

Antti Johansson

VESILEIKKAUS
TOIMINTA JA KEHITYSSUUNNAT

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Lokakuu 2019

TIIVISTELMÄ

Antti Johansson: Vesileikkaus, Waterjet cutting
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Lokakuu 2019

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan vesileikkauksen toimintaa ja sen kehityssuuntia. Tarkoituksena on selvittää vesileikkaukseen liittyviä trendejä, joilla vesileikkaus olisi tulevaisuudessa kilpaileva leikkausmenetelmä.

Vesileikkaus on suosittu leikkausmenetelmä. Nimensä mukaisesti leikkauksessa hyödynnetään paineistettua vettä. Työssä on etsitty kirjallisuudesta tietoa vesileikkauksen toiminnasta, käyttökohteista ja mahdollisista kehityssuunnista. Opinnäytetyössä vesileikkausta vertaillaan muihin leikkausmenetelmiin.

Tutkimusten ja uusien menetelmien myötä vesileikkauksesta on tullut monipuolisempi kone. Se on tehokas leikkaamaan vaikeitakin kuvioita ja kykenee muihin työstömenetelmiin vaivatta. Erittäin teknisestä järjestelmästä huolimatta operoiminen vesileikkauksella on tehty yksinkertaiseksi. Kasvua on nähty varsinkin abrasiivisella vesileikkauksella, jolla on paljon teknistä ja taloudellista hyötyä olemassa oleviin leikkausmenetelmiin.

Avainsanat: vesileikkaus, vesisuihkuleikkaus, abrasiivinen vesileikkaus, leikkausmenetelmä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	VESILEIKKAUKSEN TEKNIikka.....	3
2.1	Vesileikkauksen teoria ja laitteiston rakenne.....	3
2.2	Vesisuihkuleikkaus	5
2.2.1	Robottiikka, automaatio ja ohjelmistot.....	6
2.2.2	Pumput	6
2.3	Abrasiivinen vesileikkaus.....	7
2.3.1	Leikkausjäljen parantaminen parametrien optimoinnilla ja abrasiivihiekalla	8
2.3.2	Hyödyntäminen mikrokomponenteissa.....	12
3.	SOVELTUVUUS	13
3.1	Materiaalit.....	14
3.2	Kilpailevat leikkausmenetelmät.....	14
3.2.1	Laserleikkaus.....	15
3.2.2	Polttoleikkaus.....	15
3.2.3	Plasmaleikkaus.....	16
3.3	Markkina ja kustannusvertailu.....	17
4.	JOHTOPÄÄTÖKSET	21
	LÄHTEET	22

KUVALUETTELO

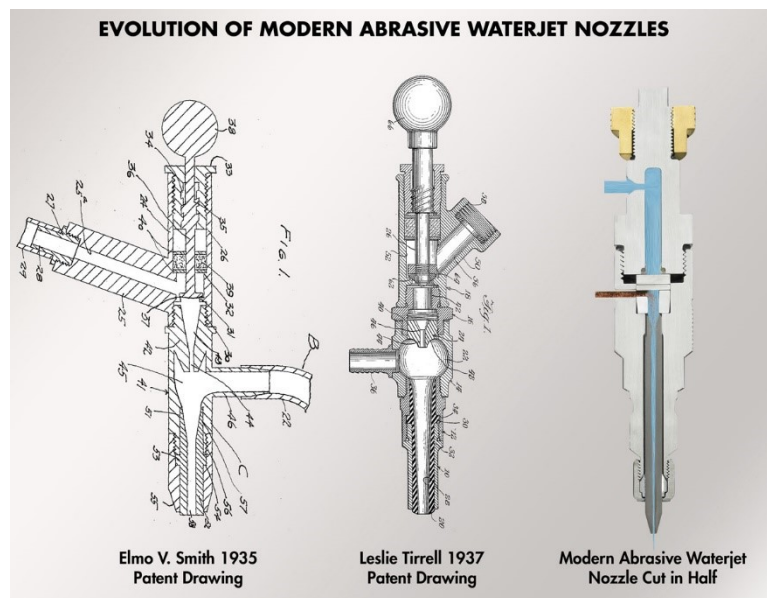
Kuva 1.	Poikkileikkaus vesileikkureiden kehityksestä nykypäivään.....	1
Kuva 2.	Vesileikkauslaitteiston rakennekaavio	4
Kuva 3.	Abrasiivihiekan sekoittuminen vesisuihkuun.....	5
Kuva 4.	Suosittelava muoto abrasiivihiekalle.....	8
Kuva 5.	Suihkuvirtauksen nopeus ja etäisyys työstettävästä pinnasta.....	9
Kuva 6.	Leikatun kappaleen poikkipintaan muodostuvia juovia.....	9
Kuva 7.	Pinnankarheuden vaikutus materiaalin paksuuteen eri ajonopeuksilla...	10
Kuva 8.	Laserleikkauksen periaate	15
Kuva 9.	Vesileikkaukoneiden vuotuinen myynti.....	17
Kuva 10.	Vuoden 2016 markkinaosuus suurimpien vesileikkaukoneiden valmistajista.....	18

LYHENTEET JA MERKINNÄT

- CAD Computer-aided design
- CAM Computer-aided manufacturing
- CNC Computerized Numerical Control
- FEA Finite Element Analysis
- USD United States Dollars

1. JOHDANTO

Vesileikkaus on menetelmä, jossa korkeapaineinen vesi virtaa ohuessa putkessa lopulta suihkuten ulos kohti työstettävää kappaletta. Varsinainen leikkaus tapahtuu vesisuihkun irrottaessa materiaalia kappaleesta. Vesileikkaus voidaan suorittaa kahdella tavalla: puhtaana vesisuihkuleikkauksena tai abrasiivisena vesileikkauksena, jolloin veden seassa on hiovia partikkeleita (waterjets.org 2015).



Kuva 1. Poikkileikkauksia abrasiivisten vesileikkauspäiden kehityksestä nykypäivään (Wikimedia commons 2012).

Vesisuihkun eroosio vaikutusta alettiin käyttämään 1900-luvulla kaivostoiminnassa kivihiilten leikkaamiseen paineen ollessa enintään 100 MPa. Vasta 1970-luvulla tuli vesileikkauksilaitteita, kun pumpputeknikka kehittyi. Muita merkittäviä saavutuksia teknologialle on ollut virtauksen ohjausjärjestelmä 1990-luvulla ja CNC-ohjelmistojen toteuttaminen vesileikkauksilaitteissa 2000-luvulla. (Deaconescu 2016; Hashish 2013)

Opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella nykypäivän vesileikkauslaitteita sekä tutkia tieteellisten tutkimusten tuloksia tekniikan parantamiseksi. Nykyään vesileikkaus käsitteenä on laajentunut muihin nesteisiin ja työkaluihin, mutta tässä työssä tarkastellaan vesisuihkuleikkausta ja abrasiivista vesileikkausta. Työssä myös käsitellään muita leikkausmenetelmiä siinä näkökulmassa, miten vesileikkaus vertautuu kilpailijoihinsa nähden.

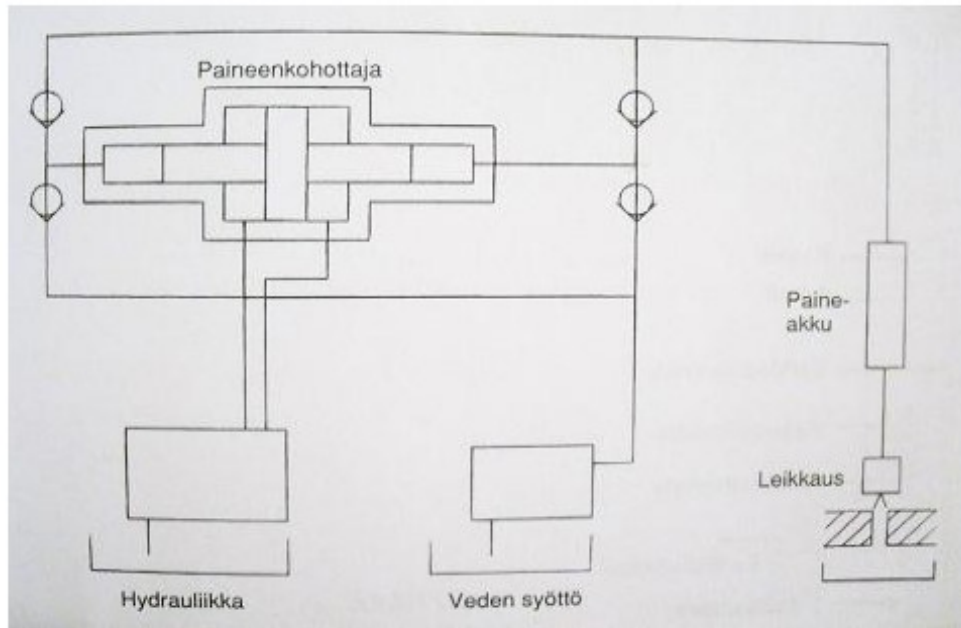
2. VESILEIKKAUKSEN TEKNIikka

Tekniikkaosuudessa käydään läpi vesileikkauksen toimintaa ja alaluvuissa tarkastellaan tutkimusten tuloksia tekniikan kehittämiseen vesisuihkuleikkauksen ja abrasiivisen vesileikkauksen osalta. Työssä tarkastellaan myös yritysten kokemuksia ja tietoa tekniikasta.

