kuvaa viivojen muodonmuutosta ja näin olleen siihen liittyvää partikkelia [mitattavan kappaleen korkeus $h(x,y)$]. (Wang et al. 2006, s.165.)

Käytännössä vaihekulman funktion löytyy normaalisti helposti. Esimerkiksi neljän sinimuotoisen viivan kuvio projektisoijaan kappaleen päälle niin, että niiden vaihekulmat ovat 0, $\pi/2$, π ja $3\pi/2$. Näin olleen niiden vaihekulmiksi saadaan:

$$I_1 = R\left[G + H\cos(\varphi)\right] \quad (14)$$

$$I_2 = R\left[G + H\cos(\varphi + \pi/2)\right] \quad (15)$$

$$I_3 = R\left[G + H\cos(\varphi + \pi)\right] \quad (16)$$

$$I_4 = R\left[G + H\cos(\varphi + 3\pi/2)\right]. \quad (17)$$

Yhdistämällä edellä olevat kaavat saadaan vaihekulman funktioksi nyt

$$\varphi = \arctan\left[(I_4 - I_2)/(I_1 - I_3)\right]. \quad (18)$$

Vaihekulman arvot on laskettu välillä [$-\pi$, π], joten vaihekulmien jakaumat jokaiselle viivalle on pakattu tälle välille. Näin olleen kahdella vierekkäisellä viivalla on epäjatkuvuuskohtia 2π-vaihekulmien välein. Nämä epäjatkuvuuskohdat voidaan korjata helposti lisäämällä tai vähentämällä vaihekulmaan 2π ja tarkistamalla tulos. (Wang et al. 2006, s.165.)

MATEMAATTISEN YHTÄLÖN JA MITATTAVAN KAPPALEEN MUOTOJEN YHDISTÄMINEN

Tarkastellaan tekstin kuvaa 17 uudestaan. Projektorilla heijastettu kuvio näkyy tarkastelupisteestä I katsottuna osuvan referenssitason pisteeseen C ja sen vaihe on p_0. Tällöin matemaattiseksi yhtälöksi saadaan (Wang et al. 2006, s.165.)

$$l_C = G + H\cos(2\pi\overline{OC}/\,p_0)\,. \tag{19}$$

Tarkkaillaan tilannetta CCD-kameran eräästä ilmaisimesta d_i. Kyseisellä ilmaisimella mitataan referenssitason pisteeseen C ja mitattavan kappaleen pinnan pisteeseen D osuvan valon intensiteetti. Intensiteetin havaittiin pisteessä D olevan sama kuin referenssitason pisteessä A (pisteessä A ilman mitattavaa kappaletta) muutettuna kappaleen heijastuskyvyllä *R*. Tällöin

$$l_D = R\left[G + H\cos(2\pi\overline{OC}/\,p_0)\right]. \tag{20}$$

Kun käytetään $I_D = Rl_C$ ja kaavoja 19 ja 20 saadaan vaihe-eroksi φ_{CD}. Nyt referenssitason pisteiden A ja C välinen etäisyys on

$$\overline{AC} = (p_0/2\pi)\varphi_{CD}\,. \tag{21}$$

Käyttämällä tätä hyväkseen päästään käsiksi kunkin pinnan pisteen korkeuteen referenssitasoon nähden. Näin olleen tarkasteltavan pisteen korkeus on

$$\overline{BD} = h(x,y) = \frac{\overline{AC}}{\tan\theta + \tan\theta'} = \frac{(p_0/2\pi)\varphi_{CD}}{\tan\theta + \tan\theta'} = K\varphi_{CD}\ , \tag{22}$$

jossa θ ja θ' ovat kuvan 6 mukaiset projektorin heijastumiskulma ja tarkkailukulma. Ohjelmiston avulla voidaan rakentaa eri pisteiden etäisyyksistä pinnan kartan, josta voidaan mitata tarvittavat etäisyydet. Kuvassa 18 on esitetty kolikon pinnasta otettu pinnan kartta. (Wang et al. 2006, s.165.)

LIITE II

MICROCAD MITTALAITTEISTON ERI VERSIOIDEN TEKNISET TIEDOT

	MikroCAD compact	**MikroCAD high resolution**	**MikroCAD hand held / inline**
Kameran tyyppi	AVT Dolphin F-145-B	AVT Oscar F-510-C	Basler A 602-F
Mittauspisteiden lkm.	1380 x 1040	2588 x 1958	640 x 480
Tiedon hankinnan nopeus	≥ 270 ms	≥ 1 s	≥ 68 ms
Mittausaika, minimaalinen	5 s	12 s	0.8 s
Mittausaika, tavallisesti	15 s	30 s	1 s

	Korkeuden res.	**Vaakataso resoluutio**			
Mittausala	**Kaikki järjestelmät**	**compact**	**high resolution**	**hand held**	**inline**
1.0 mm x 0.8 mm x 0.3 mm	0.1 µm	0.8 µm	0.4 µm	-	1.6 µm
2.0 mm x 1.5 mm x 0.5 mm	0.2 µm	1.5 µm	0,8 µm	-	3 µm
4 mm x 3 mm x 1 mm	0.3 µm	3 µm	1.5 µm	-	6 µm
12 mm x 10 mm x 3 mm	1 µm	10 µm	5 µm	20 µm	20 µm
26 mm x 20 mm x 6 mm	2 µm	20 µm	10 µm	40 µm	40 µm
45 mm x 33 mm x 12 mm	4 µm	33 µm	17 µm	70 µm	70 µm