LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Visa-Valtteri Monto

SCHLIEREN-KUVAUKSEN HYÖDYNTÄMINEN MAG-HITSAUSPOLTTIMEN RAKENTEEN KEHITTÄMISESSÄ

Työn tarkastajat: Professori Tommi Jokinen
IWE, IWI-C, DI Jyri Uusitalo

Työn ohjaajat: Professori Jukka Martikainen
IWE, IWI-C, DI Jyri Uusitalo

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Visa-Valtteri Monto

Schlieren-kuvauksen hyödyntäminen MAG-hitsauspolttimen rakenteen kehittämisessä

Diplomityö

2017

97 sivua, 50 kuvaa, 3 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastaja: Professori Tommi Jokinen
IWE, IWI-C, DI Jyri Uusitalo

Hakusanat: MIG/MAG-hitsaus, hitsauspistooli, hitsauspoltin, GMAW, schlieren-kuvaus, suojakaasu, hitsausvirhe, hitsin laatu

Kaasusuojauksen häiriöt aiheuttavat hitsausvirheitä, kuten huokosia, hitsiaineen ja hitsin muutosvyöhykkeen haurastumista, roiskeita ja hitsin pinnanlaadun heikkenemistä. Kaasusuojauksen häiriöt mahdollistavat ilman pääsyn kosketuksiin sulan metallin kanssa ja muodostamaan haitallisia oksideja ja nitridejä hitsiin. Kaasusuojauksen häiriöt voivat johtua monesta tekijästä, esimerkiksi vioittuneesta kaasulinjasta, roiskeiden likaamasta kaasusuuttimesta tai liian suureksi säädetystä kaasun tilavuusvirrasta. Myös pistoolin kaasukanavien muotoilulla on suuri vaikutus kaasusuojan laatuun. Kuten likaantunut kaasusuutin ja liian suuri kaasun tilavuusvirta, myös epäoptimaalisesti muotoillut pistoolin kaasukanavat aiheuttavat pyörteitä kaasuvirtaukseen. Pyörteet taas mahdollistavat huoneilman imeytymisen kaasuvirtaukseen.

Tässä työssä tutkittiin MAG-hitsauspistoolin kaasuvirtausta schlieren-kuvauksen avulla. Schlieren-kuvauksen avulla paljaalle silmälle näkymättömän suojakaasuvirtauksen käyttäytyminen voidaan nähdä, jolloin hitsauspistoolin kaasukanavien muodot voidaan optimoida pyörteettömän kaasuvirtauksen mahdollistamiseksi. Työssä verrataan erilaisien kaasuholkkimallien ja diffuusorimallien vaikutusta kaasuvirtaukseen ja hitsin laatuun.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Visa-Valtteri Monto

Utilization of Schlieren-imaging in GMAW-torch Development

Master's thesis

2017

97 pages, 50 figures, 3 tables and 5 appendices

Examiner: Professor Tommi Jokinen
IWE, IWI-C, M.Sc. (Tech.) Jyri Uusitalo

Keywords: MIG/MAG-welding, Welding Torch, GMAW, Schlieren-imaging, Shielding Gas, Welding Defect, Weld Quality

Disturbances in shielding gas flow causes numerous welding defects, for example porous welds, brittleness in the weld metal and parent metal heat affected zone, spatter and rough weld bead surface. Disturbances in the gas flow enable air to get in contact with molten weld metal, which causes ambient air's oxygen and nitrogen to form harmful oxides and nitrides in the weld. The disturbances in shielding gas flow are derived from numerous factors, for example faulty gas line, dirty gas nozzle or too high shielding gas flow rate. The welding torch gas channel design also plays a major role in gas shielding quality. Such as a dirty gas nozzle and too high flow rate, also sub-optimal welding torch gas channel design cause turbulence and eddies in the gas flow. Turbulence and eddies enable air to be absorbed in the gas flow.

In this master's thesis, the gas flow of a GMAW-torch was examined with schlieren-imaging. Schlieren-imaging makes possible to see the behavior of gas flows otherwise invisible to naked eye, so that it is possible to optimize the welding torch gas channel design to enable laminar gas flow. This master's thesis compares the effect of different gas nozzle models and gas diffuser models to the gas flow and weld quality.

ALKUSANAT

Melko massiiviseksi kasvanut diplomityöurakka on saatu vietyä mutkien kautta vihdoin maaliin. On ollut hienoa päästä työskentelemään mielenkiintoisen aiheen parissa. Työskenteleminen verrattain vähän tutkitun sovelluksen ja mielekkään hitsaustekniikan tuotekehitystyön parissa antoi mukavasti virtaa ja intoa diplomityön tekemiseen. Schlieren-kuvausta on käytetty virtausten tutkimisessa energiatekniikan ja ilmailun aloilla, mutta tämä monipuolinen työkalu soveltuu saumattomasti myös hitsaustekniikan tutkimukseen.

Haluan kiittää työn ohjaajia Jukka Martikaista ja Jyri Uusitaloa tuesta ja työn suuntaviivojen piirtämisestä. Hyvä ohjaus on arvokasta ryhdyttäessä työskentelemään itselle tuntemattoman aiheen parissa. Kiitän myös Kemppi Oy:n Welding Technology -osaston Tapani Dahlströmiä, Antti Kahria, Esa Kunnasta, Mika Kunnasta, Marko Rantasta, Lauri Taimistoa ja Ismo Vartiaista korvaamattomasta avusta käytännön asioissa. Welding Technology -osaston hyvä yhteishenki tarttui myös diplomityöntekijään. Kiitokset kuuluvat myös vanhemmilleni Ismolle ja Pirjolle. Vanhempani tukivat ja kannustivat minua läpi yliopistotaipaleen.

Aina kaukaiselta tuntunut diplomi-insinööriksi valmistuminen ja opintojen päättyminen ovat nyt todellisuutta. Vaikka opinnot päättyvät, uuden oppiminen jatkuu.

Vantaalla 11.9.2017

Visa-Valtteri Monto

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
ALKUSANAT
SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO 8
1.1 Työn tausta 8
1.2 Työn tavoite ja rajaus 8
1.3 Työn toteutus 9
1.4 Yritysesittely 9
2 SUOJAKAASUT MIG- JA MAG-HITSAUKSESSA 11
2.1 Suojakaasutyypit 11
2.1.1 Aktiiviset suojakaasut ja suojakaasuseokset 12
2.1.2 Inertit suojakaasut ja suojakaasuseokset 13
2.1.3 Suojakaasun vaikutus hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin 14
2.1.4 Typpimonoksidi 15
2.2 Suojakaasun virtausnopeus 16
2.3 Kaasusuojauksen häiriöiden aiheuttamat hitsausvirheet 18
2.4 Kaasusuojauksen häiriöt 20
2.5 Suojakaasun vaikutus hitsauskustannuksiin ja tuottavuuteen 22
3 MIG/MAG-HITSAUSPISTOOLIN RAKENNE 28
3.1 Hitsauspolttimen pääosat 28
3.2 Hitsauspistoolin kaasuvirtaukseen vaikuttavat tekijät 31
4 SCHLIEREN-KUVAUS 35
4.1 Kuvauslaitteistot ja toimintaperiaate 35

4.2 Schlieren-kuvauksen ja shadowgraph-kuvauksen käyttökohteet 38
4.3 Shadowgraph-kuvaus 42
4.4 Particle Image Velocimetry 43
5 TUTKIMUSOSUUS 46
5.1 Tutkimussuunnitelma 46
5.2 Tutkimuslaitteisto ja materiaalit 47
5.3 Tutkittavat hitsauspoltinmallit 47
5.4 Koesarja 1 60
5.5 Koesarja 2 62
5.6 Koesarja 3 64
5.7 Koesarja 4: Hitsauskokeet 68
6 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI 72
6.1 Koesarja 1 72
6.2 Koesarja 2 78
6.3 Koesarja 3 79
6.4 Koesarja 4: Hitsauskokeet 85
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSAIHEET 91
8 YHTEENVETO 93
LÄHTEET 94
LIITTEET
Liite I: Hitsauslangan ainestodistus.
Liite II: Koesarjan 1 kuvasarjat.
Liite III: Koesarjan 2 kuvasarjat.
Liite IV: Koesarjan 3 kuvasarjat.
Liite V: Valokuvat koesarjan 4 koekappaleista.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

H_{Su}	Suojakaasun hinta (€/m^3)
K	Suojakaasun ominaiskulutus (m^3/hitsauslanka-kg)
K_{Su}	Suojakaasukustannus (€)
M	Hitsiainemäärä (kg)
N	Hyötyluku (%)
T	Hitsiaineentuotto (kg/h)
V	Suojakaasun virtausnopeus (l/min)

HAZ	Heat Affected Zone, hitsin muutosvyöhyke
MAG	Metal Active Gas Welding, metallikaasukaarihitsaus aktiivisella suojakaasulla
MIG	Metal Inert Gas Welding, metallikaasukaarihitsaus inertillä suojakaasulla
PIV	Particle Image Velocimetry
TIG	Tungsten Inert Gas Welding, volframi-inerttikaasukaarihitsaus

1 JOHDANTO

MIG-hitsauksessa (Metal Inert Gas Welding, metallikaasukaarihitsaus inertillä suojakaasulla) ja MAG-hitsauksessa (Metal Active Gas Welding, metallikaasukaarihitsaus aktiivisella suojakaasulla) kaasusuojauksen kattavuuden ja tiiviyden tärkeys korostuu hitsattaessa alumiinia ja ruostumatonta terästä. Sekä sula alumiini, että sula ruostumaton teräs reagoivat herkästi ilman hapen ja typen kanssa aiheuttaen monia hitsin ulkonäön ja kestävyyden kannalta haitallisia hitsausvirheitä. Sula metalli muun muassa muodostaa ilman typen ja hapen kanssa nitridejä ja oksideja, jotka aiheuttavat hitsin murtolujuuden alenemisen. Ilman päästessä kosketuksiin sulan kanssa syntyy myös hitsin pilaavia kaasukuplia, eli huokosia.

1.1 Työn tausta

Häiriöt kaasusuojauksessa voivat johtua kaasuvirtauksen pyörteilystä kaasun tullessa ulos hitsauspistoolin kaasusuuttimesta, jolloin ilmaa pääsee imeytymään mukaan hitsaustapahtumaan. Pyörteily voi johtua esimerkiksi hitsausroiskeiden likaamasta kaasusuuttimesta tai liian suureksi asetetusta suojakaasun tilavuusvirrasta. Ennen kaikkea hitsauspistoolin kaasukanavien ja kaasusuuttimen muodoilla on vaikutusta hitsauspistoolin kykyyn luoda tiivis ja tasaisesti virtaava kaasusuoja.

Schlieren-kuvauslaitteistolla on mahdollista nähdä paljaalle silmälle näkymättömät kaasuvirtaukset. Kuvauksessa hyödynnetään esimerkiksi aineiden erilaisten kemiallisten koostumusten tai tiheys- ja lämpötilaerojen aiheuttamia taitekerroineroja. Tässä tutkimuksessa selvitetään schlieren-kuvauksen käyttökelpoisuutta MIG/MAG-hitsauspolttimen kaasusuojan tutkimuksessa ja selvitetään, voiko schlieren-kuvasta tulkita onko kaasusuoja hyvä ja kattava vai vajavainen ja näkyykö schlieren-kuvauksella todettu kaasusuojan laatu myös hitsin laadussa.

1.2 Työn tavoite ja rajaus

Työn tavoitteena on tutkia schlieren-kuvauksen soveltuvuutta MIG- ja MAG-hitsauspistoolin suojakaasuvirtauksen kuvaamiseen ilman hitsausvalokaarta ja hitsausvalokaaren palaessa ja vertailla eri kaasuholkkimallien ja diffuusorimallien

vaikutusta kaasun virtaukseen ja hitsin suojaukseen. Työn teoriaosassa perehdytään erilaisten suojakaasujen ominaisuuksiin ja käyttötarkoituksiin, schlieren-kuvauslaitteiston rakenteeseen, sovelluksiin ja schlieren-kuvauksen kaltaisiin menetelmiin. Teoriaosassa myös käsitellään MIG/MAG-hitsauspistoolin rakennetta, sekä vajaan kaasusuojauksen aiheuttamia hitsausvirheitä. Työn tutkimusosassa tarkastellaan schlieren-laitteistolla suojakaasun virtausta ilman hitsausvalokaarta sekä hitsauksen aikana eri valmistajien hitsauspolttimissa ja vertaillaan erilaisten kaasuholkkien ja diffuusorimallien vaikutusta suojakaasun virtaukseen kolmella erilaisella poltinmallilla. Tutkimusosassa tehdään myös hitsauskokeet, jolloin voidaan tutkia, voidaanko schlieren-kuvauksella havaita hitsiin vaikuttavia kaasusuojan häiriöitä.

Työ on rajattu käsittelemään erilaisten kaasusuutin- ja diffuusorimallien vaikutusta suojakaasuvirtaukseen, sekä schlieren-kuvausta erilaisine sovelluksineen ja variaatioineen, joista perehdytään tarkimmin Z-tyypin schlieren-laitteistoon. Käytännön kokeet suoritetaan Z-tyypin schlieren-kuvauslaitteistolla. Kokeissa käytetään pulssi-MAG-hitsausprosessia ja perusaineena ruostumatonta terästä.

1.3 Työn toteutus

Työn teoriaosa on toteutettu kirjallisuustutkimuksena, jonka lähteinä on käytetty hitsaustekniikan alan oppikirjoja, artikkeleita ja oppaita. Työn tutkimusosan hitsauskokeet ja kuvaukset tehtiin Kemppi Oy:n hitsauslaboratoriossa Lahdessa.

1.4 Yritysesittely

Kemppi Oy on suomalainen hitsauskoneita, ohjelmistotuotteita ja asiantuntijapalveluita tuottava perheyritys, joka perustettiin 23.5.1949 Lahdessa nimellä Veljekset Kemppi Oy (Kemppi a). Kemppi Oy:ssä työskentelee yli 600 työntekijää 16:ssa eri maassa sijaitsevissa toimipisteissä ja yrityksen liikevaihto oli vuonna 2013 yli 111 miljoonaa euroa, josta 90 % saavutettiin vientituotteilla. Kemppi Oy toimittaa tuotteitaan säännöllisesti yli 70:een maahan. Kemppi Oy:n pääkonttori ja tuotantolaitos sijaitsee Lahdessa, muut tuotantolaitokset sijaitsevat Asikkalassa ja Intian Chennaissa. (Kemppi b).

Vuonna 1949 Martti Kemppi perusti Veljekset Kemppi Oy:n, joka valmisti muun muassa hitsausmuuntajia, betonikärryjä, maitokärryjä ja saunankiukaita. 50-luvulla Veljekset

Kemppi Oy aloitti ensimmäisen hitsaustasasuuntaajansa kehittämisen ja yhtiön ensimmäiset vientikaupat tehtiin Turkkiin, Thaimaahaan, Nigeriaan, Peruun, Chileen ja Singaporeen. Veljekset Kemppi Oy:n nimi lyhennettiin Kemppi Oy:ksi vuonna 1968. (Kemppi c).

70-80-luvuilla Kemppi Oy:n suuria virstanpylväitä ovat olleet vuonna 1977 julkistettu maailman ensimmäinen invertteritekniikkaa hyödyntävä hitsauskone ja yritysjohdon sukupolvenvaihdos. 80-luvulla Jouko Kemppi valittiin toimitusjohtajaksi, Martti Kemppi jatkoi hallituksen puheenjohtajana, Hannu Kempistä tuli rahoitusjohtaja ja Eija Vartiaisesta henkilöstöosaston johtaja. 1990-luvulla Kemppi Oy:lle myönnettiin maailman ensimmäisenä hitsausalan yrityksenä ISO 9001-laatusertifikaatti. Vuonna 1993 Kemppi siirtyi maailman ensimmäisenä hitsauslaitevalmistajana analogisesta tekniikasta digitaaliseen hitsaustekniikkaan. (Kemppi c).