2.1 Vesileikkauksen teoria ja laitteiston rakenne

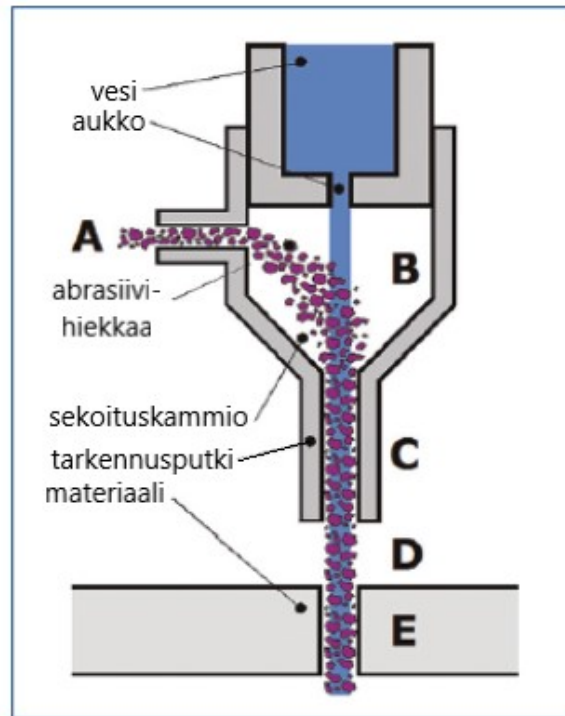
Leikkaamista voidaan tehdä kahdella tavalla, mekaanisesti tai termisesti (Piironen 2013, s.17). Vesileikkaus on mekaaninen työstöprosessi, joka perustuu veden kuluttavaan voimaan, joka irrottaa materiaalia kappaleen pinnasta sekä huuhtelee irronneet materiaalihiukkaset työstökohteesta (Turun Watercut Oy 2019). Vesileikkauksessa eroosion aiheuttaa nesteen kineettinen energia. Kaupallisessa käytössä vesileikkausjärjestelmät käyttävät leikkaamiseen korkeaa painetta, 200–400 MPa, nopeuden ylittäessä äänennopeuden. Suuttimen sisähalkaisija voi olla 0,1–0,4 mm (Kong 2014, s.1). Leikkausprosessin merkittävimmät parametrit ovat nesteen paine ja nopeus, suuttimen etäisyys työstävästä kappaleesta ja kulma kappaleeseen nähden. Suuttimen koolla ja muodolla on myös tärkeä vaikutus leikkausprosessin onnistumisen kannalta. (Tangwarodomnukun et al. 2010; Waterjets.org 2015)

Sekoittamalla veteen abrasiivihiekkaa, kuten granaattia (Hashish 2013, s. 11), onnistutaan leikkaamaan myös kovempia materiaaleja. Tällä tekniikalla saadaan hyvä leikkausjälki pienellä lämmönvaikutusalueella verrattuna muihin leikkausmenetelmiin (Van Ut et al. 2009). Vesileikkauksen laatu, joka muodostuu leikkausjäljestä, perustuu materiaaliin, abrasiivisen partikkeleiden määrään ja leikkausnopeuteen.



Kuva 2. Vesileikkauslaitteiston rakennekaavio (Ihalainen 2003, s. 389).

Vesileikkaussysteemi voidaan jakaa viiteen osaan: pumppujärjestelmään, leikkauspäähän, liikejärjestelmään, ohjelmistoon ja lisälaitteisiin (Hashish 2013, s.3). Lisälaitte riippuu käyttökohteesta, se voi olla esimerkiksi jätteenkeräys. Kuvasta 2 nähdään laitteiston komponentit. Painetta nostetaan hydraulisella paineenkohottimella, kun taas paineen tasaaminen tapahtuu paineakkujen avulla, joista vesi johdetaan leikkauslaitteen suuttimeen. Neste purkautuu yli äänennopeudella, joka voi olla jopa kolminkertainen äänennopeuteen verrattuna. Suuttimen rakenteella pyritään muotoilemaan suihku kapeaksi sen osuessa leikattavaan kappaleeseen. Työstettävän kappaleen ja leikkaussuuttimen etäisyys on tyypillisesti 3 mm. Leikkauksen ohjelmoinnilla saadaan optimoitua suutin myötäilemään osan muotoja niin sanotulla railonkorjauksella, jolloin railon reuna seuraa leikattavaa rataa. Näin varmistetaan, että kappale on juuri halutun kokoinen. Pienentämällä veden virtausvastusta lisäämällä sopivia suurimolekyylisiä polymeerejä, saadaan leikkaustulosta parannettua. Leikkausta ohjataan siihen asennetulla tietokoneella, joka sisältää tarvittavat ohjelmistot. Ohjelmisto huolehtii automaattisesti putken syötöstä ja leikkaamisesta. Kovempia materiaaleja leikattaessa syötetään veden joukkoon abrasivihiekkaa leikkauspään kautta. Kuvassa 3 on poikkileikkaus leikkauspäädästä, jossa on kuvattu hiovien partikkeleiden sekoittuminen veteen. (Ihalainen 2003; Turun Watercut Oy 2019)



Kuva 3. Abrasiivihiekan sekoittuminen vesisuihkuun. Perustuu lähteeseen (Hashish 2013, s.1). (A – sisääntulo sekoituskammioon, B – vesisuihkun ja abrasiivin sekoittuminen, C – seoksen tarkentaminen, D – tarkennusputken ulostulo, E – materiaali leikkaus)

2.2 Vesisuihkuleikkaus

Puhdasvesileikkaus, eli vesisuihkuleikkaus, on tarkoitettu leikkaamaan pehmeitä ja hauraita materiaaleja. Tällaisessa menetelmässä leikkaus tehdään tyhjässä altaassa, toisin kuin abrasiivisessa vesisuihkuleikkauksessa. Tämä sen takia, että vesi ei aaltoile osien päällä ja aiheuta turhaa kastumista. Käytetty vesimäärä on erittäin vähäistä, joten kastuminen on olematonta. Kosteudestakaan ei ole ongelmaa, sillä se on haihtunut enintään parin tunnin kuluessa jopa huokoisesta materiaalista. (Laserle Oy; Turun Watercut Oy 2019)

Alalukujen 2.2.1 ja 2.2.2 kehityssuunnissa olevat ratkaisut ovat myös pitkälti sovellettavissa abrasiivisessa vesileikkauksessa. Kyseiset ratkaisut käsittelevät vesisuihkuleikkauksen tehokkuuden ja tuottavuuden parantamista.

2.2.1 Robotiikka, automaatio ja ohjelmistot

Autoteollisuudessa on hyödynnetty korkeapaineista robotisoitua vesileikkausta, sillä se soveltuu sisustusmateriaalien työstämiseen ja on taloudellinen vaihtoehto komponenttien monimutkaiseen muotoiluun (Rooks 2001). Teollisuuskonserni ABB:n (2000) mukaan yhtiön tuotteissa käytetty offline-ohjelmointi teollisuusroboiteissa voi parantaa huomattavasti vesileikkauksen tuottavuutta. Tässä kontekstissa offline-ohjelmoinnilla tarkoitetaan työtä, jossa työskentely ei tapahdu robotin läheisyydessä. Verrattuna online-ohjelmointiin laatu on hyvin pitkälti riippuvainen robottiohjelmoijan taidosta. Yksi monista hyödyistä on se, että robotti on täydessä tuotannossa ohjelmoinnin aikana. Robotiikan ansiosta leikkaustoimintoja voidaan muuttaa kappaleittain, jolloin jokainen komponentti voidaan leikata tiettyä ajoneuvomallia varten, joka liikkuu kokoonpanolinjalla.

ABB on kehittänyt teknologiaa myös abrasiiviseen vesileikkaukseen, jolloin materiaali-valikoima laajenee. Tällainen teknologia tarjoaa uuden automatisoidun ratkaisun kaiken tyyppisille valumetallien puhdistamiselle, mukaan lukien kappaleet, joilla on monimutkaiset muodot tai tuotantomäärä alhainen. Tämä on potentiaalinen korvaaja perinteisille prosesseille, kuten sahaamiselle, poraamiselle ja lävistämiselle.

Ohjelmistojen ominaisuuksien laajentuessa valmistajien kokemus paranee yksinkertaisella CAD tai CAM käyttöliittymällä (Bachman 2017). Ohjelmistot ovat yhteensopivia lähes kaikkien tiedostomuotojen kanssa. Näin ollen ei tarvitse huolehtia tiedostojen tyypeistä. Ohjelmistojen avulla vesileikkauslaitteiden suorituskyky on parantunut huomattavasti, kun leikkausnopeus on saatu kasvamaan ohjelmistojen optimoinnilla (Lorincz 2009).

2.2.2 Pumput

Vesileikkauslaitteissa pumpulla on tärkeä rooli, koska kasvattamalla nesteen painetta saadaan vesileikkauksesta nopeampi. Yleisesti vesileikkauksessa käyttämällä korkeapainepumppuja [400 MPa] saadaan leikkauksesta tarkempi ja koherentimpi. Vesileikkauksessa käytetään kahden tyyppisiä korkeapainepumppuja: hydrauliset ja kampiakselikäyttöiset pumput (Hashish 2013, s.4). Vesileikkaustekniikan tuottavuuden ja leikkausnopeuden parantamiseen suositellaan korkeapaineisempaa pumppua, tuplapumppujärjestelmää tai lisäämällä toisen leikkauspään laitteeseen (Lorincz 2009).

Metallurginen kehitys ja pumppujen sekä tiivisteiden saaminen kestävämpään pidempään, on ollut jatkuva haaste (Lorincz 2009). Pumppujen luotettavuus on parantunut selvästi (Lorincz 2009, s.50). Hydraulinen pumppu vaatii reaktiivista eli korjaavaa ylläpitoa, koska ne pettävät odottamattomasti. Kun taas kampiakselipumppu vaatii proaktiivista huoltoa, joka katsotaan joko ennaltaehkäiseväksi tai ennakoivaksi. Antureita on rakennettu laitteisiin ja venttiileihin, jotka kertovat operaattorille tiivisteiden kulumisesta tai tilasta. Hydraulisen pumpun tapauksessa tämä tarkoittaa yhden tai kahden kuukauden aikaa reagoida hälytykseen, kunnes siitä tulee haittaa. Lorincz (2009) mainitsee, että paineen saavuttaessa 414-483 MPa, on huomion kiinnitettävä materiaalien heikkenemiseen. Kehitykseen auttaa FEA-laskenta eli elementtimenetelmä. FEA-laskennalla tarkastellaan rakenteen kestävyys sekä se auttaa optimoimaan rakenteen muodon ja materiaalinkäytön. Näin saadaan mallinnettua komponentti todella korkeapaineiselle pumpulle; näitä 648 MPa:n paineita kutsutaan hyperpaineeksi (Lorincz 2009, s.50).

Pumppuihin erikoistuneet yritykset kehittävät pumppujaan, ja yrittävät tehdä tehokkaampaa ja samalla mullistavaa pumppua. Techni Waterjet mainostaa internetsivuillaan, että he ovat tehneet pumpun, joka on suorituskykyisin, hiljaisin, pienin hiilijalanjäljeltään, helppoin huoltaa ja ympäristöystävällisin vesileikkauspumppu (Techni Waterjet 2018). Pumppu muistuttaa toiminnaltaan hydraulista pumppua, sillä erolla, että siinä sähköinen servomoottori liikuttaa sylinterin sisällä palloruuvia. Sen lisäksi Techni Waterjet yhtiö on käyttänyt älyteknologiaa muuttaakseen pumpun itsevalvontayksiköksi auttaakseen operaattoria ennakoimaan huoltotarpeet, kirjoittaa Koenig (2018).

2.3 Abrasiivinen vesileikkaus

Abrasiivinen vesileikkaus on yksi viime aikojen kehitetyin ei-perinteinen valmistusprosessi. Leikkausmenetelmä edellyttää tietyn määrän hankaavia partikkeleita vesisuihkuun, jolloin siitä tulee entistä koherentimpi. Samalla sen mekaaninen vaikutus vahvistuu ja leikkausnopeus kasvaa 30 %:lla (Deaconescu 2016). Tämä mahdollistaa laajan valikoiman materiaalien työstämiseen lisäämättä termistä vääristymistä.

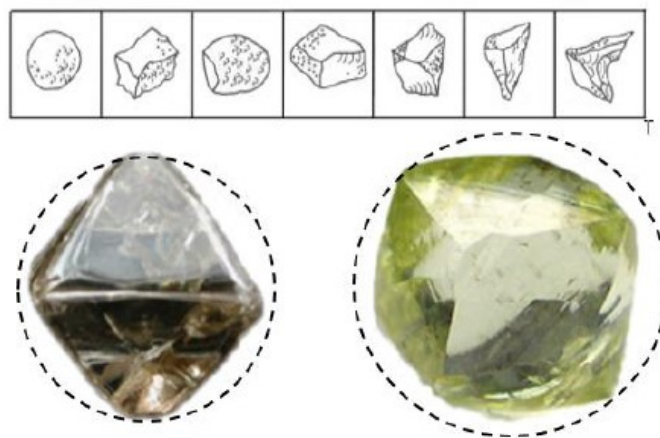
Teknologia on tuottanut yhä enemmän kilpailukykyisiä välineitä ja valikoimia teollisuuden sovelluksille viime vuosina. Alaluvuissa 2.3.1 ja 2.3.2 tarkastellaan leikkausjäljen parantamista ja käyttöä mikrotason leikkauksissa.

2.3.1 Leikkausjäljen parantaminen parametrien optimoinnilla ja abrasiivihiekalla

Erityisen merkittävä on abrasiivihiekan muoto, jota käytetään abrasiivisessa vesileikkauksessa. Abrasiivihiekan muodon tulisi olla niin kompakti ja lähellä pallomaisuutta kuin mahdollista, kuten kuvassa 4 on esitetty. Vesileikkauksessa käytettävä abrasiivihiekka, halkaisijaltaan 100–300 µm (Kong 2014), valitaan muototekijällä, joka on muotoa:

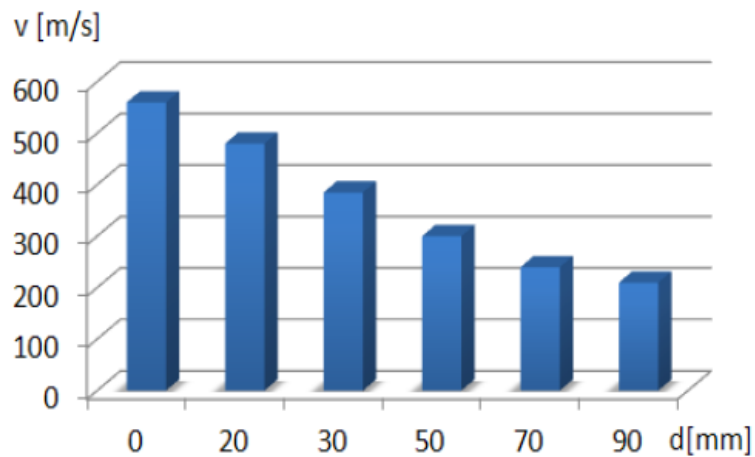
$$F_f = \frac{d_{min}}{d_{max}} \quad (1)$$

Tässä d_{min} on halkaisijaltaan suurin ympyrä, jonka voi piirtää abrasiivihiekkaan. Kun taas d_{max} :ssa on pienin ympyrä, joka rajoittuu abrasiivihiekkaan (Deaconescu 2016, s.3). Yleisimmät arvot muototekijälle ovat välillä 0,64 ja 0,70. Yleisin abrasiivihiekka on Australian granaatti, joka on kokoa 80 Mesh (Sitek & Martinec 2016, s. 878). Mesh mitta perustuu siiviläerotteluun, jossa siivilän aukot määrittävät mitan.