Kempin perheen kolmas sukupolvi astui yrityksen johtoon keväällä 2014, kun Teresa Kemppi-Vasama valittiin Kemppi Oy:n hallituksen puheenjohtajaksi ja Antti Kemppi Kemppi Group Oy:n hallituksen puheenjohtajaksi. Vuonna 2014 Kemppi Oy lanseerasi myös maailman kehittyneimmän hitsauskoneen, FastMig X:n. (Kemppi c).

2 SUOJAKAASUT MIG- JA MAG-HITSAUKSESSA

Suojakaasun päätehtävä MIG- ja MAG-hitsauksessa on suojata hitsisulaa ympäröivän ilman hapelta, typeltä ja kosteudelta, sekä mahdollistaa hitsausvalokaaren vakaa ja tasainen palaminen. Suojakaasu myös jäähdyttää hitsauspistoolin osia ja johtaa hitsausvalokaaren lämpöä työkappaleeseen. Suojakaasun tyypillä on vaikutusta hitsauksen roiskeisuuteen, hitsausnopeuteen, tunkeumaan, hitsausparametrien säätämisen helppouteen, hitsin lujuuteen vaikuttaviin seosaineiden palamishäviöihin, korroosionkesto-ominaisuuksiin, sekä oksidien muodostumiseen hitsipalon pintaan. Riittämätön kaasusuojaus saa hitsausvalokaaren palamaan epävakaasti, sekä altistaa hitsisulan ilman hapen aiheuttamalle hapettumiselle ja ilman kosteuden ja typen aiheuttamalle huokoisuudelle. Käytettävän suojakaasun tyyppi valitaan hitsattavan perusaineen ja halutun tunkeumakuvion ja kaarityypin mukaan. (AGA 2013a, s. 4; AGA 2014, s. 11.)

2.1 Suojakaasutyypit

MIG-hitsaus (Metal Inert Gas Welding, metallikaasukaarihitsaus inertillä suojakaasulla) on ei-rautametallisten materiaalien hitsausprosessi. Nimensä mukaisesti MIG-hitsauksessa käytetään inerttiä, eli reagoimatonta suojakaasua, kuten argonia, heliumia, tai näiden seosta. Vastaavasti MAG-hitsaus (Metal Active Gas Welding, metallikaasukaarihitsaus aktiivisella suojakaasulla) on hitsausta aktiivisella, hitsaustapahtumassa reagoivalla suojakaasulla. MAG-hitsaus on terästen hitsaukseen tarkoitettu hitsausprosessi, jonka suojakaasuna käytetään argonin ja hapen, argonin ja hiilidioksidin, argonin, hapen ja hiilidioksidin seosta, tai puhdasta hiilidioksidia. (Lukkari 2002a, s. 159.)

Usein suojakaasujen pääkomponenttina käytetään inerttiä argonia. Argon ei reagoi hitsiaineen kanssa ja siksi sitä käytetäänkin pääkomponenttina sekä MIG- että MAG-hitsauskaasuissa. Puhdasta argonia käytetään MIG -hitsauksessa, mutta hitsattaessa teräksiä puhtaalla argonsuojakaasulla, hitsausvalokaari on epävakaa ja sen kohdistaminen on vaikeaa. (AGA, 2013a, s. 4; Lepola & Ylikangas 2016, s. 78-80.)

2.1.1 Aktiiviset suojakaasut ja suojakaasuseokset

Terästen hitsauksessa käytetään seoskaasua, jossa on argonin lisäksi hapettavaa hiilidioksidia tai happea. Ilman suojakaasun hapettavaa komponenttia hitsausvalokaari vaeltaa sulan pinnalla olevista oksidipisteistä toiseen, jotka vapauttavat elektroneja helpoimmin. Hitsausvalokaaren vaeltaminen voi häiritä kaasusuojausta ja mahdollistaa ilman pääsyn kosketuksiin sulan kanssa. Suojakaasun hapettava komponentti muodostaa sulan pinnalle tasaisen oksidikerroksen, jolloin elektroneja vapautuu tasaisesti sulan pinnalta ja hitsausvalokaari on vakaa. Ilman suojakaasun hapettavaa komponenttia myös alttius muodostaa reunahaavaa hitsiin on suurempi. (AGA 2013a, s. 5; Lepola & Ylikangas 2016, s. 80; AWS 2004, s. 177.)

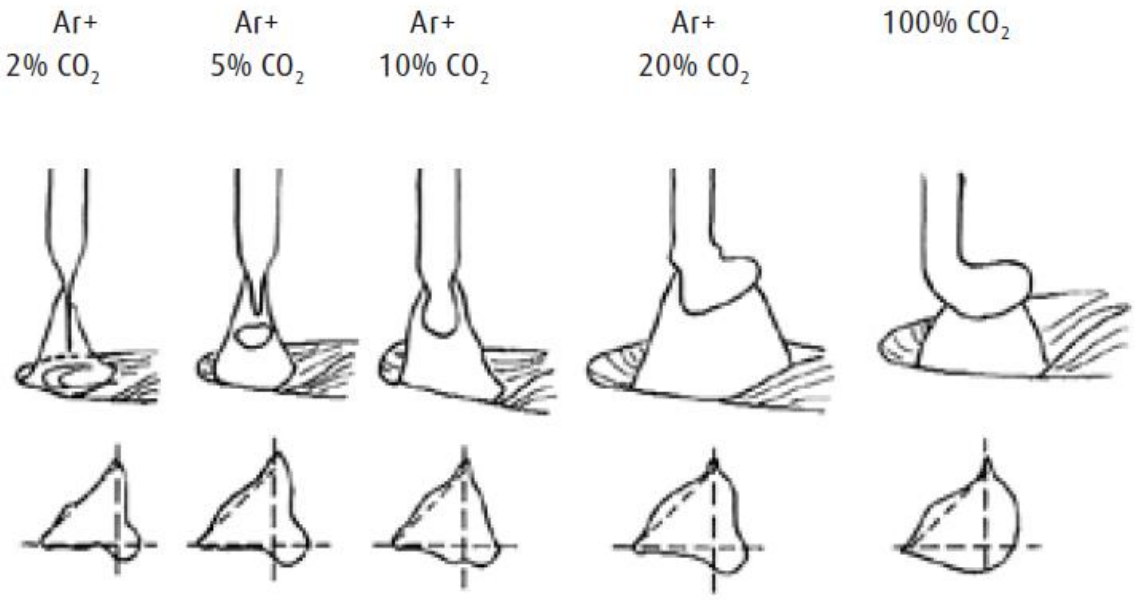
MAG-hitsauksessa suojakaasun aktiivisena komponenttina käytetään happea tai hiilidioksidia. AGAn (2013a, s. 5) mukaan näistä kahdesta hiilidioksidi on edullisempi vaihtoehto sen hitsin geometriaan ja ulkonäköön edullisesti vaikuttavien ominaisuuksiensa vuoksi. Hiilidioksidi on happea vähemmän hapettavaa, jolloin hitsin hapettuminen on vähäisempää ja saavutetaan parempi hitsin ulkonäkö.

Hiilidioksidi aiheuttaa hitsauksessa leveämmän ja syvemmän tunkeumakuvion, mikä johtuu suuremmasta kaaripaineesta, kaarijännitteestä ja suuremmasta hitsausenergiasta. Hiilidioksidin tarjoama kaasusuojaus on hyvin tiivis hiilidioksidin hajoamisen vuoksi. Hiilidioksidi hajoaa hitsausvalokaaren kuumuudessa hiilimonoksidiksi ja hapeksi, jolloin kaasu laajenee ja syrjäyttää ilmaa tehokkaammin hitsausvalokaaren ympäriltä. Hiilimonoksidi ja happi yhdistyvät takaisin hiilidioksidiksi työkappaleen ja sulan pinnan läheisyydessä matalammassa lämpötilassa. Hiilidioksidin uudelleenyhdistyminen on eksoterminen, eli lämpöä vapauttava reaktio. Reaktiossa vapautunut lisälämpö nostaa hitsisulan lämpötilaa ja leventää tunkeumaa. Tämän ansiosta kaasujen poistuminen hitsisulasta on tehokkaampaa, jolloin huokosten muodostuminen vähenee. Teräksen hitsauksessa hiilidioksidia sisältävä seoskaasu onkin happiseosta parempi kaasusuojauksen tiiviyden kannalta, mutta toisaalta hiilidioksidi lisää hitsauksen roiskeisuutta, pintakuonan määrää, sekä hitsaussavun määrää. (AGA 2013a, s. 5; Lukkari 2002a, s. 201.)

Hiilidioksidia käytetään argonin seoskaasuna, mutta myös puhdasta hiilidioksidia voidaan käyttää suojakaasuna. Puhtaalla hiilidioksidilla hitsaus on roiskeisempaa, eikä hitsauksen

aineensiirtymisessä päästä kuumakaarialueelle, eli suihkumaiseen aineensiirtymiseen edes hitsattaessa suurella teholla. Kun hiilidioksidin määrä argon-hiilidioksidiseoskaasussa ylittää 30 %, ei kuumakaarialuetta enää saavuteta ja aineensiirtyminen alkaa muistuttaa hitsausta puhtaalla hiilidioksidilla. Puhdasta hiilidioksidia suosittiin ennen suojakaasuna sen argonseoksia merkittävästi matalamman hinnan vuoksi. Yleisimmin Suomessa käytetään 5–25 % hiilidioksidia sisältäviä argon-hiilidioksidiseoskaasuja. (AGA 2013b, s. 20; Lukkari 2002a, s. 199-202.)

Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva suojakaasun hiilidioksidin määrän vaikutuksesta aineensiirtymiseen ja tunkeumaan. Hiilidioksidin osuuden kasvaessa lisäainelangan päästä hitsisulaan siirtyvien pisaroiden koko kasvaa. Hiilidioksidin osuuden kasvu myös leventää tunkeumaa ja hitsipalkoa.



Kuva 1. Hiilidioksidin määrän vaikutus aineensiirtymiseen ja tunkeumaan (AGA 2013a, s. 5).

2.1.2 Inertit suojakaasut ja suojakaasuseokset

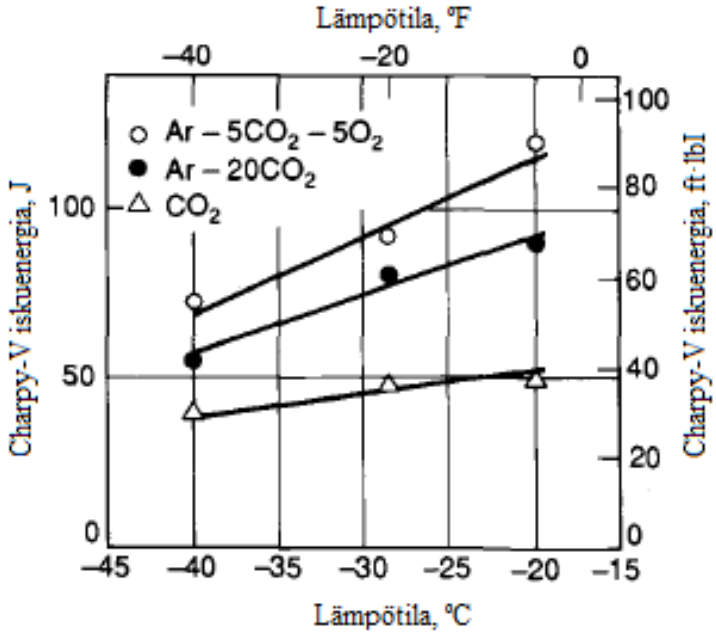
Helium on argonin tavoin inertti kaasu, jota käytetään hitsauksen suojakaasuna joko sellaisenaan tai argonin kanssa seoskaasuna. Tyypillinen argon-helium-kaasuseoksen heliumpitoisuus on 20–40 %. Heliumia käytetään myös argonin ja aktiivisen

kaasukomponentin kanssa ruostumattomien terästen hitsaukseen tarkoitettujen suojakaasujen komponenttina. Heliumilla on argoniin verrattuna suurempi ionisoitumispotentiaali ja lämmönjohtavuus, jotka mahdollistavat suuremman hitsausenergian ja leveämmän tunkeuman verrattuna argoniin. Helium mahdollistaa suuremman kaarijännitteen käytön, mikä johtaa suurempaan hitsausenergiaan. Suuremman hitsausenergian vuoksi argon-heliumseoksia käytetäänkin kuparin ja paksujen alumiinikappaleiden MIG-hitsauksessa. Suurempi hitsausenergia mahdollistaa myös hitsausnopeuden kasvattamisen, josta on erityisesti hyötyä mekanisoidussa ja automatisoidussa hitsauksessa. Toisaalta suurempi hitsausenergia aiheuttaa myös suuremman lämmöntuonnin hitsiin, mikä on otettava huomioon hitsattaessa muun muassa ohuita ainevahvuuksia. Argon-heliumseoksia tai puhdasta heliumia voidaan käyttää myös juurensuojakaasuna silloin, kun juurikaasu halutaan nousemaan ylöspäin suojauksen aikaansaamiseksi. (AGA 2013a, s. 5-6; Lukkari 2002a, s. 203; Outokumpu 2010, s. 41.)

2.1.3 Suojakaasun vaikutus hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin

Suojakaasu vaikuttaa hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin. Hitsattaessa inertillä suojakaasulla vaikutukset ovat epäsuorempia verrattuna aktiivisella suojakaasulla hitsaukseen. Inertin suojakaasun tai suojakaasuseoksen ominaisuudet vaikuttavat hitsin tunkeumaan ja hitsiaineen jähmettymiseen, joilla taas on vaikutusta hitsin mikrorakenteeseen jäähtymisnopeuden kautta. Aktiivisen suojakaasun hapettava komponentti vaikuttaa hitsin ominaisuuksiin suoremmin. Suojakaasun hapetuspotentiaali vaikuttaa hitsin pintakuonan määrään, savunmuodostukseen, hitsisulan juoksevuuteen, sekä hitsiaineen lujuuteen ja sitkeyteen. Suojakaasun hapetuspotentiaali vaikuttaa hiilen, mangaanin ja piin häviöihin hitsiaineessa. Hapetuspotentiaalin kasvaessa hitsiaineen lujuus ja iskusitkeys laskevat. Kuitenkin liian matala hapetuspotentiaali alentaa hitsin lujuutta ja sitkeyttä, joten hapetuspotentiaalille on olemassa optimaalinen taso. (Lyttle 1993, s. 68.)

Kuvassa 2 on esitetty suojakaasun hapetuspotentiaalin vaikutus hitsiaineen iskusitkeyteen. Suojakaasun hapetuspotentiaalin kasvaessa hitsin iskusitkeys pienenee.



Kuva 2. Hitsiaineen iskusitkeys ja testilämpötila suojakaasun hapetuspotentiaalin funktiona (Lyttle 1993, s. 68).

2.1.4 Typpimonoksidi

AGAn MISON-suojakaasuihin lisätään typpimonoksidia vähentämään hitsauksessa syntyvän myrkyllisen otsonin määrää. MISON-kaasuissa typpimonoksidia on 0,03 %. Typpimonoksidi myös vakauttaa hitsausvalokaarta otsonin vähentämisen lisäksi ruostumattomien terästen ja alumiinien MIG-hitsauksessa ja kaarijuotossa. Suojakaasuun lisätty typpimonoksidi reagoi otsonin kanssa muodostaen happea ja typpidioksidia. (AGA 2013a, s. 6-8; Lukkari 2002a, s. 202.)

Typpimonoksidin suojakaasun lisäämisen hyöty otsonia hajottavana aineena on kuitenkin hieman kyseenalainen, sillä sekä typpimonoksidi että otsonin ja typpimonoksidin reaktiotuote typpidioksidi ovat otsonin tavoin myrkyllisiä kaasuja, joita syntyy hitsauksen aikana hitsausvalokaaressa. Koska otsonia syntyy ultraviolettisäteilyn vaikutuksesta, on mahdollista vähentää syntyvän otsonin määrää muuttamalla hitsaustapahtuman tuottaman säteilyn koostumusta käyttämällä erilaista suojakaasua. Typpi suojakaasussa lisää muodostuvan otsonin määrää, mutta lisäämällä myös heliumia kaasuseokseen, saadaan otsonin määrä hengitysilmassa putoamaan merkittävästi. (Aspberg 2014, s. 4-5.) Woikosken hitsaussuojakaasuihin ei ole lisätty typpimonoksidia kuten AGAn kaasuihin (Woikoski 2015).