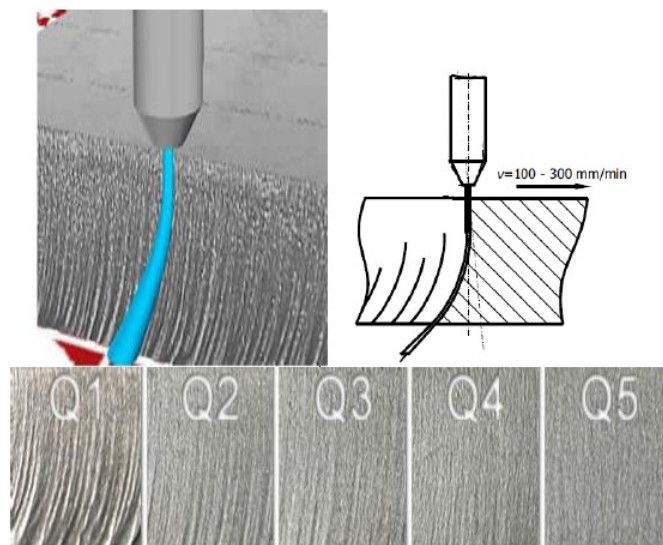
Kuva 4. Suositeltava muoto abrasiivihiekalle. Perustuu lähteeseen (Deaconescu 2016, s.3).

Abrasiivinen suihkuvirtaus määräytyy neljään tärkeään ominaisuuteen: nopeus, koherenssi, tiheys ja symmetria. Korkeampi nopeus parantaa kyseisen virtauksen leikkaukykyä. Suuttimesta lähtevä suihkuvirtaus riippuu myös etäisyydestä, koska suihkuvirtauksen nopeus pienenee työstökappaleen pinnan etäännyessä. Kuvassa 5 näkyvät suihkuvirtauksen nopeuden vaihtelut etäisyyden muuttuessa paineen ollessa 200 MPa ja suuttimesta lähtevän suihkun halkaisijan ollessa 0,2 mm.



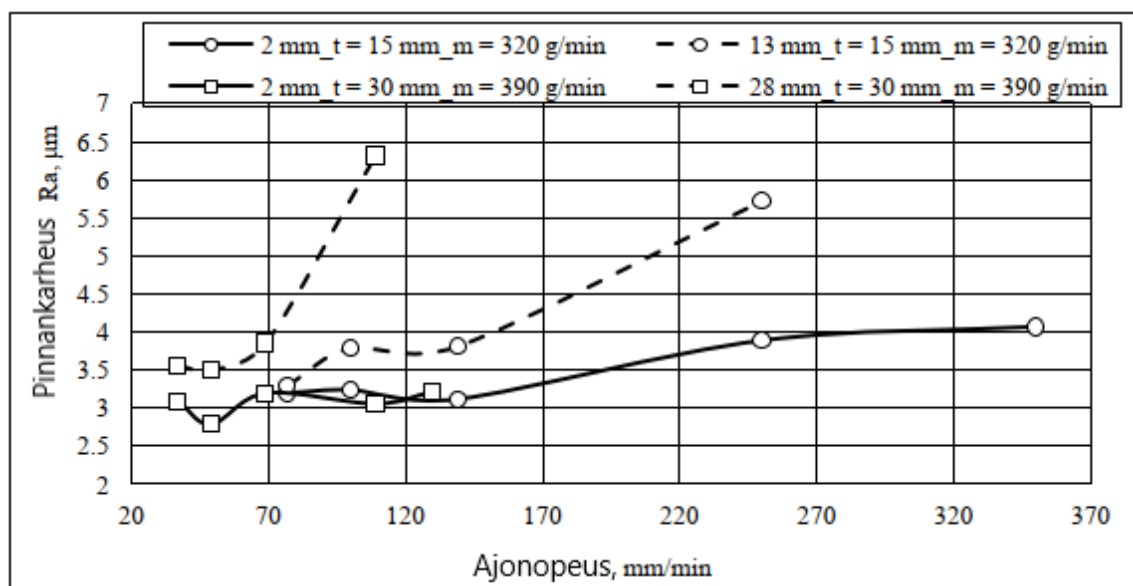
Kuva 5. Suihkuvirtauksen nopeus v ja etäisyys työstettävästä pinnasta d (Deaconescu 2016, s.3).

Kun abrasiivinen suihku osuu materiaaliin, sen kineettinen energia vähenee tasaisesti jättäen kaarevan jäljen leikkauspintaan, kuten kuvasta 6 nähdään. Deaconescun (2016) mukaan haitan voi kompensoida kasvattamalla virtausnopeutta v , tai pienentämällä abrasiivihiekan syöttönopeutta w_a . Leikkauspään nopeuden hidastaminen voisi olla toinen tapa. Yleisesti ottaen korkealaatuinen leikkaus vaatii tietoa työkappaleen materiaalista ja paksuudesta, jotta suihkuvirtauksen nopeus saadaan oikeanlaiseksi. Syöttönopeus w_a on erityisen tärkeä leikkausjäljen kannalta. Suurempi syöttönopeus vähentää työstön laatua, ja joissakin tilanteissa, kun tietyt kriittiset arvot ylittyvät, suihkuvirtauksen profiili hajoaa ja leikkausta ei enää tapahdu.



Kuva 6. Leikatun kappaleen poikkipintaan muodostuvia juovia (Deaconescu 2016, s. 3).

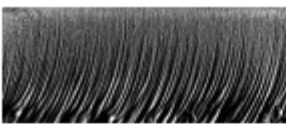
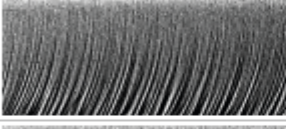
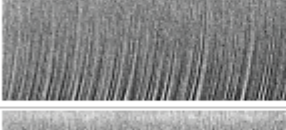
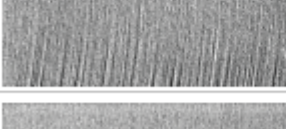

Edellisessä olevassa kuvassa leikkaus on luokiteltu viiteen kategoriaan. Q1:n ollessa heikkolaatuinen leikkaus, joka tuottaa korkean pinnankarheuden. Q5 osoittaa leikkauksen, joka on saavutettu, kun työparametrit asetetaan sopiviksi. Taulukossa 1 on tarkemmat tiedot Q-arvoista. On tärkeää kuitenkin muistaa, että abrasiivihiekan tunkeutuessa syvemmälle materiaaliin, leikkauksen laatu heikkenee. Kuvassa 7 huomataan, kuinka materiaalin paksuus vaikuttaa pinnankarheuteen, kun leikkauspään ajonopeutta kasvatetaan. Käyrät kuvaavat pinnankarheuden lukemaa tietyllä syvyydellä. Materiaali on alumiinia paksuuksilla 15 mm ja 30 mm. Massavirta paksuudelle 15 mm on 320 g/min ja 30 mm:lle on 390 g/min.



Kuva 7. Pinnankarheuden vaikutus materiaalin paksuuteen eri ajonopeuksilla. Perustuu lähteeseen (Begic-Hajdarevic 2014, s. 398)

Asiakkaalle yksi tärkeimmistä vaatimuksista on leikkauks jäljen laatu ja koneistettujen osien pinnanlaadun pääindikaattori on pinnankarheus [Ra]. Pinnankarheus on pinnan ominaisuus, joka kuvaa pinnan pieniä epätasaisuuksia. Pinnankarheus ei ota huomioon suurempia epätasaisuuksia, kuten muotovirheitä, kolhuja ja naarmuja. Mitä pienempi pinnankarheus Ra lukema on, sitä vähemmän siinä on pinnan epätasaisuuksia. Epätasaisuudet mitataan instrumentilla, joka laskee summaamalla pinnan epätasaisuuksien huippujen ja minimien korkeuksien aritmeettiset keskiarvot. Abrasiiviselle vesileikkaukselle leikkauks jäljen laadulle annetaan Q-arvo; katso taulukko 1. (SFS-EN ISO 4287; Begic-Hajdarevic 2014)

Taulukko 1. Pinnanlaatu tasoja 15 mm paksussa alumiini näytteessä (Perec et al. 2015)

Grade	View	Properties
Q1		The cut surface exhibits clear defects (coarse grooves, interrupted cuts, scouring, etc.).
Q2		Rough cut, with clear, but regular, grooves without any gouging
Q3		Common result, selected for economic reasons. Grooves are easily visible.
Q4		High work piece accuracy and slight surface roughness. Slight grooving is visible.
Q5		Highest shape accuracy of the work piece and lowest roughness. No visible grooves.

Abrasiivihiekalla on haittansa, sillä se kuluttaa leikkauspään tarkennusputken seinämää ja tämä aiheuttaa kuluja sekä hidastaa työtä. Tšekkiläiset tutkijat Sitek ja Martinek (2016) ovat tutkineet abrasiivihiekan pinnoittamista muovilla. Tällöin se suojaisi leikkauspään sekoituskammiota ja tarkennusputkea, jolloin yksittäisen jyvän tullessa ulos leikkauspäästä suhteellisen ehjänä sen leikkauskyky säilyy. Toinen hyöty tästä muovipinnoitteesta on, että se tekee jyvistä pallomaisemman. Pallomaisempaa objektia on helpompi käsitellä laskelmissa. Pinnoitteen kaupallinen hyödyntäminen on hankalaa, koska se on teknisesti monimutkaista ja aikaa vievä. Sitek ja Martinek (2016) testasivat abrasiivihiekan kuumentamista eri lämpötiloissa ja totesivat leikkauskyvyn parannuksen olevan 3% ruostumattomalle teräkselle, kun abrasiivihiekkaa kuumennettiin neljä tuntia 900 °C asteessa. Taloudellisesta näkökulmasta abrasiivihiekan kuumentaminen ei ole kannattavaa. Parhaimman tuloksen antoi abrasiivihiekan koko. Koon ollessa 120 Mesh tai enemmän saadaan tarkempi leikkaus ja sileämpi leikkausjälki. Saattaa olla, että tulevaisuudessa kyseisestä olevasta koosta tulee standardi.

2.3.2 Hyödyntäminen mikrokomponenteissa

Kysyntä on kasvanut todella pienten komponenttien valmistuksessa, kuten kelloissa, lääketieteessä ja mekatroniikassa. Sveitsiläisellä Walter Maurer:lla oli tavoitteena mikrokoisten komponenttien työstäminen vuonna 2004 yhdessä Waterjet AG tiimin kanssa. Pienet komponentit vaativat tarkkuutta leikkauksessa ja siihen eivät perinteiset abrasiiviset vesileikkauslaitteet kyenneet. (Lorincz 2009)

Mikrovesileikkauksessa tarkkuus on paljon tärkeämpi kuin suihkuvirtauksen halkaisija. Tarkkuus riippuu leikkuuprosessista ja koneen ohjauksesta. Leikkauksen tarkkuutta kasvatetaan prosessianalyysillä. Jotta abrasiivihiekkaa voidaan annostella tarkasti, täytyy vesisuihkun profiili olla pyöreä. Mikrovesileikkauslaitteet kykenevät $\pm 0,005$ mm paikannustarkkuuteen ja $\pm 0,01$ mm leikkaustarkkuuteen. Pinnankarheus voi olla jopa 1,6 Ra. Tarkkuutta ja leikkausjäljen laatua on lisätty käyttäen tärinänvaimennusta, joka vähentää pumpun värinää. Pumpun mekaaninen värinä siirtyy leikkauspään suuttimeen aiheuttaen aaltoilua railossa. (WATERjet AG, Hanson 2013)

Taloudellisesti mikrovesileikkaus säästää resursseja ja rahaa. Veden ja abrasiivihiekan kulutus tippuu 0,4 l/min:sta 0,17 l/min:iin ja 60 g/min:sta 16 g/min:iin. Pumpun käyttämä energia on vähentynyt puolella. Koska työ tehdään ilman työkaluja, jopa hyvin pienet sarjat voidaan leikata ilman asetusaikaa. Pois lukien skaalaus, mikrovesileikkauksella on samat hyödyt kuin normaalilla vesileikkauslaitteella, kts. luku 3. (WATERjet AG).

Mentäessä makrosta mikeroon, mikrovesileikkauksen leikkausmekanismi pysyy samana. Vaikeinta tässä on abrasiivihiekan koko, sillä suuttimen halkaisija on 50 μm ja abrasiivihiekan halkaisija on puolet suuttimesta. Tällainen tilanne aiheuttaa monia ongelmia abrasiivihiekan kerääntyessä yhteen, hiukkaskerroksen tiivistyminen ja ilman tarttumisen (Hanson 2013, s.3). Hienojakoisen abrasiivihiekan mittaus ja syöttö on monimutkaista ja haastavaa. Sen takia abrasiivihiekan mittauksesta ja syötöstä on tullut ensisijainen este mikroabrasiiviselle vesileikkauksen kehitykselle.

3. SOVELTUVUUS

Vesileikkaaminen on monipuolinen ja joustava menetelmä. Sen suosio alkoi kasvamaan 1990-luvulla, kun abrasiivinen vesileikkaus lisäsi leikattavien materiaalien valikoimaa. Sillä on mahdollista leikata lähes kaikenlaisia materiaaleja tehokkaasti sekä kustannus-
tehokkaasti. Etuina on myös, ettei leikkaus jätä materiaalin pintaan epäpuhtauksia ja jälki on täten siistiä. Koska leikkumuoto on lähes vapaa, säästytään myös työvaiheilta. Kappaleeseen kohdistuva lämmönvaikutusalue on sen verran pieni, että termisiä muutoksia ei aiheudu materiaaliin. Termisillä muutoksilla tarkoitetaan vääntymistä ja karkenemistä. (Waterjets.org 2015)

Oikein käytettynä laitteisto on käyttäjälle turvallinen, kunhan ei joudu suuttimen eteen. Hiova aine on inerttiä ja myrkytöntä, ja vesi itsessään on harmitonta ihmiselle. Leikkauksessa syntyvät pölyt ja kaasut eivät aiheuta ongelmia, koska vesi sitoo kaikki epäpuhtaudet. Yleisin vaaratilanne voi muodostua vesisuihkun jättäessä kappaleeseen terävät reunat. Waterjets.org-sivustolla (2015) mainitaan, että käyttöjärjestelmä on tehty yksinkertaiseksi ja helposti omaksuttavaksi. Tällöin leikkauksuvion laatiminen onnistuu etänä CAD-piirustuksella, jonka jälkeen tiedoston voi tuoda laitteiston tietokoneeseen. Tietokone hoitaa monimutkaiset toimenpiteet leikkauksuvion saavuttamiseksi. Vesileikkaus soveltuu myös poraamiseen, jyrsimiseen, hiomiseen, sorvaamiseen ja pinnan muokkaamiseen (Hashish 2013, s. 2).

Edellisen kappaleen vesileikkauksen työstömenetelmistä moni on jo kaupallisessa käytössä, kun taas osa ovat tulleet pienen joukon tietoisuuteen. Hyvä esimerkki tästä on pinnan muokkaaminen. Paineistetulla vesisuihkulla voidaan muokata pintaa puhdistamalla, ruostetta poistamalla, kiillottamalla ja maalia poistamalla. Varsinkin laivateollisuudessa pinnan muokkaamista käytetään ruosteen poistamisessa. Jälkikäsitteily on vesileikkauksessa vähäistä, koska leikkauksijäljestä tulee lähes jäysteetön ja leikkauksipinnasta saadaan sileä. Tarvittaessa vesileikkauksella onnistuu jälkityöstö, kuten hiominen ja purseenpoisto. Purseenpoistolla poistetaan oksidikerros leikkauksipinnalta, jolloin saadaan maali tarttumaan paremmin. (Hashish 2013; Turun Watercut Oy 2019; Krajcarz 2014, s. 841)

3.1 Materiaalit

Kuten on jo tullut ilmi vesileikkauksella, voidaan leikata monenlaista materiaalia ja usein leikataan myös hyvinkin paksua materiaalia, kuten 406–457 mm titaania (Lorincz 2009, s.50). On olemassa materiaaleja, joita vesileikkauksella ei pystytä leikkaamaan ja tähän kuuluvat karkaistu lasi, tietyt keramiikat, volframikarbidi ja timantti (Lorincz 2009; Waterjets.org 2015). Karkaistu lasi ja timantti ovat kahta ääripäätä, jossa karkaistu lasi pirstoutuu leikatessa ja timantti on aivan liian kova leikattavaksi. Materiaalit jaetaan vesileikkauksessa kahteen kategoriaan pehmeisiin ja koviin.