2.2 Suojakaasun virtausnopeus

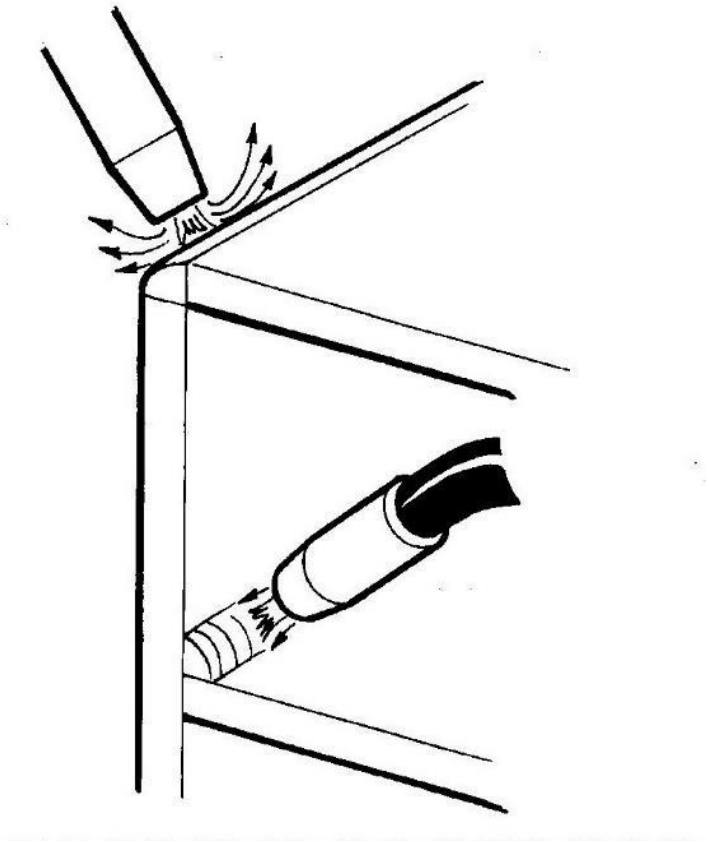
Suojakaasun virtausnopeus tulee säätää riittävän suureksi, jotta suojakaasu syrjäyttää ilman tehokkaasti hitsauskohdasta eikä ole herkkä vedolle ja muille ympäröivän ilman liikkeille. Kuitenkin liian suureksi säädetty virtausnopeus aiheuttaa turbulenssia, eli kaasuvirtauksen pyörteisyyttä kaasusuuttimessa, mikä aiheuttaa ympäröivän ilman imeytymisen hitsaustapahtumaan. Liian suureksi säädetty kaasuvirtaus nostaa myös suojakaasun kulutuksen tarpeettoman suureksi. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 86.)

Suojakaasun virtaus säädetään hitsattavan perusaineen, suojakaasun tyypin, hitsaustehon, railomuodon, ympäröivän ilman liikkeiden ja liitosmuodon mukaan. Suojakaasuvirtaus voidaan laskea karkeasti kertomalla käytettävä langanpaksuus 12:lla, jolloin saadaan sopiva suojakaasun virtausmäärä litroina minuutissa. Esimerkiksi käytettäessä 1,2 mm hitsauslankaa, sopiva suojakaasun virtausmäärä on noin 14,5 l/min. Laskukaava pätee kuitenkin vain argonille ja argon-hiilidioksidiseoksille. Kevyemmillä suojakaasuilla, kuten heliumvaltaisilla kaasuseoksilla on käytettävä 2–3-kertaista virtausnopeutta ja argonvaltaisilla heliumseoksilla 1,5–2-kertaista virtausnopeutta argon-hiilidioksidiseoksiin verrattuna. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 86.)

Käytettävän kaasusuuttimen koko tulee ottaa huomioon säädettäessä suojakaasuvirtausta. Suurempaa suojakaasusuutinta käytettäessä on virtausmäärän oltava suurempi. (AWS 2004, s. 178.) Myös hitsauksen kaarityyppi vaikuttaa suojakaasun virtausmäärän valintaan. Sopiva suojakaasun virtausmäärä sekakaarelle ja kuumakaarelle on 17–21 l/min ja lyhytkaarelle 12–17 l/min. (Lincoln Electric 2015, s. 28.) Laskukaavoista huolimatta suojakaasuvirtaus säädetään usein kokemuksen perusteella, jolloin valitaan suurehkot virtausnopeuden arvot. Suojakaasun virtausnopeutta ei myöskään usein säädetä hitsaustehon mukaan sopivaksi, vaan käytetään suurille hitsaustehoille sopivia virtausmääriä myös matalatehoisessa lyhytkaarihitsauksessa. Tämä aiheuttaa tarpeettoman suurien suojakaasumäärien kulutuksen, mikä nostaa hitsauskustannuksia. (Kah & Mvola Belinga 2016, s. 1.)

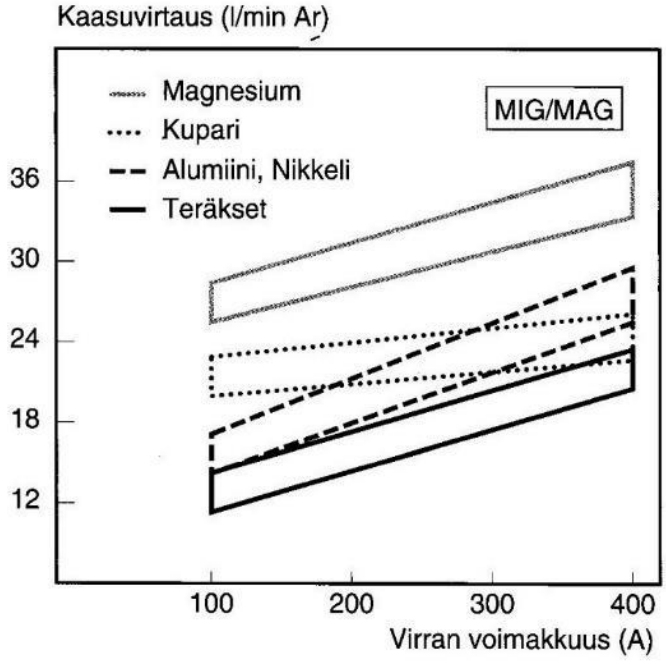
Myös liitosmuoto vaikuttaa tarvittavaan kaasun virtausmäärän suuruuteen. Jos hitsattava rakenne on kaasuvirtausta hajottava, on virtausmäärän oltava suurempi kuin kaasuvirtausta

kokoavaa rakennetta, kuten pienahitsiä hitsattaessa. Kaasuvirtausta hajottava ja kokoava rakenne on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Kaasuvirtausta hajottava ja kokoava rakenne (Lepola & Ylikangas 2016, s. 87).

Kuvassa 4 on esitetty ohjeellisia suojakaasun virtausnopeuksia eri perusaineiden MIG- ja MAG-hitsauksessa käytettäessä suojakaasuna argonia.



Kuva 4. Suojakaasun virtausnopeuksia eri perusaineiden MIG- ja MAG-hitsauksessa (Lepola & Ylikangas 2016, s. 87).

2.3 Kaasusuojauksen häiriöiden aiheuttamat hitsausvirheet

Jos kaasusuojaus on vajavainen ja sulamispisteeseen kuumennettu metalli pääsee kosketuksiin ilman kanssa, pyrkii sula metalli muodostamaan oksideja ja nitridejä. Ilman happi myös reagoi teräksen hiilen kanssa muodostaen hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Nämä reaktiot aiheuttavat hitsiin epäjatkuvuuskohtia, kuten kuonasulkeumia ja huokosia. Vajaa kaasusuojaus myös aiheuttaa hitsin haurastumista. Huoneilman happi ja typpi pyrkivät muodostamaan hitsiaineen seosaineiden kanssa oksideja ja nitridejä, josta aiheutuu hitsiaineen murtolujuuden aleneminen. Oksidien ja nitridien muodostumisen vuoksi MIG/MAG-hitsauksella tuotettu hitsiaine ei ole yhtä lujaa kuin TIG-hitsauksella (Tungsten Inert Gas Welding, volframi-inerttikaasukaarihitsaus) tuotettu hitsiaine. Suojakaasu ja kaasun virtausnopeus vaikuttavat myös reunahaavan muodostumisalttiuteen. (AWS 2004, s. 173 & 191.)

Huonosta kaasusuojauksesta johtuvia hitsausvirheitä ovat huokoset, oksidisulkeumat ja hitsin epätasainen, ryppyinen pinta (Mathers 2002, s. 201-202). Ontelot eli huokoset ovat kaasuonteloita, jotka aiheutuvat kaasusta, mikä ei pääse poistumaan hitsiaineesta. Huokoset voivat esiintyä yksittäisinä huokosina, tasaisena huokoisuutena tai huokosryhminä

hitsiaineen sisällä tai pinnalle avautuvina huokosina. Madonreikähuokoseksi sanotaan hitsiaineen pinnalle avautuvaa, vapautuvan kaasun aiheuttamaa putkimaista huokosta. Huokoset aiheutuvat seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen hitsauksessa vedyn, hapen ja typen vaikutuksessa. Alumiinin ja ruostumattoman teräksen hitsauksessa huokoset aiheutuvat vedyn vaikutuksesta. Syitä huokosten muodostumiselle voivat olla kosteudesta, ruosteesta, rasvasta tai muusta perusaineen tai hitsiaineen epäpuhtaudesta peräisin oleva kaasu, lisäaineen kosteus, liian pieni hitsausvirta, liian pitkä hitsausvalokaari, liian nopea jäähtyminen, liian suuri hitsausnopeus tai vajaa kaasusuojaus. Kaasusuojauksen vajavaisuus taas voi johtua vetoisuudesta, jolloin tuuli puhaltaa suojakaasun pois hitsaustapahtumasta, liian pieni tai liian suuri kaasun virtausnopeus tai hitsiaineroiskeet suojakaasusuuttimen sisäpinnalla. Myös vuoto suojakaasujärjestelmässä voi aiheuttaa veden tai ilman imeytymisen suojakaasun sekaan, mikä johtaa huokoisuuteen. (Lukkari 2002b, s. 10.)

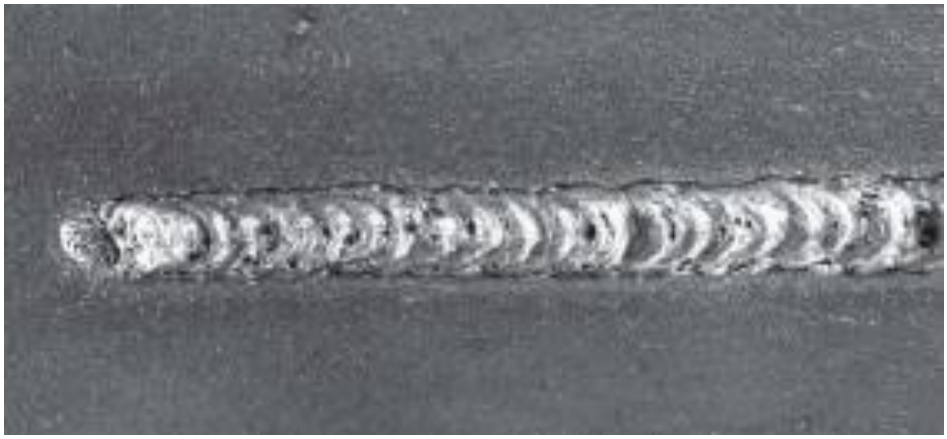
Huokoisuutta aiheuttava vety voi päätyä hitsiin myös hitsattavan perusaineen kautta. Esimerkiksi valetuissa alumiinikappaleissa voi olla sisäisiä vetyä sisältäviä huokosia, jotka hitsauksessa puhjetessaan vapauttavat vetyä, joka pääsee sulan kanssa kosketuksiin. Huokoisuus alumiinin hitsauksessa voi aiheutua myös alumiinin pintaan ilman vaikutuksesta syntyvästä oksidikalvosta. Huokoset voivat aiheutua myös huonosta hitsausliitoksen suunnittelusta. Huonosti suunnitellut liitokset voivat estää suojakaasua puhaltamasta huoneilmaa pois hitsin alueelta. (Mathers 2002, s. 201.)

Näiden hitsausvirheiden lisäksi Outokummun (2010, s. 41) mukaan vajaasta kaasusuojauksesta voi aiheutua ilman vedyn vaikutuksesta myös perusaineen haurastumista muutosvyöhykkeellä. Vetyä voi päätyä hitsiin myös vetenä suojakaasun kosteuden mukana. Suojakaasuvalmistajat ilmoittavat kaasujen kosteuspitoisuuden kastepisteen avulla, tyypillisen arvon ollessa -40 ºC. Erityisesti lujien teräksien hitsauksessa hitsiin päätynyt vety aiheuttaa hitsin jäähtymisen jälkeisen halkeamisen HAZ:in (Heat Affected Zone, hitsin muutosvyöhyke) alueella. Halkeama voi syntyä vasta tuntien tai jopa päivien jälkeen hitsin jäähtymisestä. Vetyhalkeama syntyy hitsin jäähdyttyä alle 150 celsiusasteeseen. (AWS 2004, s. 191.)

Alumiinin pinnalle muodostuva oksidikalvo voi aiheuttaa oksidisulkeumia päätyessään hitsiin. Oksidikalvo voi päätyä hitsin sisään myös lisäaineen mukana. Oksidisulkeuma voi

muodostua myös suojakaasun mukana hitsiin päässeen hapen hapettavasta vaikutuksesta. Kaasusuojauksen ongelmat voivat johtaa myös hitsin pinnan epätasaisuuteen. Hitsin pinnasta tulee ryppyinen, kun oksideja jää hitsiin liiallisen hitsisulan turbulenssin vuoksi. Hitsin pinnan epätasaisuus johtuu huonosta kaasusuojauksesta ja liian suuresta hitsausvirrasta. (Mathers 2002, s. 202.)

Kuvassa 5 on esitetty tyypillisiä huonon kaasusuojauksen aiheuttamia hitsausvirheitä. Kuvan hitsin pinta on epätasainen, hitsissä on pinnalle ulottuvia huokosia ja hitsauksessa on syntynyt roiskeita.



Kuva 5. Huonon kaasusuojauksen vaikutukset hitsissä (Hobart Institute of Welding Technology 2010, s. 27).