Pehmeille ja hauraille materiaaleille sopii puhdasvesisuihkuleikkaus. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi vaneri, kumi, hiilikuitu, muovit ja erilaiset tiivistemateriaalit. Vesileikkaus sopii myös elintarviketeollisuuteen, koska leikkaaminen on puhdasta ja turvallista.

Abrasiivinen vesileikkaus soveltuu koville materiaaleille, esimerkiksi kivet, titaani, teräkset ja alumiini. Abrasiivisella vesileikkauksella voidaan leikata todella paksua metallia riippuen abrasiivin määrästä. Materiaalin paksuudella on kuitenkin ylärajansa, sillä liian paksussa materiaalissa vesisuihkun teho laskee etäisyyden funktiona. Tällöin vesisuihku leikkaa diagonaalisesti ja aiheuttaa sekundaarista eroosiota, jolloin railo levenee pohjalta (Gent et al. 2012; Hashish 2013, s. 16-17).

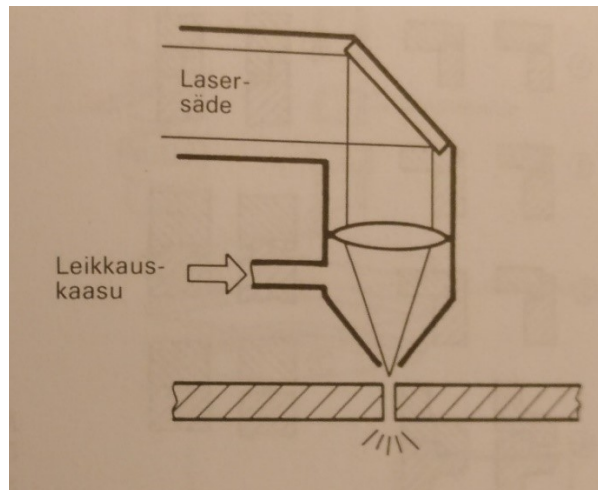
3.2 Kilpailevat leikkausmenetelmät

Kun valitaan osalle sopivaa leikkausmenetelmää, käytetään edullisinta ja tehokkainta mahdollista menetelmää laatuvaatimukset ja toimitusaika ja -varmuus huomioiden. Tietyille materiaalille saattaa soveltua yksi tai kaksi menetelmää, kun taas seostamattomalle teräkselle on useita menetelmiä.

Tässä työssä verrataan vesileikkausta vain poltto- plasma- ja laserleikkaukseen. Jokaisen leikkausmenetelmän toimintaperiaatteesta tehdään lyhyt tarkastelu, minkä jälkeen verrataan prosessien vahvuuksia ja heikkouksia. Koska vertailevat leikkausmenetelmät perustuvat termiseen leikkaukseen, arvioidaan niiden toimivuutta seostamattomalle teräkselle.

3.2.1 Laserleikkaus

Leikkausmenetelmässä laser johdetaan optiseen leikkauspäähän, missä se tarkennetaan (Ihalainen 2003). Kuvassa 7:n nähdään, kuinka laser sekä leikkauskaasu kulkeutuu suutinkappaleeseen.



Kuva 8. Laserleikkauksen periaate (Ihalainen 2003, s. 323).

Esabin (2016) sivuilla todetaan, että laser ei ole kovin nopea prosessi. Syynä on polttoleikkausprosessi, jossa käytetään kohdistetun lasersäteen äärimmäistä kuumuutta esikuumennusliekin sijasta. Varsinainen hitaus johtuu raudan ja hapen välisestä kemiallisesta reaktion nopeudesta. Laserilla kuitenkin saadaan tarkempaa ja ohuempaa leikkausta. Esabin (2016) sivuilla lukee, että railo on kapea ja pystyy sen vuoksi leikkaamaan erittäin täsmällisiä ääriviivoja. Reunan laatu on todella hyvä äärimmäisen pienillä uurteilla ja jättöviivoilla. Reunat ovat erittäin suorakulmaisia ja kuonan määrä on vähäinen tai olematon. Toinen asia, joka on erittäin olematon tai vähäinen, on työkalujen kuluminen. Se johtuu siitä, että leikkaus on kosketonta.

3.2.2 Polttoleikkaus

Polttoleikkaus on vanhin leikkausprosessi, jota voi käyttää seostamattomaan teräkseen. Leikkaavana tekijänä on kuumennus liekki, joka saadaan aikaan polttamalla sopivassa suhteessa sekoitettua happea ja polttokaasua. Kuumennusliekin tehtävänä on polttaa leikattava aine ja kuljettaa hapettuneet reaktiotuotteet pois. (Ihalainen 2003, s. 319)

Polttoleikkausta pidetään yleisesti yksinkertaisena prosessina. Siinä koneet ja kulutusosat ovat edullisia, kun taas vesileikkauksessa ne ovat hintavia. Polttoleikkauspolttimella on mahdollista leikata hyvin paksua levyä, kuten 1200 mm paksuista terästä (Esab 2016). Paksuutta rajoittaa pääasiassa syötettävä hapen määrä. Esabin (2016) sivulla mainitaan, että teräslevyn kuvioleikkauksesta suurin osa töistä suoritetaan 300 mm:n paksuisille levyille. Teräslevy ei vaadi jatkokäsittelyä, mikäli leikkauspoltin on oikein säädetty. Tällöin leikkauspoltin tuottaa tasaisen suorakulmaisen leikkauspinnan. Leikkauks jäljestä jää alareunaan vähän kuonaa ja yläreuna on vain hieman esikuumennusliekkien pyöristämä

Polttoleikkaus sopii levyihin, joiden paksuus on yli 25 mm. Täten se ei sovellu ohuihin teräslevyihin. Leikkausprosessi on hidas, 25 mm:n materiaalissa päästään noin 500 mm minuutissa. Esabin (2016) sivuilla mainitaan, että tuottavuuden moninkertaistaa useamman polttimen käyttö. Vesileikkauksessa useamman leikkauspään käyttö on mahdollista, mutta sitä hankaloittaa pumpun teho ja suuttimen käyttö. Polttoleikkauslaitteistoja löytyy siirrettävinä, kiinteinä ja erityiskohteisiin tarkoitettuina.

3.2.3 Plasmaleikkaus

Plasmaleikkaus on sulatusleikkausmenetelmä, jossa leikkaus tapahtuu suuren kineettisen ja termisen energian omaavan plasmakaasun avulla. Useimmiten argonia käytetään plasmakaasuna. Plasmaleikkaus tapahtuu kineettisen ja termisen energian vaikutuksesta, jotka aikaansaavat 25 000-30 000 °C lämpötilan. Kuumennuksen myötä kaasuseos ionisoituu ja dissosioituu. Kaasu laajenee voimakkaasti kumentuessaan ja virtaa suuttimen läpi erittäin suurella nopeudella. Plasmakaasun kohdatessa kylmän levyn pinnan molekyyliä muodostuu uudelleen ja dissosiointiin kulunut energia vapautuu sulattaen materiaalin paikallisesti. Sula aine puhaltuu pois suurinopeuksisen kaasuvirtauksen myötä. (Ihalainen 2003, s.321-322)

Huonoja puolia plasmaleikkauksessa ovat vaativat työsuojelliset toimenpiteet ja termiset muodonmuutokset, jotka voidaan pienentää vedenalaisella leikkauksella. Kustannukset ovat huomattavasti suuremmat, koska plasmaleikkauslaitteisto tarvitsee jokaista leikkauksipoltinta kohden oman virtalähteesä.