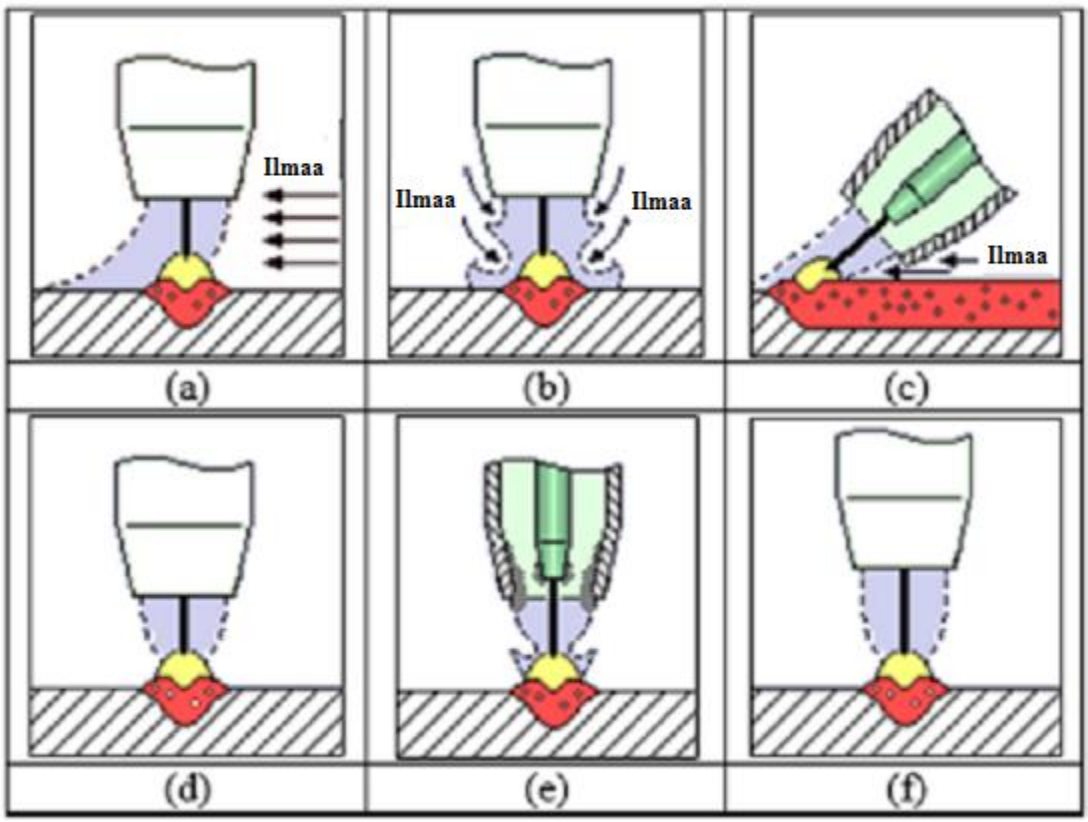
2.4 Kaasusuojauksen häiriöt

Riittämätön kaasusuojaus on yleisin huokoisuutta aiheuttava tekijä. Ennen hitsaamisen aloittamista tulee tarkistaa kaasunsyötön virtaussäätimen virtausmittarista, että suojakaasun virtausnopeus on säädetty oikeaksi. Tarkastus voidaan tehdä myös erillisellä virtausmittarilla, tarkistusrotametrillä, jolla suojakaasun virtausnopeus mitataan suoraan hitsauspistoolin kaasusuuttimesta. Tarkistusrotametrissä näkyy todellinen virtausnopeus, kun taas kaasunsyötön virtaussäätimen virtausmittari ei ota huomioon hitsauskoneen kaasujärjestelmän virtausvastuksia. Ennen hitsaamisen aloittamista tulee myös tarkistaa suojakaasulaitteisto vuotojen varalta. Myös liian pieni tai roiskeista tukkeutunut kaasusuutin johtaa vajaaseen kaasusuojaukseen. Hitsauksen lopetuksessa hitsauspistoolia pidetään lopetuskohdan päällä, kunnes sula metalli jähmettyy, jolloin hitsauskoneesta säädetty kaasun jälkivirtaus suojaa sulaa vielä hitsausvalokaaren sammuttua. Pistoolin nostaminen sulan

päältä liian aikaisin mahdollistaa ilman pääsyn kosketuksiin sulan kanssa. (Lukkari 2002a, s. 189-190; Monk & Morrett 2009.)

Hitsattaessa kaasusuojauksen häiriöille herkkiä metalleja, kuten alumiinia tai ruostumatonta terästä, tulee käyttää suojakaasun jälkivirtauksen lisäksi kaasun esivirtausta. Suojakaasu säädetään hitsauskoneen asetuksista virtaamaan hetken ajan ennen hitsausvalokaaren syttymistä, jolloin voidaan varmistua kaasusuojauksen tiiviydestä jo hitsauksen aloituskohdassa. Jos suojakaasupullon tai suojakaasuverkoston ja langansyöttölaitteen välissä käytetään pitkää kaasuletkua, voi letkuun kerääntyä kokoon puristunutta suojakaasua. Hitsauksen aloituksessa paineistunut kaasu purkautuu hallitsemattomasti, mistä voi aiheutua turbulenssia kaasusuojauksessa ja ilman imeytymistä mukaan hitsaustapahtumaan. Kaasun purkautumisen aiheuttamat ongelmat voidaan välttää säätämällä suojakaasun esivirtausaika tarpeeksi pitkäksi, jolloin kaasun tilavuusvirta ehtii tasaantua ennen hitsausvalokaaren syttymistä. Kaasunjakelujärjestelmään voidaan asentaa myös paineenalennusventtiili, joka estää paineen kerääntymisen kaasuletkuun. (Weman 2012, s. 94.)

Vajaa kaasusuojaus voi johtua myös hitsauspistoolin virheellisestä asennosta tai ympäristöstä jossa hitsataan. Kuvassa 6 on esitetty erilaisia riittämättömään kaasusuojaukseen johtavia tekijöitä. Kuvan 6 kohdassa a ympäristön ilmavirtaus aiheuttaa häiriöitä suojakaasuvirtauksessa, kun taas kohdassa b ilmaa imeytyy hitsaustapahtumaan pyörteisen suojakaasuvirtauksen vuoksi. Lepolan & Ylikankaan (2016, s. 86) mukaan suojakaasuvirtauksen pyörteisyys voi aiheutua liian suuresta suojakaasun virtausnopeudesta. Kohdassa c esitetty liian jyrkkä hitsauspistoolin kallistuskulma voi aiheuttaa ilman imeytymisen hitsaustapahtumaan. Kohdissa d ja f kuvataan huonosti säädetyn kaasuvirtauksen aiheuttamaa häiriötä kaasusuojauksessa. Tapauksissa kaasun virtausnopeus on säädetty oikeaksi kaasunsyöttöjärjestelmän säätimestä, mutta virtausvastuksien tai kaasusuuttimen vuoksi suojakaasuvirtaus hitsauspistoolin päässä on riittämätön suojaamaan hitsaustapahtumaa. Kohdassa e on esitetty hitsauspistoolin virtasuuttimeen ja kaasusuuttimen sisäpinnoille tarttuvien roiskeiden vaikutus kaasusuojauksessa. (Kah & Mvola Belinga 2016, s. 5.)

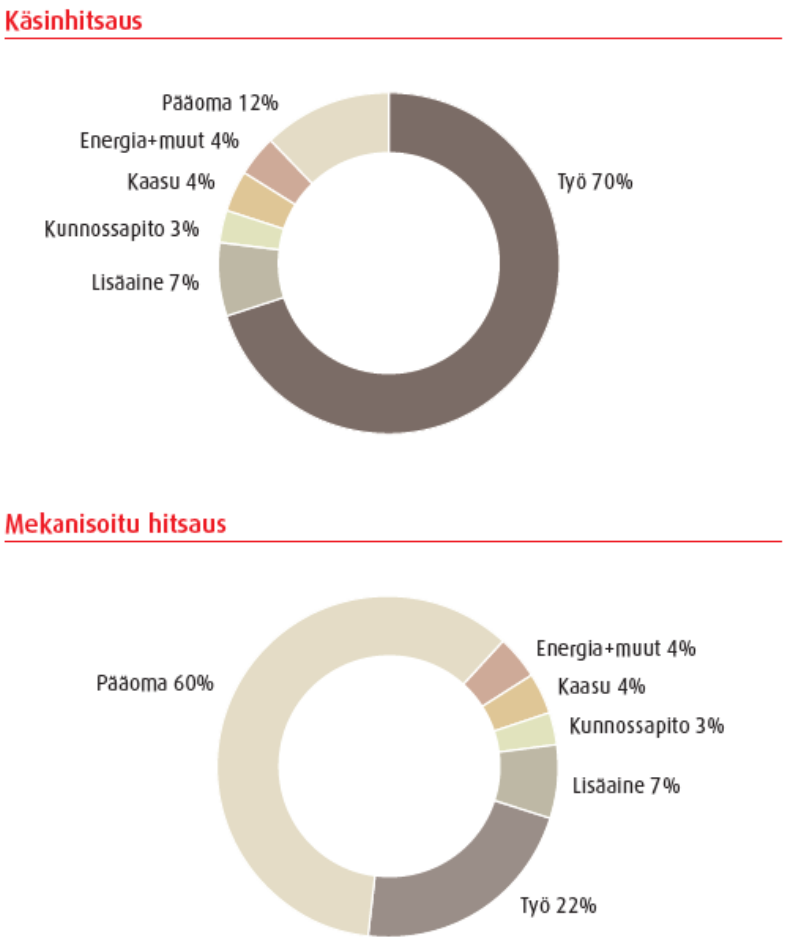


Kuva 6. Riittämättömään kaasusuojaukseen johtavia tekijöitä (mukaillen Kah & Mvola Belinga 2016, s. 7).

2.5 Suojakaasun vaikutus hitsauskustannuksiin ja tuottavuuteen

Käsinhitsauksen ja mekanisoidun hitsauksen kokonaiskustannukset tuotettua yksikköä kohden koostuvat pääoma-, työ-, lisäaine-, kunnossapito-, kaasu-, energia- ja muista kustannuksista, joista suurimman osan muodostavat pääomakustannukset ja työkustannukset. Mekanisoidun hitsauksen ja käsinhitsauksen kustannusjakaumat eroavat pääasiassa työ- ja pääomakustannusten osalta. Mekanisoidussa hitsauksessa pääomakustannusten osuus on suurempi ja työkustannusten osuus pienempi kuin käsinhitsauksessa. (AGA 2013a, s. 14.)

Kuvassa 7 on esitetty käsinhitsauksen ja mekanisoidun hitsauksen kustannusrakenteet. Mekanisoidun hitsauksen ja käsinhitsauksen kustannusjakaumat eroavat pääomakustannusten ja työkustannusten osalta.



Kuva 7. Käsinhitsauksen ja mekanisoidun hitsauksen kustannusjakaumat (AGA 2013a, s. 14).

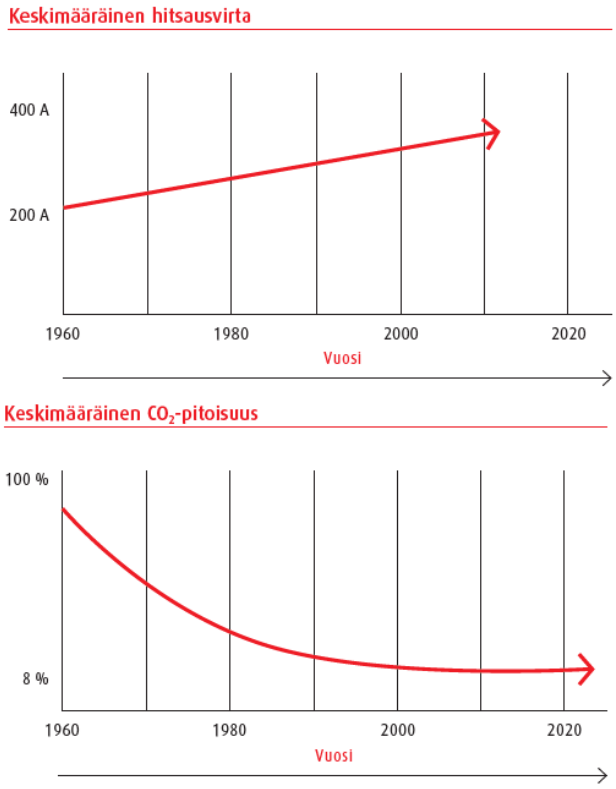
Paras keino kustannusten alentamiseen on käyttää tuotantolaitteita tehokkaasti, eli suurentaa hitsiaineentuottoa ja paloaikasuhdetta. Suurempi hitsiaineentuotto ja paloaikasuhde parantavat tuottavuutta ja sitä kautta pienentävät pääomakustannuksia ja työkustannuksia ja siten kokonaiskustannuksia. (AGA 2013a, s. 14.)

Suojakaasuvalinnalla voidaan vaikuttaa MIG/MAG-hitsauksen hitsausnopeuteen ja paloaikasuhteeseen. Käytettäessä suojakaasua, joka mahdollistaa suuren hitsausnopeuden käyttämisen, voidaan kasvattaa hitsiaineentuottoa. Paloaikasuhde paranee, kun käytetään suojakaasua, joka mahdollistaa jouhevan hitsin ja mahdollisimman vähäroiskeisen hitsauksen. Tällöin hitsauksen jälkeinen hitsien hiominen ja roiskeiden poisto vähenevät ja tuotteen arvoa nostavan hitsaustyön osuus kokonaistyöajasta kasvaa. Suojakaasuvalinnoilla saavutettavat säästöt suojakaasukustannuksissa ovat minimaalisia verrattuna korkeamman

tuottavuuden mahdollistavaan suojakaasuun sijoittamiseen. Korkeampi hitsauksen tuottavuus mahdollistaa moninkertaiset säästöt suojakaasukustannuksissa säästämiseen verrattuna. (AGA 2013a, s. 14.)

Myös suojakaasun toimitusmuodolla voidaan vaikuttaa paloaikasuhteeseen. Käytettäessä suojakaasun keskusjakelujärjestelmää, ei tule hitsaustyön keskeyttäviä kaasupullon vaihtoja. Suojakaasun loppuminen kaasupullosta kesken hitsauksen aiheuttaa myös hitsausvirheitä. (Stenbacka 2011, s. 100.)

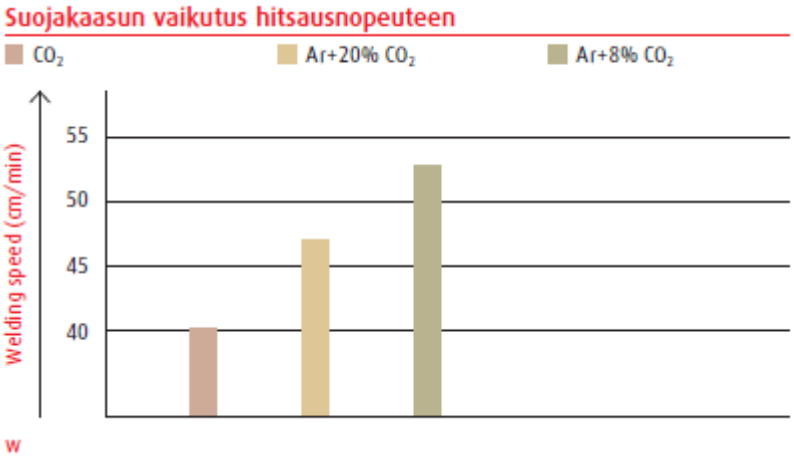
Vuosien varrella teräksen hitsauksessa käytettävien suojakaasujen aktiivisen komponentin, hapen tai hiilidioksidin, osuutta on alettu pienentämään tavoiteltaessa suurempia hitsausarvoja ja siten suurempaa tuottavuutta. Kuvassa 8 on esitetty keskimääräisen hitsausvirran kasvu ja suojakaasuseosten hiilidioksidipitoisuuden vähentyminen 60-luvulta lähtien.



Kuva 8. Keskimääräisen hitsausvirran ja hiilidioksidipitoisuuden muutokset vuosien saatossa (mukaillen AGA 2013a, s. 16).

Seoskaasujen mahdollistama hitsausnopeuden kasvattaminen on yksi tuottavuutta parantava ominaisuus puhtaalla hiilidioksidilla hitsaamiseen verrattuna. Saman hitsausnopeuden käyttäminen hitsattaessa puhtaalla hiilidioksidilla, mitä käytettäisiin esimerkiksi vain 8 % hiilidioksidia sisältävällä seoskaasulla johtaa liian korkeaan hitsikupuun ja hitsipalon liian jyrkkään liittymiseen perusaineeseen. (AGA 2013a, s. 17.)

Kuvassa 9 on esitetty erilaisilla suojakaasuilla ja -kaasuseoksilla saavutettuja hitsausnopeuksia langansyöttönopeuden ollessa vakio. Suojakaasun hiilidioksidipitoisuuden laskiessa saavutetaan suurempi hitsausnopeus.