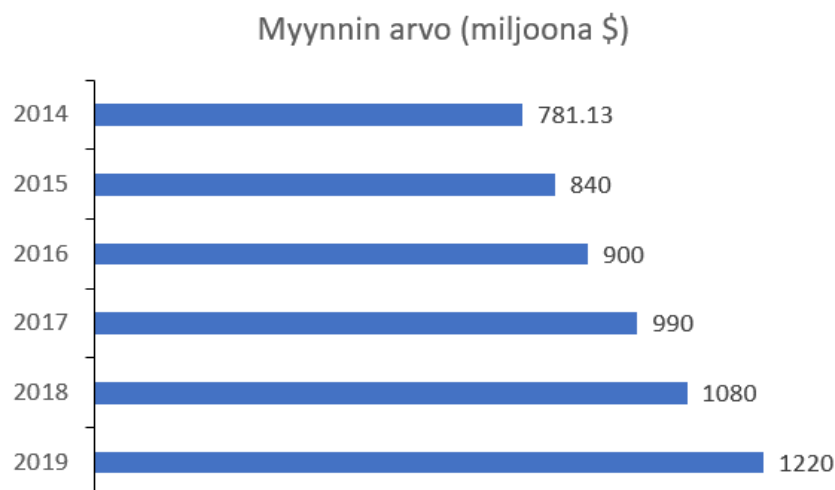
Taulukko 2. Termisten leikkausmenetelmien soveltuvien ainepaksuudet, nopeudet ja tarkkuudet seostamattomalle teräkselle.

	Polttoleikkaus	Plasmaleikkaus	Laserleikkaus
Ainepaksuus (mm)	3 - 250...3200	...30	...25
Tarkkuus (mm)	0,5 -5	0,1 - 0,5	0,05 - 0,1
Leikkausnopeus (mm/min)	60 - 800	1000...10000	500...2000
Leikkausjälki	Tyydyttävä	Kiitettävä	Kiitettävä

Taulukkoon 2 on koottu vielä näiden termisten leikkausmenetelmien ominaisuuksia seostamattomalle teräkselle. Laserleikkaus on lähellä vesileikkausta, sillä ne ovat molemmat tarkkoja ja monipuolisia leikkausten suhteen.

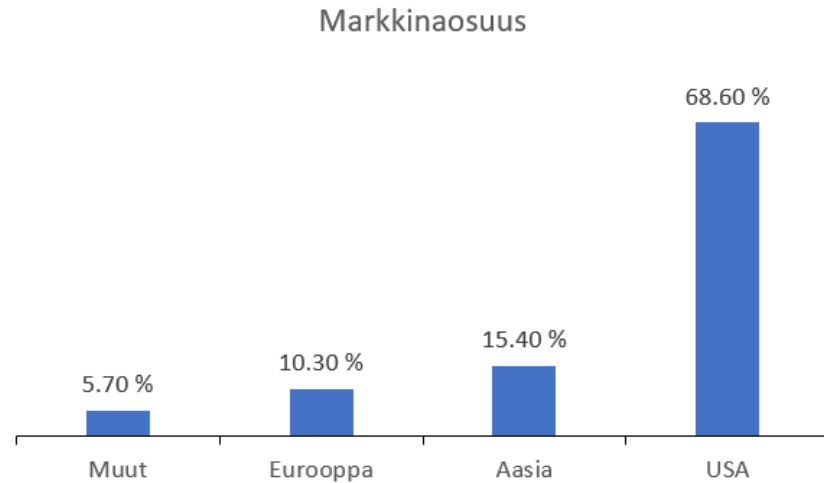
3.3 Markkina ja kustannusvertailu

Erinomaisten hyötyjensä ansiosta vesileikkauskäsittelymenetelmät laajenevat jatkuvasti kaikkialle. Kuvassa 8 on The Global Waterjet Machine Marketin raportti vuosille 2015-2019, joka korostaa vesileikkausteknologian myynnin ennustetta Amerikan markkinoilla. Täten liikevaihto vuodelle 2014 oli 781,16 miljoonaa USD ja kasvua vuodelle 2019 on ennustettu 1221,12 miljoonaa USD. Kuva 8 osoittaa USA:n vesileikkauskoneiden valmistajilla olevan suurin markkinaosuus raportin mukaan. Tärkeimmät teollisuudenalat ovat ilmailuala, autoteollisuus ja kivi- ja malmikaivosteollisuus. (Deaconescu 2016, s.1)



Kuva 9. Vesileikkauskoneiden vuotuinen myynti (Deaconescu 2016)

Kuvassa 9:n huomataan, että USA:lla on suurin markkinaosuus. Kyseisessä raportissa arvioidaan myös, että vuonna 2014 maailmanlaajuisesti otetaan käyttöön 20 000 vesileikkauskonetta, ja kasvu on 5-6 prosenttia vuodessa (Deaconescu 2016, s. 1).



Kuva 10. Vuoden 2016 markkinaosuus suurimmista vesileikkauskoneiden valmistajista (Deaconescu 2016)

Kuten on jo tullut ilmi, vesileikkaaminen on muihin leikkausmenetelmiin verrattuna monipuolisempi ja turvallisempi. Taulukossa 2 näkyvät abrasiivisen vesileikkauksen ja termisten leikkausmenetelmien kustannukset. Leikkausmenetelmien kustannukset per tunti lasketaan kaavalla (Radovanović 2007, s.100):

$$C = C_i + C_o + C_p \quad (2)$$

Missä C (€/h) on leikkausmenetelmän kustannus per tunti, C_i (€/h) on investointi kustannus, C_o (€/h) on operointikustannus ja C_p (€/h) on työvoiman kustannus. Radovanović (2007) on huomoinut investointikustannukseen vain laitteen poistot. Abrasiivisen vesileikkauksen operointikustannus on keskimäärin 20 euroa per tunti (Radovanović 2007, s. 100). Operointikustannus muodostuu kaavasta:

$$C_o = C_e + C_w + C_a + C_r + C_m \quad (3)$$

Missä C_e (€/h) on sähköenergian kustannus, C_w (€/h) on veden kustannus, C_a (€/h) on abrasiivin kustannus, C_r on kulutusosien kustannus ja C_m on huollon kustannus. Tällöin saadaan laskettua 37 kW pumpulle paineella 380 MPa operointikustannukseksi 29,83

€/h ja leikkauskustannukseksi 40,83 €/h (Radovanović 2007, s. 101). Termisten leikkausmenetelmien operointikustannus saadaan kaavalla:

$$C_o = C_e + C_g + C_r + C_m \quad (4)$$

Termi C_g (€/h) on kaasun kustannus. Taulukossa 2 huomataan, että polttoleikkaus on halvin operointikustannuksiltaan ja abrasiivinen vesileikkaus on kallein. Koska investointikustannukset C_i perustuivat koneiden lähtöhintaan, joista tehdään poistoaikataulu, voivat koneiden hinnat vaihdella erittäin paljon laser- ja plasmaleikkauksella sekä abrasiivisella vesileikkauksella (Esab 2016). Kustannuksissa ei ole otettu huomioon vuokra-, vaakuutus- tai muita yleiskustannuksia. Tarkasteltavissa lähteissä ei mainittu tarkemmin koneiden hintaa, vaan tämä oli ilmoitettu suoraan poistokuluna. Kaavalla (2) leikkauskustannus osoittautui kalleimmaksi laserleikkaukselle 52,77 €/h. Abrasiivinen vesileikkaus sijoittui toiseksi parhaaksi ja eroa ykkössijalla olevalle polttoleikkaukselle on noin 2,7-kertainen. Plasmaleikkauksen leikkauskustannus yllätti vajaalla 3 €:n erolla abrasiivisesta vesileikkauksesta.