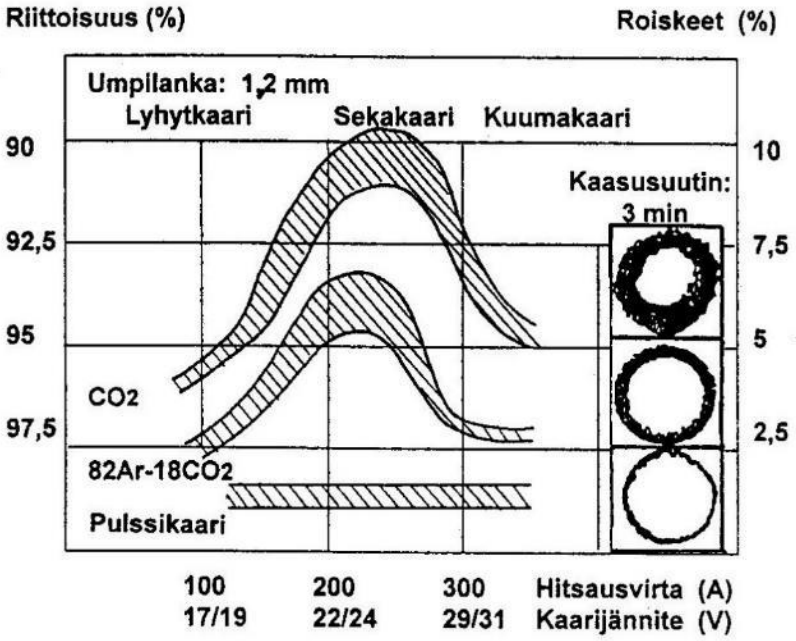


Kuva 9. Suojakaasun hiilidioksidipitoisuuden vaikutus hitsausnopeuteen (AGA 2013a, s. 17).

Roiskeisen hitsauksen aiheuttama jälkikäsittelyn tarve nostaa merkittävästi hitsauksen kokonaiskustannuksia. Suuret roiskeet sisältävät paljon lämpöä ja hitsautuvat helposti kiinni perusaineen pintaan. Suojakaasun hiilidioksidimäärä vaikuttaa roiskeiden kokoon ja määrään; Suurempi hiilidioksidipitoisuus nostaa hitsauksen roiskeisuutta ja kasvattaa roiskepisaroiden kokoa. Suuret roiskeet sisältävät paljon lämpöä ja lentäessään pois hitsaustapahtumasta, ne kuljettavat lämpöä pois. Samalla lisäaineen hyötyluku pienenee hitsiaineen lentäessä pois roiskeina. (AGA 2013a, s. 17.)

Kuvassa 10 on esitetty suojakaasun tyypin ja hitsauksen kaarityypin vaikutus roiskeisuuteen. Kuvaajassa oleva riittoisuus lasketaan vähentämällä käytetystä lisäainemäärästä roiskeina hukkaan menneen lisäaineen prosenttiosuus. Kuvassa on myös hahmotelma kaasusuuttimen

kunnosta 3 min hitsaamisen jälkeen. Kaikissa tilanteissa on käytetty lisäainelankana 1,2 mm umpilankaa.



Kuva 10. Suojakaasun ja kaarityypin vaikutus roiskeisuuteen (Lukkari 2002a, s. 174).

Kuvasta 10 nähdään selvä roiskeisuuden lisääntyminen sekakaaren virta-alueella. Sekakaari eli välikaari on kaarityyppinä lyhytkaaren ja kuumakaaren välimuoto; Lisäainelanka käy välillä oikosulussa perusaineen kanssa ja välillä hitsausvalokaari syttyy. Lisäaine siirtyy sulaan oikosulkuvaiheessa suurina pisaroina ja kaarivaiheessa suihkuna. Suuripisarainen lisäaineen siirtyminen, oikosulut ja kaaripaine aiheuttavat runsaasti roiskeita ja siksi sekakaarta pyritään välttämään. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 81.)

Kuvassa 10 vähiten roiskeita aiheuttava kaarityyppi on pulssikaari. Pulssikaari on hitsauksen kaarityyppi, jossa hitsausvirtaa pulssitetaan niin, että korkean virran vaiheessa lisäaine siirtyy sulaan suihkuna, kuten kuumakaarihitsauksessakin ja matalan virran vaiheessa hitsisula ja lisäainelangan pää pidetään sulana. Pulssi-MIG/MAG-hitsauksella saavutetaan erittäin vähäroiskeinen hitsaus, sillä lisäainelanka ei käy oikosulussa perusaineen kanssa ja hitsiaineen siirtyminen sulaan on hallittua. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 82.)

Suojakaasukustannukset voidaan laskea, kun tiedetään hitsiin tarvittava hitsiainemäärä, kaasun virtausnopeus, eli tilavuusvirta, suojakaasun hinta ja hitsiaineentuotto. Suojakaasukustannukset K_{Su} (€) voidaan laskea kaavalla (Stenbacka 2011, s. 88):

$$K_{Su} = (M \times 0{,}06 \times V \times H_{Su})/T \quad (1)$$

Kaavassa 1 *M* on hitsiainemäärä (kg), 0,06 on kerroin kaasuvirtaukselle, kun kaasuvirtaus on yksikössä l/min, *V* on suojakaasun virtausnopeus (l/min), H_{Su} on suojakaasun hinta (€/m^3) ja *T* on hitsiaineentuotto (kg/h).

Suojakaasukustannukset voidaan laskea myös yksinkertaisemmalla kaavalla (Stenbacka 2011, s. 88.):

$$K_{Su} = M \times (100/N) \times K \times H_{Su} \quad (2)$$

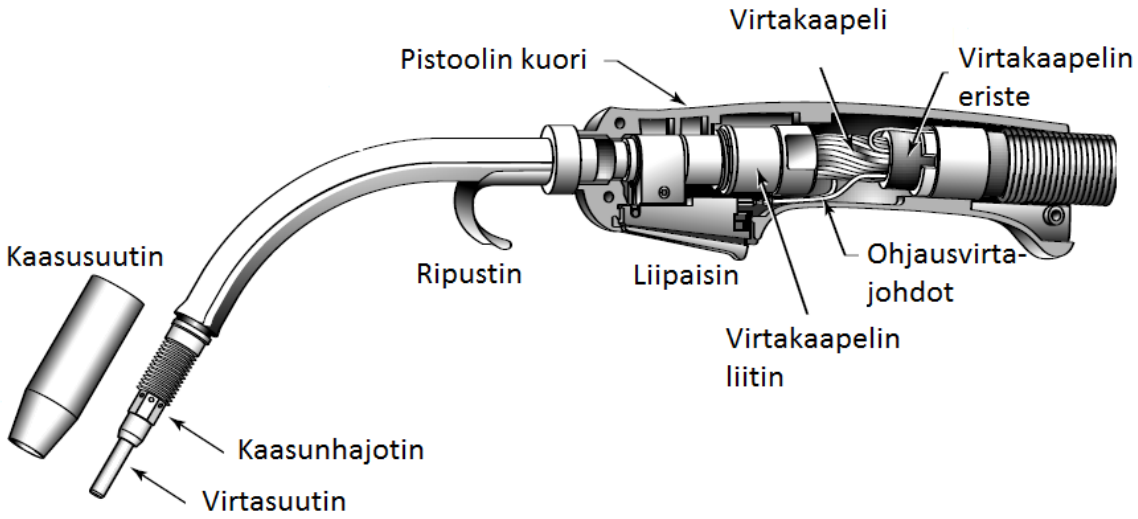
Kaavassa 2 *M* on hitsiainemäärä (kg), *N* on hyötyluku (%), *K* on suojakaasun ominaiskulutus (m^3/hitsauslanka-kg) ja H_{Su} on suojakaasun hinta (€/m^3). Suojakaasun ominaiskulutukselle *K* voidaan käyttää tyypillistä kulutusarvoa 0,4 m^3/kg, mutta kuitenkin suojakaasun ominaiskulutus vaihtelee paljon riippuen hitsausparametreista. (Stenbacka 2011, s. 88.)

3 MIG/MAG-HITSAUSPISTOOLIN RAKENNE

MIG/MAG-hitsauspistoolissa monitoimijohdon kautta syötettävään lisäainelankaan johdetaan hitsausvirta virtasuuttimella, suojakaasu ohjataan suojaamaan hitsaustapahtumaa kaasusuuttimella ja hitsauksen aloitusta ja lopetusta ohjataan käyttökytkimellä. Myös hitsausparametrien säätämiseen käytettävä kaukosäädin voi sijaita hitsauspistoolissa. Hitsauspistooleja on monen kokoisia, muotoisia ja sekä kaasu- että vesijäähdytteisiä. Hitsauspistoolissa voi olla myös hitsauskoneen luona olevan päälangansyöttölaitteen lisäksi vetävä langansyöttö. Käytettäessä yli 5 m:n pituista monitoimijohtoa syöttöhäiriöt lisääntyvät, jos ei käytetä välisyöttölaitetta tai vetävää hitsauspistoolia. Vetäviä pistooleja käytetään myös hitsattaessa alumiinia, sillä alumiinilanka on hyvin pehmeää. Pienikokoisilla pistooleilla on mahdollista hitsata ahtaammissa paikoissa, mutta ne eivät kuumuuden vuoksi kestä niin suurilla tehoilla hitsaamista kuin suuremmat pistoolit. Suurella teholla hitsaamisen aiheuttaman pistoolin kuumenemisen vuoksi vesijäähdytteistä pistoolia tulisikin käyttää, kun hitsausvirrat ovat 250–300 A. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 74-75; Lukkari 2002a, s. 185-187.) Jos hitsauspistooli on vesijäähdytetty, se on usein kevyempi kuin kaasujäähdytteinen pistooli. Vesikierto jäähdyttää pistoolin hitsausvirtajohtoa, virtasuutinta, sekä kaasusuutinta, joten osien ei tarvitse olla niin massiivisia kestääkseen kuumuutta, kuten kaasujäähdytteisessä pistoolissa. (Weman 2012, s. 79.)

3.1 Hitsauspolttimen pääosat

Hitsauspolttimen pääosat ovat kaasusuutin, kaasunhajotin eli diffuusori, virtasuutin ja liipaisin. Kuvassa 11 on esitetty hitsauspistoolin poikkileikkaus, johon pistoolin pääosat on merkitty.



Kuva 11. MIG/MAG-hitsauspistoolin pääosat (mukaillen Lincoln Electric 2015, s. 31).

Lisäainelanka ohjataan hitsausvalokaareen kuparista tai kupariseoksesta valmistetun virtasuuttimen, eli kosketussuuttimen läpi. Virtasuuttimen tehtävänä on johtaa hitsausvirta lisäainelankaan. Virtasuuttimen reiän koko tulee valita käytettävän lisäainelangan paksuuden mukaan. Suuttimen reiän halkaisijan tulee olla noin 0,13–0,25 mm lisäainelangan halkaisijaa suurempi, mutta alumiinihitsauslankaa käytettäessä suuttimen reiän ja langanhalkaisijan välyksen tulee olla vielä suurempi. (AWS 2004, s. 161.) Lepola & Ylikangas (2016, s. 75), sekä Lukkari (2002a, s. 188) mainitsevat sopivan kosketussuuttimen reiän halkaisijan ja lisäainelangan halkaisijan välyksen olevan 0,2–0,5 mm, mikä on huomattavasti suurempi välys, kuin AWS:n (2004, s. 161) suosittelema.

Kosketussuuttimen reiän halkaisijan valintaan vaikuttaa langanhalkaisijan lisäksi käytettävä hitsausteho, suojakaasu, suuttimen koko ja materiaali, langan etutaivutus ja laatu, hitsauspistoolin malli, sekä hitsauksen mekanisointiaste. Huonolaatuisilla lisäainelangoilla tulisi valita suurempivälyksinen kosketussuutin langasta irtoavan kuparipinnoitteen vuoksi. Suuttimen reiän koon valintaan ei ole olemassa yleisohjetta, vaan suuttimet valitaan yleensä työkohteen mukaan. Kosketussuuttimien valmistajat antavat taulukoissaan suosituksia sopivan suuttimen ja reiänhalkaisijan valintaan suuttimen kuparilaadun, lisäainelangan halkaisijan ja lisäainelangan laadun mukaan. Kosketussuuttimiin on leimattu merkintä, joka kertoo suuttimelle tarkoitetun langanhalkaisijan ja suuttimen reiän halkaisijan. Merkintä voi olla esimerkiksi 1,2 tai 12, mikä tarkoittaa, että suutin on tarkoitettu 1,2 mm halkaisijan

langalle. Merkintä voi olla myös W10 12, mikä tarkoittaa, että sopiva langanhalkaisija on 1,0 mm ja suuttimen reiän halkaisija on 1,2 mm. (Lukkari 2002a, s. 188.) Yleensä suurilla tehoilla kuumakaarialueella hitsattaessa ja alumiinin hitsauksessa valitaan kosketussuutin, johon on leimattu käytettävää langanhalkaisijaa suurempi nimellinen lankakoko. Esimerkiksi käytettäessä 1,0 mm lankaa, valitaan 1,2 tai 1,4 mm langalle tarkoitettu kosketussuutin. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 86.)

Kosketussuuttimen materiaalin tulee olla kuumankestävää, kulumiskestävää ja sen tulee omata hyvä sähkönjohtokyky, ja siksi suuttimet valmistetaankin kuparista tai kupariseoksesta. Kosketussuuttimissa käytettäviä kuparilaatuja ovat fosforipitoinen kupari Cu-DHP, hapeton kupari Cu-OF ja niukkaseosteiset kuparilaadut CuCr ja CuCrZr. Sähkön- ja lämmönjohtavuudeltaan näistä laaduista hapeton kupari on paras, mutta sen pehmenemislämpötila on matalin, eli sillä on huono kuumankestävyys. Fosforipitoisen kuparin kovuus huoneenlämmössä ja kuumankestävyys ovat hieman hapetonta kuparia paremmat. Kupariseoksista käytetyin on kuparin, kromin ja zirkoniumin seos CuCrZr, jossa kromia on 1 % ja zirkoniumia 0,1 %. Kupariseoksesta valmistetut kosketussuuttimet ovat kuparisia kestävämpiä niiden suuremman lujuuden, kovuuden ja korkeamman pehmenemislämpötilan vuoksi, mutta toisaalta seoskuparisten suuttimien sähkön- ja lämmönjohtavuudet ovat seostamattomia pienemmät. (Lukkari 2002a, s. 187-188.)

Kosketussuuttimen kokemista suurista lämpötilanvaihteluista ja kuparin suuresta lämpölaajenemiskertoimesta johtuen kosketussuutin voi löystyä kiinnityksestään. Suuttimen löystyminen suurentaa langansyöttöhäiriöiden riskiä ja kasvattaa sähköistä vastusta, mikä lisää suuttimen kuumenemista. Myös epäpuhtaudet suuttimen ja suutinrungon kierteissä estävät suuttimen kiertämisen loppuun saakka kiinni ja lisäävät sähköistä vastusta. (Lepola &Ylikangas 2016, s. 75-76 & 86.)

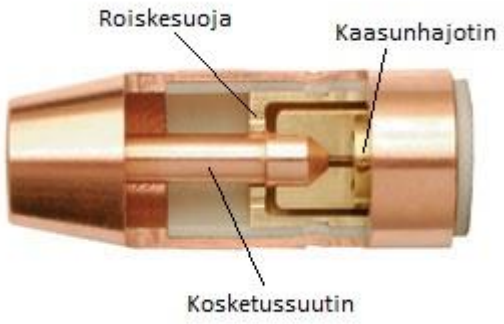
Kosketussuutinta ympäröivä kaasusuutin ohjaa suojakaasua hitsaustapahtumaan ja mahdollistaa suojakaasun tasaisen, mahdollisimman pyörteettömän virtauksen. Kaasusuutin on pidettävä puhtaana roiskeista häiriöttömän kaasusuojauksen varmistamiseksi, sillä roiskeet kaasusuuttimen sisäpinnoilla aiheuttavat turbulenssia suojakaasuvirtaukseen, josta voi aiheutua ilman sekoittuminen suojakaasuun. Kaasusuuttimia on monenlaisia erilaisiin käyttötarkoituksiin. Joissakin hitsauspistooleissa on säädettävä kaasusuutin, jonka etäisyyttä

kosketussuuttimesta voidaan säätää. Säädettävä kaasusuutin helpottaa ahtaissa paikoissa hitsaamista. (Lukkari 2002, s. 188-189.) Kaasusuuttimen asemaa voidaan säätää myös käytettävän kaarityypin mukaan. Yleensä lyhytkaarialueella hitsattaessa kaasusuutin säädetään samaan tasoon kosketussuuttimen kärjen kanssa tai kosketussuuttimen kärjen taakse. Kuumakaarialueella kosketussuuttimen kärjen tulisi olla noin 3 mm kaasusuuttimen sisäpuolella. (AWS 2004, s. 161.) Suojakaasu ohjataan kaasusuuttimeen kaasunhajottimen eli diffuusorin kautta. Kaasunhajotin mahdollistaa tasaisen suojakaasuvirtauksen ja jakaa suojakaasun tasaisesti kaasusuuttimen sisään virtasuuttimen ympärille. (Lincoln Electric 2015, s. 31.)

3.2 Hitsauspistoolin kaasuvirtaukseen vaikuttavat tekijät

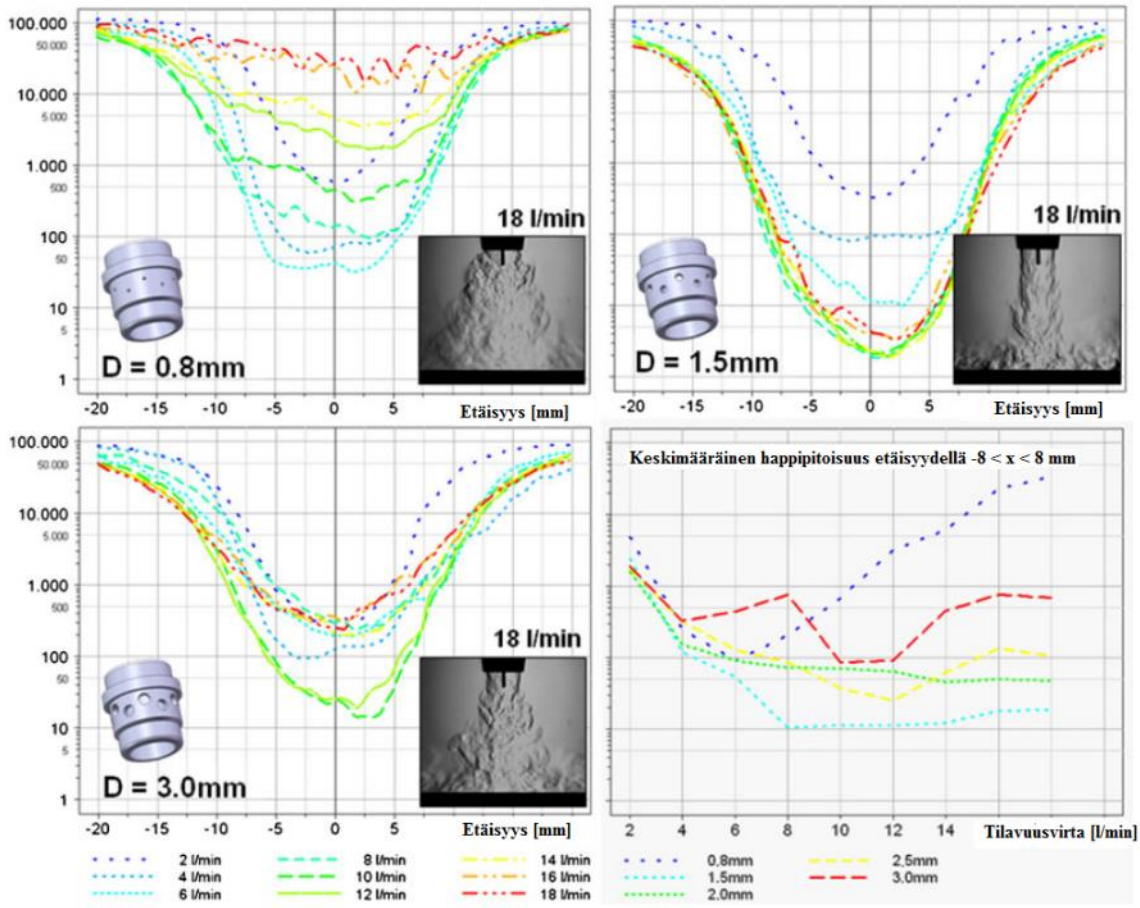
Hitsauspistoolin kaasusuutin, virtasuutin ja kaasunhajotin ovat kuluvia osia, joiden kuntoa tulee valvoa hitsauksen aikana ja tarpeen tullen uusia kuluneet osat. Vaikka kaasun virtausnopeus, tyyppi ja muut hitsausarvot olisivatkin valittu oikein, voi kulunut tai vääränlainen kaasusuutin, virtasuutin tai kaasunhajotin pilata hitsin. (Bernard.)

Liian kapea kaasusuutin tai kaasunhajottimen reikien tukkeutuminen voivat kuristaa suojakaasuvirtausta, jolloin hitsaustapahtumaan ei virtaa tarpeeksi suojakaasua ilman syrjäyttämiseksi. Myös huonosti suunniteltu kaasunhajotin voi aiheuttaa pyörteitä kaasuvirtaukseen. Joissain kaasusuuttimissa on sisäänrakennettuna roiskesuoja, joka estää hitsausroiskeiden pääsyn kaasunhajottimeen. Roiskesuoja hajottaa kaasuvirtausta kaasunhajottimen lisäksi mahdollistaen tasaisemman kaasuvirtauksen. (Bernard.) Kuvassa 12 on esitetty poikkileikkaus roiskesuojatusta hitsauspistoolin kärjestä.



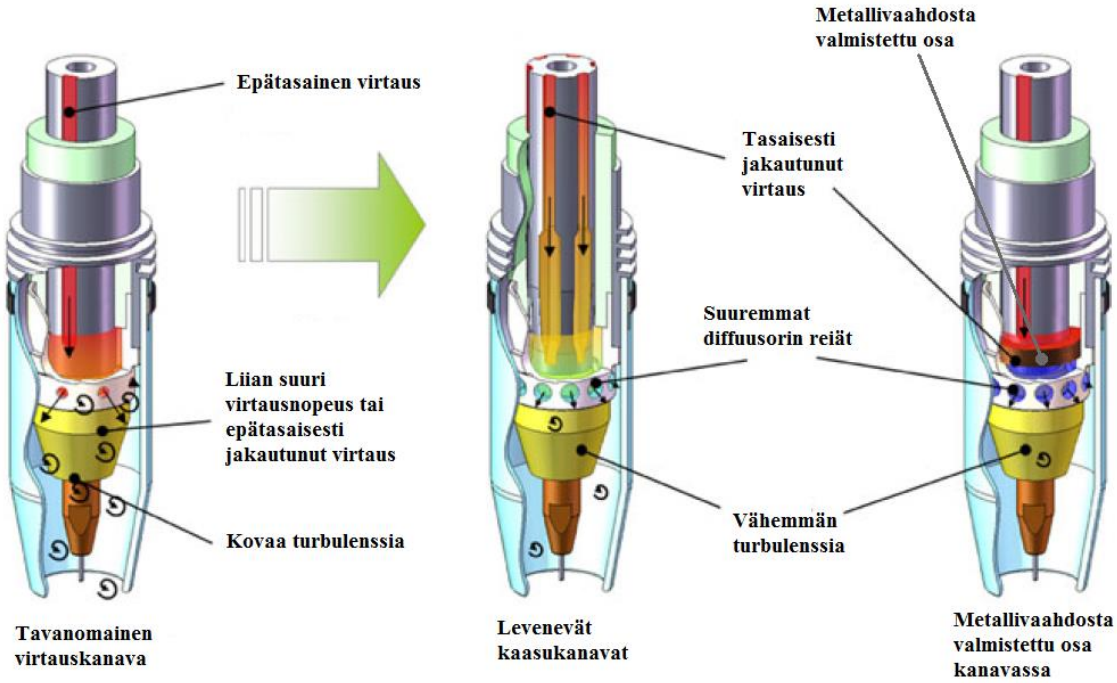
Kuva 12. Hitsauspistoolin kärjen poikkileikkaus (Mukaillen Bernard).

Kaasunhajottajan, eli diffuusorin tehtävä on mahdollistaa suojakaasun tasainen jakautuminen kaasusuuttimen koko sisäpinnalle. Diffuusorin reikien ollessa pieniä, jakautuu kaasu tasaisemmin kaasusuuttimeen verrattuna isoilla rei'illä olevaan diffuusoriin. Pienet reiät aiheuttavat suojakaasun paineen nousun diffuusorin sisällä, jolloin suojakaasu levittäytyy tasaisesti kaasusuuttimeen tullessaan, vaikka kaasu tulisikin diffuusoriin epäsymmetrisesti sijoitettuja kanavia pitkin. Paineen nousu aiheuttaa kuitenkin virtausnopeuden kasvun, josta aiheutuu pyörteitä. Vastaavasti diffuusorin suuremmat reiät kasvattavat vähemmän virtausnopeutta, mutta eivät jaa kaasua niin tasaisesti kaasusuuttimeen. (Dreher et al. 2013, s. 398-399.) Kuvassa 13 on esitetty erikokoisten diffuusorin reikien koon ja virtausnopeuden vaikutus suojakaasuvirtaukseen. Kaasun virtausnopeus on kaikissa schlieren-kokeissa 18 l/min. Kuvan käyrästöt esittävät eri etäisyyksiltä mitatun virtauksen happipitoisuuden eri suojakaasun tilavuusvirroilla.



Kuva 13. Diffuusorin reikien koon ja suojakaasun tilavuusvirran vaikutus virtauksen pyörteisyyteen ja happipitoisuuteen (mukaillen Dreher et al. 2013, s. 399).

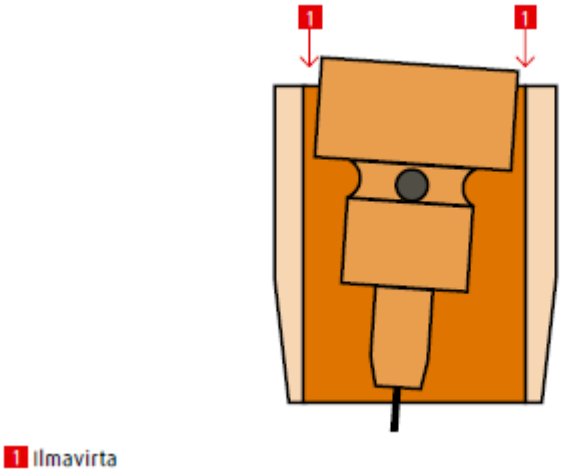
Tasaisesti jakautuneen ja mahdollisimman pyörteettömän suojakaasuvirtauksen varmistamiseksi, suojakaasun jakautumisen tulisi tapahtua kaasulinjassa jo ennen diffuusoria. Esimerkiksi suojakaasu voitaisiin johtaa diffuusoriin leveneviä uria pitkin. Suojakaasun paine nousisi kaasun tullessa urien yläpäähän, jolloin kaasu jakautuu tasaisesti kaikkiin uriin. Urien leventyessä kaasun virtausnopeus pienenee ja virtaus muuttuu laminaariseksi. Virtauksen jakautuessa tasaisesti jo ennen diffuusoria, voidaan diffuusorissa käyttää suurempia reikiä ilman epäsymmetrisen virtauksen vaaraa, jolloin kaasun virtausnopeus pysyy matalana myös diffuusorin jälkeen kaasusuuttimessa. Toinen mahdollinen ratkaisu kaasun tasaiseen jakamiseen olisi harvasta metallivaahdosta valmistetun osan sijoittaminen kaasukanavaan ennen diffuusoria. Suojakaasu virtaa vaahdon läpi jakautuen tasaisesti diffuusorin sisään. (Dreher et al. 2013, s. 399-400.) Edellä mainitut kaksi kaasukanavaratkaisua on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Usealla levenevällä kaasukanavalla tai metallivaahdosta valmistetulla osalla toteutettu kaasukanavaratkaisu (mukaillen Dreher et al. 2013, s. 399).

Kaasusuutin kokee muiden hitsauspistoolin osien tavoin suuria lämpötilanvaihteluita hitsauksen aikana. Lämpötilanvaihteluiden aiheuttama laajeneminen ja kutistuminen voi aiheuttaa kaasusuuttimen löystymisen kiinnityksistään. Kaasusuutin voi myös kääntyä

vinoon virtasuuttimeen nähden, jolloin ilma voi imeytyä suojakaasun sekaan kaasusuuttimen liitoskohdasta. Kierrekiinnitteinen kaasusuutin ei ole niin altis löystymiselle ja vinoon kääntymiselle kuin puristuskiinnityksellä toteutettu kaasusuutin. (AGA 2014, s. 8.) Kuvassa 15 on esitetty kaasusuuttimen virheellisen asennon aiheuttama ilman imeytyminen kaaritilaan.



Kuva 15. Kaasusuuttimen virheellisestä asennosta johtuva ilman imeytyminen suojakaasuvirtaukseen (AGA 2014, s. 8).

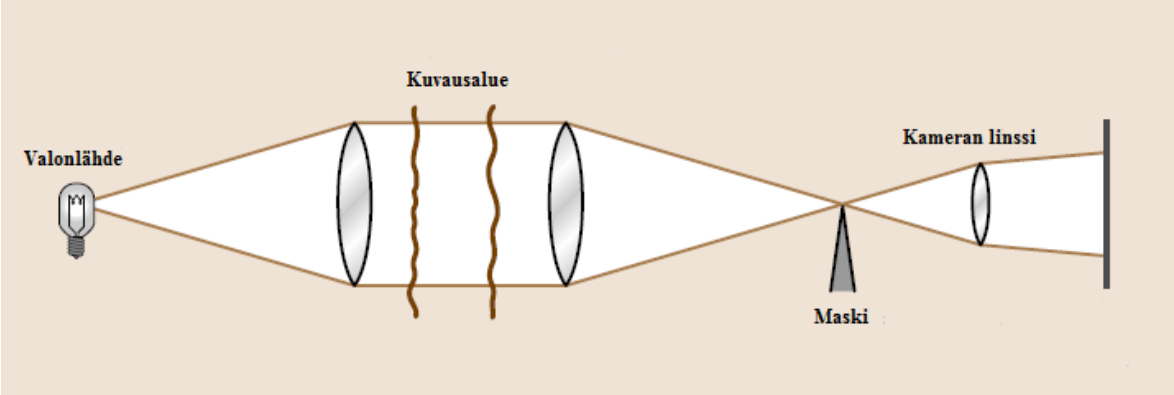
4 SCHLIEREN-KUVAUS

Saksan kielen sana ”schliere” tarkoittaa paljaalle silmälle näkymätöntä epäjatkuvuuskohtaa tai häiriötä läpinäkyvässä väliaineessa, viitaten useimmiten lasilevyyn tai ikkunaan. Schlieren-kuvauksen kehittäjänä pidetään saksalaista fyysikkoa, August Toepleria, joka kehitti schlieren-kuvauksen nykyiseen muotoonsa väliaineiden taitekerroineroja aiheuttavien epäjatkuvuuksien havaitsemiseksi. Schlieren-kuvausta kutsutaankin usein Toepler-schlieren-kuvaukseksi sen erottamiseksi muista schlieren-sanaan liittyvistä optisista metodeista. (Merzkirch 2007, s. 476; Settles 2001, s. 39.)