Taulukko 3. Vesileikkauksen kustannukset 10 mm paksulle hiiliteräkselle ja termisten leikkausmenetelmien kustannukset 10 mm paksulle rakenneteräkselle S355J0 (Radovanović 2007, Harničárová et al. 2012)

Kustannusosat	Plasmaleikkaus	Laserleikkaus	polttoleikkaus	Abrasiivinen vesileikkaus
Kaasun hinta (C_g)	4,08 €/h	7 €/h	3,7 €/h	-
Veden hinta (C_w)	-	-	-	0,10 €/h
Sähkön hinta (C_e)	8,1 €/h	7,5 €/h	-	4,72 €/h
Abrasiivin hinta (C_a)	-	-	-	23,10 €/h
Kulutusosien hinta (C_r)	3,8 €/h	1 €/h	0,25 €/h	0,66 €/h
Huollon hinta (C_m)	3,375 €/h	4,75 €/h	0,625 €/h	1,25 €/h
Työvoima (C_m)	7,46 €/h	8,77 €/h	7,57 €/h	5,00 €/h
koneen käyttö	1600 h	1600 h	1600 h	4000 h
poistojen kustannus (C_i)	16,875 €/h	23,75 €/h	3,125 €/h	6 €/h
Operointikustannus (C_o)	19,355 €/h	20,25 €/h	4,575 €/h	29,83 €/h
leikkauskustannus (C)	43,69 €/h	52,77 €/h	15,27 €/h	40,83 €/h

Abrasiivinen vesileikkaus on kannattavimmillaan 8-60 mm metalleilla. Tällöin saadaan säästöjä jälkikäsitelyssä. Sarjatuotannossa tämä näkyy suurena säästönä (Turun watercut oy 2019). Abrasiivinen vesileikkaus on nyt kustannustehokkain menetelmä leikata terästä (Radovanović 2007, s. 102). Leikkausmenetelmän voi valita seuraavasti (Piironen 2013, s. 20):

- Laserleikkaus: tarkka kaikille ohutlevymateriaaleille.

- Plasmaleikkaus: käytä, jos laserin tarkkuudesta ei ole hyötyä.
- Polttoleikkaus: edullinen ja soveltuva paksummille materiaaleille. Tarkkuus vain kohtuullinen.
- Abrasiivinen vesileikkaus: paksuille materiaaleille ja ei-metallisille materiaaleille. Kun tavoitteena tarkka leikkausjälki ja halutaan välttää jatkotyövaiheet.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

Pääasiassa vesileikkausta käytetään leikkaamisessa ja trimmaamisessa, vaikka abrasii-visella vesileikkauksella pystytään tekemään sorvaamista, jyrsimistä ja poraamista – tämä saattaa muuttua tulevaisuudessa. Yleisin trendi vesileikkauksessa on ollut kehittää pumppua tuottamaan enemmän ja enemmän painetta, koska se lisää leikkausnopeutta ja parantaa tuottavuutta. Ajankohtaisempi trendi on ohjelmoinnin ja operoinnin yksinkertaistaminen tekemällä ohjelmistosta älykkäämmän. Näin saadaan vähennettyä korkeakoulutetun työvoiman kysyntää.

Kulutusosien elinikää voidaan kehittää, kuten leikkauspään sekoituskammion ja suuttimen kestävyyttä. Timanttinen suutin ei edes riitä, kun sellainen joudutaan vaihtamaan jo muutaman sadan tunnin jälkeen. Tällaisesta ongelmasta, kun päästäisiin eroon, säästettäisiin aikaa ja päänvaivaa laitteen huollosta. Tutkimusta voitaisiin kohdistaa abrasii-visiin aineisiin, sillä niissä on vaikutusta leikkausjälkeen ja tehokkuuteen. Ideana olisi myös löytää edullinen abrasiivihiekka, koska abrasiivihiekka on yli puolet operointikustannuksista. Mielenkiintoinen tutkimus olisi tehdä muiden nesteiden vaikutuksesta tuottavuuteen, koska tiheys tuo lisää energiaa leikkaukseen.

Tulevaisuuden laitteet kuitenkin näyttävät vaativan vähemmän käyttäjien huomiota, jolloin käyttäjät voivat keskittyä sovelluksiinsa ja lopputuotteeseensa. Jatkuva laitteisto- ja ohjelmistokehitys sekä etävalvonta tekevät tästä mahdollista.

LÄHTEET

ABB, 2000. Off-line programming increases waterjet cutting productivity. *Industrial Robot*, **27**(5).

A comparison of original patent drawings from the 1930s and a modern abrasive nozzle cut in half, showing the evolution of the design. Wikimedia Commons, 2012. Saatavissa (viitattu 19.5.2019): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolution_of_the_Abrasive_Waterjet_Nozzle.jpg

Bachman, K. 2017. What's trending in waterjet technology? Saatavissa (viitattu 31.07.2019): <https://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/what-s-trending-in-waterjet-technology->

Deaconescu, T. 2016. Robust Design Based Optimisation of Waterjet Cutting. **70**, pp. 1–6.

Esab, 2016. Mikä on teräslevyn paras leikkausmenetelmä, verkkosivu. (viitattu 11.7.2019): <https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/what-is-the-best-way-to-cut-steel-plate.cfm>

Gent, M. Menéndez, M. Torno, S. Toraño, J. and Schenk, A. 2012. “Experimental evaluation of the physical properties required of abrasives for optimizing waterjet cutting of ductile material”, *Wear*, vol. 284-285, pp. 43-51.

Hanson, K. 2013. “Water down”, *FtrIssueGroup*, vol 6, issue 3. Saatavissa (viitattu 05.07.2019): http://www.microwaterjet.se/sites/default/files/download/Water%20down%20-Micro%20Manufacturing%20May_June%202013.pdf

Hashish, M. 2013. Waterjet Machining Process. In: A. NEE, ed, *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. London: Springer London, pp. 1–30.

Harničárová, M. Valiček, J. Zajac, J. Hloch, S. Čep, R. Džubáková, I. Tofil, S. Hlaváček, P. Klich, J. Čepová, L. 2012. “Techno-economical comparison of cutting material by laser, plasma and oxygen”, *Technical gazette*. vol. 19, no. 4, pp. 813-817.

- Ihalainen, E. 2003. Valmistustekniikka. 10. muuttum. p. Helsinki: Otatieto.
- Koenig, B. 2018. "Waterjet Makers Move to Increase Uptime of Machines", *Manufacturing Engineering*, vol. 161, no. 4, pp. 74.
- Krajcarz, D. 2014. Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting, *Procedia Engineering*, vol. 69, pp. 838-843.
- Laserle Oy, Vesileikkaus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.6.2019): <https://www.laserle.fi/vesileikkaus/>
- Lorincz, J. 2009. Waterjet Evolving Macro to Micro. *Manufacturing Engineering*, vol. 143, pp. 47-53.
- Piironen, T. 2013-last update, Teräsrakenteiden suunnitteluohjeita parempaan valmistettavuuteen. Onnistuneen suunnittelun periaatteita – DFMA. Hitsaavan teollisuuden hankintatoimen ja toimitusketjun tehostaminen – HitNet Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja D4/2/2013 Saatavissa (viitattu 29.03.2019): <http://portal.savonia.fi/pdf/julkaisutoiminta/2013-hitnet-suunnittelijanopas.pdf>
- Radovanović, M. 2007. Abrasive waterjet cutting cost. pp. 97-102. Saatavissa (viitattu 29.09.2019): https://www.researchgate.net/publication/264892392_ABRASIVE_WATERJET_CUTTING_COST
- Rooks, B. 2001. The softly-softly approach of robotic waterjet cutting. *Industrial Robot*, **28**(1), pp. 40–45.
- SFS-EN ISO 4287. 1999. Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: profile method. Terms, definitions and surface texture parameters, pp. 33
- Sitek, L. and Martinec, P. 2016. Abrasives and Possibilities of Increase in Efficiency of Abrasive Waterjets. *MM Science Journal*, pp. 877–881.
- Tangwarodomnukun, Koomsap and Chowdhary, 2010. A Preliminary Study of Applying Waterjet for Rapid Prototyping, pp. 1–6.
- Techni Waterjet, WATER JET PUMPS, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.08.2019): <https://www.techniwaterjet.com/pumps/>
- Turun Watercut Oy, Vesileikkaus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.6.2019): <http://www.watercut.fi/vesileikkaus.html>

Van Ut, N., Koomsap, P. and Tangwarodomnukun, V. 2009. Simplifying Abrasive Waterjet Cutting Process for Rapid Manufacturing, S. CHOU, A. TRAPPEY, J. POKOJSKI and S. SMITH, eds. In: *Global Perspective for Competitive Enterprise, Economy and Ecology* 2009, Springer London, pp. 53–60.

Waterjets.org 2015. Overview of waterjets.org, Saatavissa (viitattu 29.03.2019): <https://waterjets.org/archive/about-waterjets/overview-of-waterjets/future-of-the-industry/>

WATERjet AG. Saatavissa (viitattu 4.8.2019): <http://www.microwaterjet.se/en#development>

Waurzyniak, P. 2016. "Fast, Clean Cutting with Abrasive Waterjet Technology", *Manufacturing Engineering*, vol. 157, no. 5, pp. 41-42,44-46,48-49.