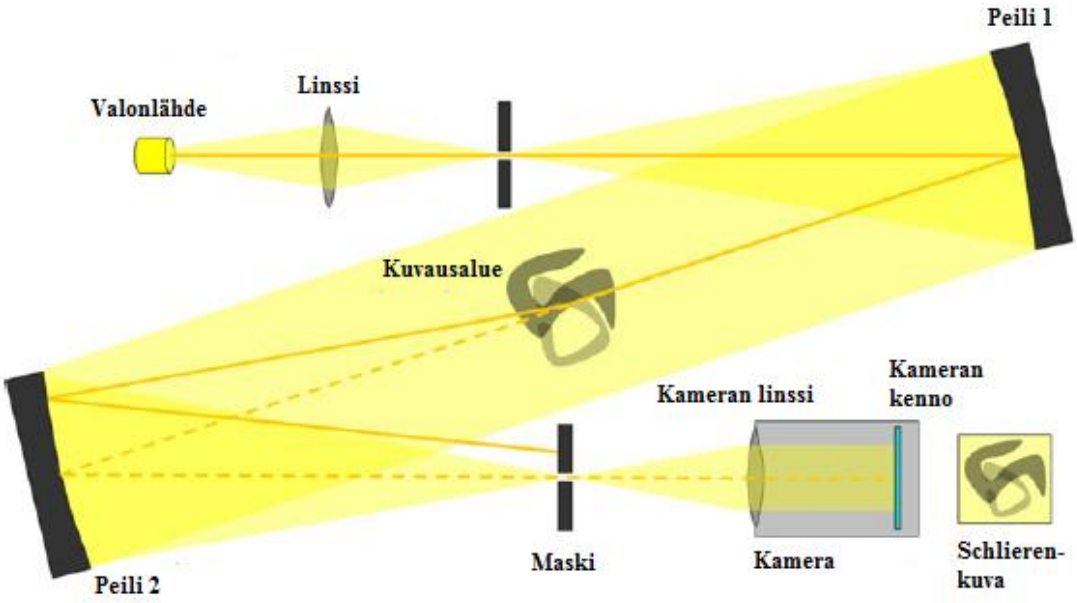
4.1 Kuvauslaitteistot ja toimintaperiaate

Schlieren-kuvaus perustuu läpinäkyvän väliaineen tiheyseroihin, lämpötilaeroihin tai erilaiseen kemialliseen koostumukseen, jotka aiheuttavat muutoksia väliaineen taitekertoimessa. Schlieren-kuvassa näkyy virtausten sekoittuminen, pyörteet ja turbulenssi. (Dreher et al. 2013, s. 395.)

Schlieren-kuvauslaitteisto voidaan toteuttaa käyttämällä joko peilejä tai linssejä valon ohjaamiseen. Valonlähteen valo kollimoidaan kuvausalueelle peilillä tai linssillä, jonka jälkeen toinen samanlainen peili tai linssi kokoaa valon kameralle. Valon kameralle kokoavan peilin polttopisteeseen on asetettu maski, joka peittää osan valosta. Maskina käytetään usein partaveitsen terää. Kuvassa 16 on esitetty linsseillä toteutettu schlieren-kuvauslaitteisto ja kuvassa 17 on esitetty peileillä toimiva kuvauslaitteisto. Peileillä toteutettua laitteistoa kutsutaan usein z-tyypin laitteistoksi sen rakenteen mukaan. (Dreher et al. 2013, s. 394-395; Merzkirch 2007, s. 476.)



Kuva 16. Linsseillä toteutettu schlieren-kuvauslaitteisto (mukaillen Merzkirch 2007, s. 476).



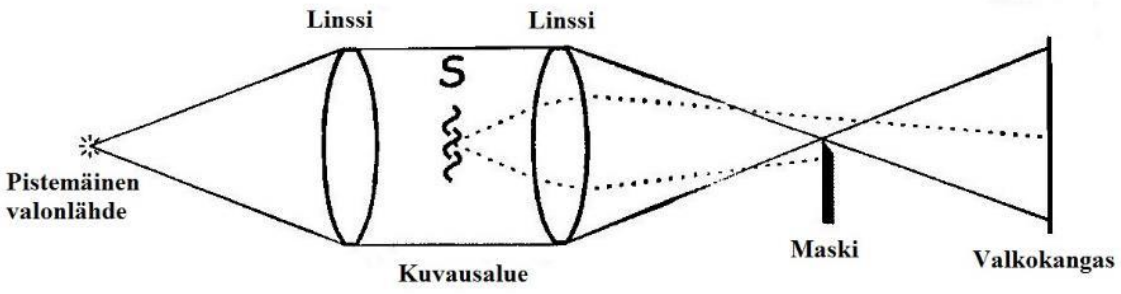
Kuva 17. Peileillä toteutettu schlieren-kuvauslaitteisto, jota kutsutaan myös z-tyypin laitteistoksi (mukaillen Dreher et al. 2013, s. 394).

Linsseillä toteutetun kuvauslaitteiston etuna peilijärjestelmään verrattuna on yksinkertainen rakenne osien ollessa linjassa ja siten optisten laitteiden helpompi linjattavuus. Toisaalta suurissa schlieren-kuvauslaitteissa käytettävät suuret linssit vaativat erinomaisen linssin materiaalin laadun, sekä kaksi erittäin tarkasti hiottavaa pintaa, kun taas peilissä on vain yksi tarkasti hiottava pinta ja niiden materiaalin sisäinen laatu ei ole niin merkitsevä tekijä. Suurimmissa linssejä hyödyntävissä schlieren-laitteistoissa linssien halkaisijat ovat 20 cm. Suuremmissa laitteistoissa käytetään lähes poikkeuksetta peilejä. Peilejä käyttämällä on

mahdollista saavuttaa suurempi näkökenttä laitteiston hintaan nähden kuin linssejä käyttämällä. (Settles 2001, s. 39-40.)

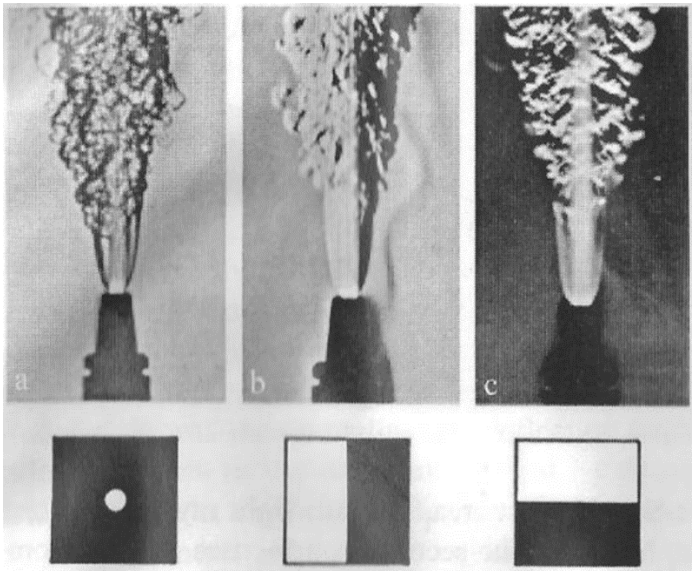
Valon kameralle kokoavan peilin tai linssin polttopisteeseen asetetun maskin tarkoitus on peittää osa kameralle tulevasta valosta. Ilman maskia schlieren-laitteisto toimii kuin projektori, näyttäen vain läpinäkymättömien kappaleiden siluetit. Kun maskia, esimerkiksi partakoneen terää, siirretään lähemmäs kokoavan linssin polttopistettä kuva alkaa nopeasti tummenemaan. Maskin ollessa polttopisteessä, se estää valonlähteeltä tulevan kuvan pääsyn kameraan tai valkokankaalle. (Settles 2001, s. 32.)

Kun schlieren-laitteiston kuvausalueelle tuodaan valon kulkua muuttavia ilmiöitä, kuten eri tiheyksisiä tai eri kaasusta koostuvia kaasuvirtauksia, kuvausalueella kulkeva valo taittuu ja ohjautuu pois alkuperäisiltä reiteiltään. Valon taittumisesta huolimatta kokoava peili suuntaa säteen joka kuvausalueen pisteestä niitä vastaaviin pisteisiin kameran kennolle tai valkokankaalle. Kuva 18 havainnollistaa maskin vaikutuksen taittuneen valon kulkuun. Kuvaan on piirretty kaksi kuvausalueen taitekerroinerojen vuoksi taittunutta valonsädettä, jotka eivät kulje kokoavan peilin polttopisteen kautta taittumisen vuoksi. Toinen säde taittuu ylös ja toinen alas. Alas taittunut valonsäde osuu maskiin, jolloin sen paikkaa vastaavassa pisteessä kamerassa tai valkokankaalla näkyy tummentuma vaaleaa taustaa vasten. Ylös taittunut säde taas ylittää maskina käytetyn partaveitsen terän ja aiheuttaa taustan kirkkautta kirkkaamman pisteen kamerassa tai valkokankaalla. (Settles 2001, s. 32-33.)



Kuva 18. Valonsäteiden taittuminen schlieren-laitteistossa. Testialueen schlieren-ilmiö (S) muuttaa valonsäteiden kulkureittejä. (Mukaillen Settles 2001, s. 33.)

Maskina toimivan veitsenterän asento vaikuttaa virtausilmiöiden näkymiseen. Poikittainen veitsenterä, kuten kuvassa 18 mahdollistaa vain pystysuuntaisten taitekerroinerojen havaitsemisen ja vastaavasti pystysuunnassa oleva veitsenterä mahdollistaa vain poikittaisten taitekerroinerojen havaitsemisen. Läpinäkymättömän maskin käyttö, jossa on ympyrän muotoinen reikä mahdollistaa sekä poikittaisten että pystysuuntaisten taitekerroinerojen näkemisen. Kuvassa 19 on esitetty maskina käytetyn ympyräreiän, pystysuuntaisen veitsenterän ja poikittaisen veitsenterän vaikutus näkyvään schlieren-kuvaan. Kuvassa on happi-asetyleenipolttimen liekki, jossa näkyy turbulenssia ja erilaisen kemiallisen koostumuksen omaavien aineiden sekoittumista. (Settles 2001, s. 33.)

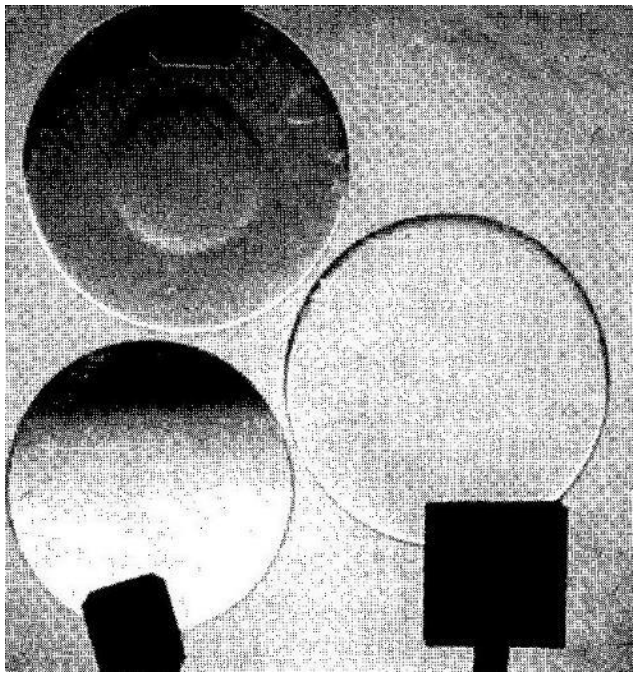


Kuva 19. Erilaisten maskien vaikutus schlieren-kuvauksessa (Settles 2001, s. 34).

4.2 Schlieren-kuvauksen ja shadowgraph-kuvauksen käyttökohteet

Schlieren-kuvausta ja shadowgraph-kuvausta käytetään laajalti läpinäkyvissä kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä aineissa tapahtuvien ilmiöiden tutkimiseen. Tärkeimpänä käyttökohteena kiinteiden aineiden tutkimuksessa schlieren-kuvausta käytetään lasikappaleiden laaduntarkkailuun. Schlieren-kuvauksella on mahdollista havaita esimerkiksi lasilevyn kiilamaisuus, pinnan aaltomaisuus, sisäiset jännitykset, kuplat ja sulkeumat. (Settles 2001, s. 212.)

Kuvassa 20 on esitetty schlieren-kuva kolmesta hiotusta lasilevystä. Ylimpään lasilevyyn on jäänyt ympyrän muotoinen hiontajälki, vasemmalla olevassa lasilevyssä on taittovirhe ja oikeanpuoleinen levy on virheetön.



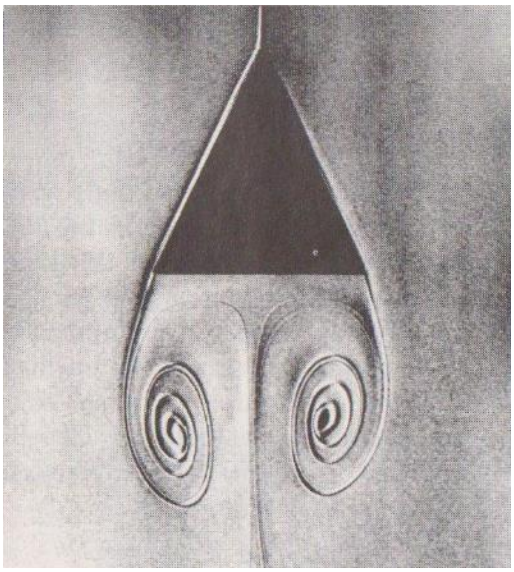
Kuva 20. Schlieren-kuva kolmesta lasilevystä, joista oikeanpuoleinen on virheetön (Settles 2001, s. 212).

Automaattista lasilevyjen ja lasiastioiden schlieren-ilmiötä hyödyntävää laaduntarkkailua hyödynnetään teollisuudessa. Automaattisessa tarkastuksessa käytetään lasereita, jotka voivat havaita 0,5 mm:n kokoisen virheen 0,25 m/s nopeudella liikkuvista lasilevyistä. (Settles 2001, s. 213.)

Schlieren- ja shadowgraph-kuvausta käytetään muun muassa konvektion aiheuttamien lämpö- ja massavirtojen tarkasteluun nesteissä. Schlieren-kuvauksella on mahdollista havaita esimerkiksi alhaalta lämmitetyn nesteen erilämpöisten osien sekoittuminen toisiinsa, sekä eri aineiden sekoittuminen toisiinsa. Erilaisten kappaleiden virtausdynaamisia ominaisuuksia on mahdollista tutkia tunnelissa, jonka läpi virtaa vettä halutulla nopeudella. Koska neste on lähes kokoonpuristumatonta, on virtaavaan veteen lisättävä merkkiainetta tai virtaukseen on sekoitettava hieman lämpimämpää vettä taitekerroinerojen luomiseksi ja pyörteiden ja muiden virtausilmiöiden havaitsemiseksi. Ympäröivää vettä lämpimämpi virtaus tai kemiallinen merkkiaine, kuten sokeri, muuttaa paikallisesti veden taitekerrointa,

mikä mahdollistaa ilmiöiden näkemisen schlieren-kuvassa. (Settles 2001, s. 215-217 & s. 220.)

Kuvassa 21 on esitetty kolmion muotoinen kappale virtaustunnelissa. Kappaleen kärkeen johdetaan sokeripitoinen vesivirtaus, jolloin kappaleen taakse muodostuvat pyörteet tulevat näkyviin.



Kuva 21. Kolmion muotoinen kappale nestevirtauksessa (Settles 2001, s. 220).

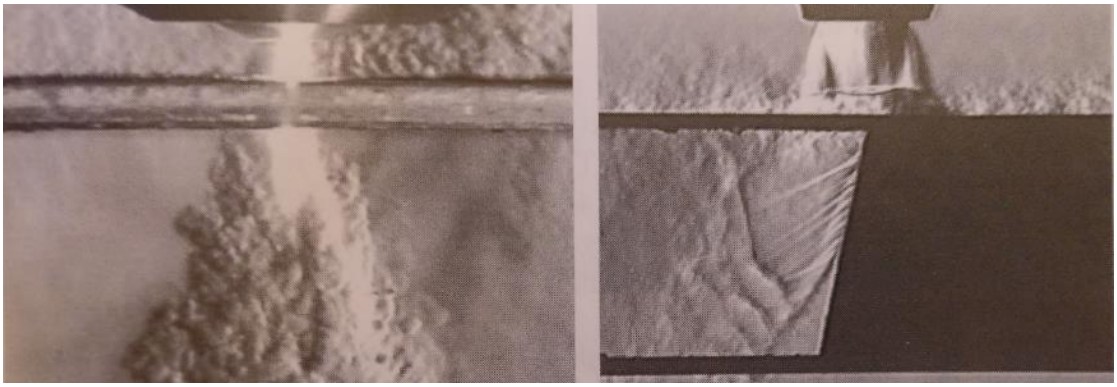
Schlieren- ja shadowgraph-kuvaus soveltuvat erittäin hyvin kaasuissa tapahtuvien ilmiöiden kuvaamiseen ja tarkasteluun, sillä kaasujen taitekerroin muuttuu olosuhteiden muuttuessa. Kaasun taitekerroin riippuu lämpötilasta, paineesta, tiheydestä, kemiallisesta koostumuksesta ja virtausnopeudesta. Schlieren-kuvauksella on mahdollista nähdä ääntä nopeammin liikkuvien kappaleiden aiheuttamat iskuaallot. Ääntä nopeampien ammusten ja lentokoneiden tutkimukseen käytetään tuulitunneleita, joissa ilma saadaan virtaamaan tutkittavan kappaleen ympärillä ääntä nopeammin. (Degen 2012, s. 28; Settles 2001, s. 221.)

Kuvassa 22 on esitetty 3,5-kertaisella äänennopeudella etenevän nuolimaisen ammuksen aiheuttama iskuaalto shadowgraph-kuvassa. Kuvasta voidaan havaita myös ammuksen yläpinnalla syntyvän turbulenssin aiheuttamia ääniaaltoja.

Kuva 22. 3,5-kertaisella äänennopeudella liikkuvan ammuksen aiheuttama iskuaalto shadowgraph-kuvassa (Settles 2001, s. 224).

Schlieren- ja shadowgraph-kuvauksen sovelluksia teollisuudessa ovat muun muassa ilmavirtaukset autojen korien ympärillä, palaminen, jäähtyminen ja kaasujen sekoittuminen moottorien palotiloissa, vuotojen havaitseminen, sekä erilaiset lämmönsiirtoon liittyvät tutkimuskohteet, kuten lämmittimet. Hitsaustekniikan näkökulmasta kiinnostavimpia tutkimuskohteita ovat plasma- ja laser- ja polttoleikkauksen kaasuvirtaukset ja plasman muodostuminen, sekä tietenkin tässäkin diplomityössä käsiteltävät kaarihitsauksen kaasuvirtaukset. Termisten leikkausprosessien ja kaarihitsausprosessien tuottama voimakas säteily voi aiheuttaa ongelmia schlieren-kuvauksessa. (Settles 2001, s. 246-247.)

Kuvassa 23 vasemmalla puolella on esitetty Schlieren-kuva plasmaleikkauspäästä leikattaessa teräslevyä. Oikealla on schlieren-kuva laserleikkauksesta. Kapean leikattavan kappaleen sivuille on kiinnitetty jäähdytetyt lasiseinät leikkausrailon poikkileikkauksen näkemiseksi. Kuvassa on havaittavissa leikkauskaasuvirtauksen irtoaminen leikkausrailon johtoreunasta.



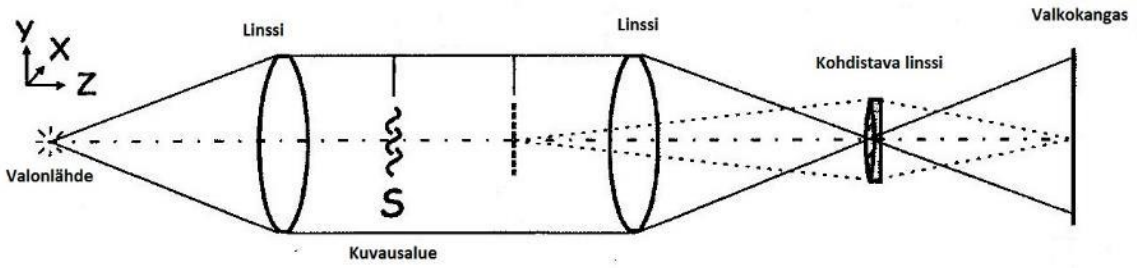
Kuva 23. Vasemmalla plasmaleikkaus ja oikealla laserleikkaus schlieren-kuvassa (Settles 2001, s. 247).

Erikoisempia schlieren-kuvauksen käyttökohteita kaasuvirtauksien tutkimuksissa ovat muun muassa teatterien ja konserttisalien akustiikan tutkimus. Bostonin konserttisalin akustikko Wallace C. Sabine rakensi vuonna 1900 konserttisalin pienoismallin, jossa hän sytytti paineaaltoja lähettäviä pieniä kipinöitä kuvatakseen ääniaaltojen etenemistä. (Settles 2001, s. 223-224.)

4.3 Shadowgraph-kuvaus

Shadowgraph-kuvaus hyödyntää schlieren-kuvauksen tavoin läpinäkyvien aineiden taitekerroineroja virtausilmiöiden havainnoinnissa. Shadowgraph-kuvauslaitteisto voi yksinkertaisimmillaan olla vain kirkas valonlähde, taitekerroineroja aiheuttava kuvauskohde ja sopiva pinta, jolle kuvattavan kohteen varjo heijastetaan. (Settles 2001, s. 147-148.) Shadowgraph on ilmiönä kaikille tuttu, sillä muun muassa liekistä nousevan kuuman ilman muodostama varjo auringon valaisemassa seinässä on shadowgraph-kuva. Kuten schlieren-kuvauksessa, myös shadowgraph-kuvauksessa taittuneet valonsäteet aiheuttavat kirkastumista ja tummumista heijastuspinnan, kuten valkokankaan eri kohdissa, jolloin kuva taitekerroineron muodosta tulee näkyviin. (Degen 2012, s. 17.)

Shadowgraph-kuvaukseen käytettävä laitteisto on toimintaperiaatteeltaan hyvin samankaltainen kuin schlieren-kuvauksessa. Kuvauslaitteiston toimintaperiaate on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Shadowgraph-laitteiston toimintaperiaate (mukaillen Settles 2001, s. 156).

Valonlähteestä tuleva valo kollimoidaan samansuuntaiseksi kuvausalueelle. Kuvausalueella taitekerroinerot (S) saavat valon muuttamaan kulkureittiään. Valo kulkee kuvausalueen jälkeen kohdistavaan linssiin, joka kohdistaa valon valkokankaalle tai kameraan. Erona schlieren-laitteistoon shadowgraph-laitteistossa ei ole maskia kuvausalueelta valon kokoavan linssin polttopisteessä. Schlieren-laitteiston tavoin myös shadowgraph-laitteisto voidaan toteuttaa linsseillä tai peileillä. Schlieren-kuvauksessa käytettävää laitteistoa voidaan käyttää myös shadowgraph-kuvauksessa. (Settles 2001, s. 156-157.)

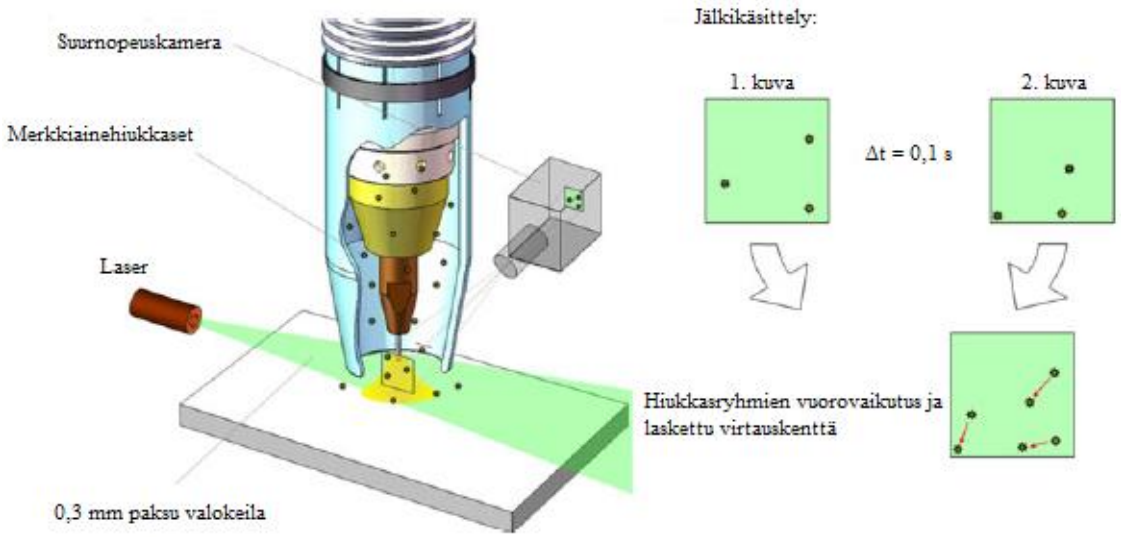
Shadowgraph-kuvaus soveltuu suurille taitekerroineroille, jotka muodostavat selkeäreunaisia muutoksia heijastuspinnan kirkkauksissa. kuvaustavan etuna pidetään myös yksinkertaista laitteistoa, joka on helppo käyttää ja asettaa toimintakuntoon. Shadowgraph-kuvauksen etuna on myös sen schliereniä matalampi herkkyys. Pienempi herkkyys mahdollistaa matalampilaatuisten linssien tai peilien käytön. Shadowgraph mahdollistaa myös hyvin laajan näkökentän käytön kuvauksessa. (Settles 2001, s. 144-145.)

4.4 Particle Image Velocimetry

Particle Image Velocimetry (PIV) on schlieren- ja shadowgraph-kuvauksen ohella suojakaasujen virtauksien tutkimuksessa käytetty hitsaustapahtumaan vaikuttamaton menetelmä. PIV perustuu suojakaasuun sekoitettavien merkkiainepartikkelien seuraamiseen ja hiukkasten liikeratojen laskemiseen tietokoneen avulla. Kuten schlierenissä ja shadowgraphissa, PIV:ssä käytetään valonlähteenä laservaloa. Laservalo kohdistetaan litteäksi ja leveneväksi, tasomaiseksi keilaksi suojakaasuvirtaukseen. Laservalo valaisee merkkiainepartikkelit, joiden liikettä kuvataan suurnopeuskameralla. Kameran kahdesta

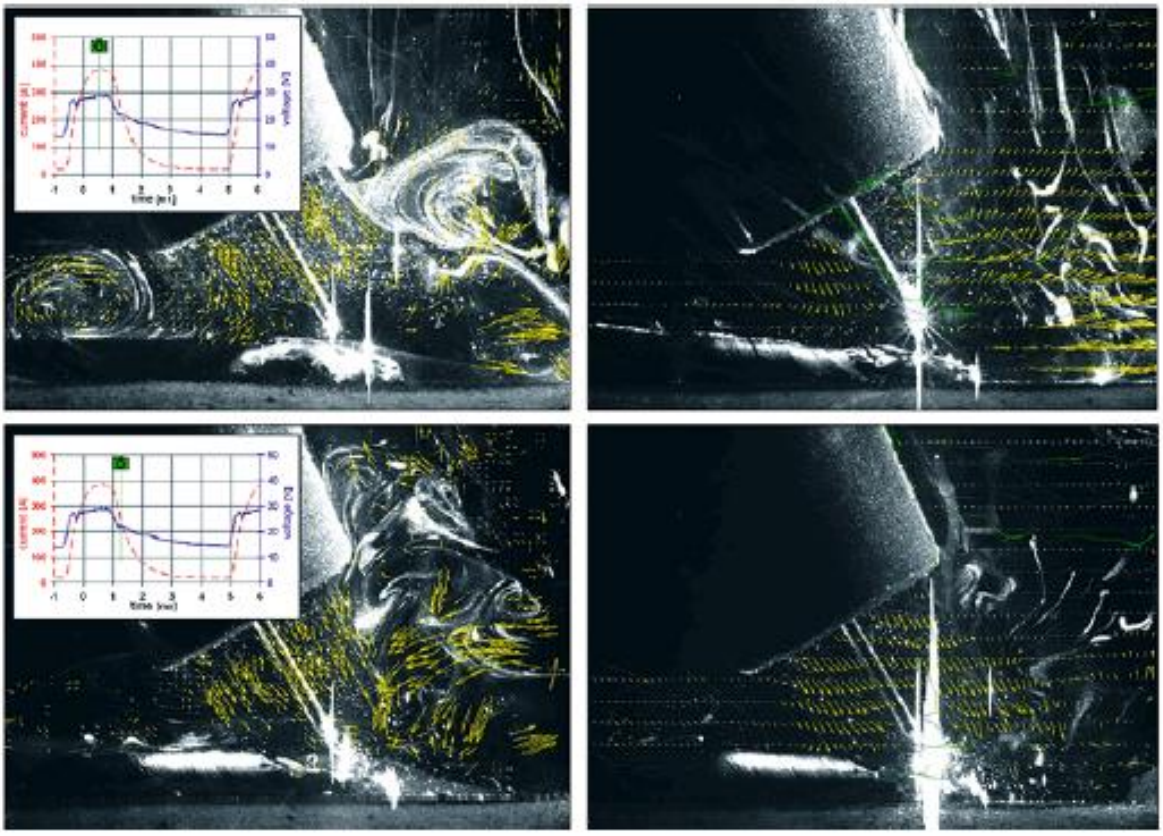
peräkkäisestä kuvasta voidaan laskea kaasun paikallinen virtausnopeus ja suunta. (Dreher et al. 2013, s. 394.)

Hitsauksen aikaisessa PIV-tutkimuksessa käytettävän merkkiaineen on oltava hitsaustapahtumaan reagoimatonta ja sillä on oltava korkea sulamispiste. Merkkiainehiukkasten on oltava myös kevyitä ja mahdollisimman pieniä, jotta ne kulkeutuisivat kaasuvirtauksen pyörteiden mukana mahdollisimman todenmukaisesti. Merkkiaineen on myös hajotettava valoa tehokkaasti, jotta hiukkaset näkyisivät kuvissa. Magnesiumoksidihiukkaset ovat hitsauksen tutkimuksissa usein käytetty merkkiaine korkean 2640 ºC:een sulamispisteen vuoksi. Magnesiumoksidihiukkasten koko on suurimmillaan 1 µm, ja niiden tiheys on 3,65 g/cm^3. Hitsauksen aikana vain pieni osa hiukkasista sulaa ja muodostaa kuonaa hitsin päälle. (Dreher et al. 2013, s. 393; Schnick et al. 2012, s. 55.) Kuvassa 25 on esitetty PIV-laitteiston toimintaperiaate.



Kuva 25. PIV-kuvauksen toimintaperiaate (mukaillen Dreher et al. 2014, s. 393).

Kuvassa 26 on esitetty PIV-kuvasarja alumiinin pulssi-MIG-hitsauksesta. Tietokoneohjelma on laskenut hiukkasten liikeradat ja piirtänyt kuviin nuolet hiukkasten ja suojakaasun liikkeiden havainnollistamiseksi. Kuvassa vasemmalla on yksittäisistä kuvista poimitut virtaukset, oikealla taas on keskimääräiset virtaussuunnat. Ylärivin kuvat on otettu virtapulssin huippuvaiheessa ja alarivin kuvat virtapulssin lopussa.



Kuva 26. PIV-kuva alumiinin pulssi-MIG-hitsauksesta (Schnick et al. 2012, s. 56).

5 TUTKIMUSOSUUS

Työn tutkimusosuudessa tarkastellaan erilaisten hitsauspoltinmallien ja kaasusuutinmallien kykyä luoda hitsaustapahtuman ympärille tiivis ja mahdollisimman pyörteetön kaasusuoja. Tutkimuksen tavoitteena on oppia erottamaan hyvä ja huono suojakaasuvirtaus schlieren-kuvasta, sekä myös tutkia erilaisten kaasusuuttimien muotojen ja hitsauspistoolin kaasukanavien muotojen vaikutusta suojakaasun virtaukseen.

5.1 Tutkimussuunnitelma

Erilaisia hitsauspistoolimalleja, kaasuholkkimalleja ja diffuusorimalleja tutkitaan kolmella kokeella. Kokeessa 1 kuvataan suojakaasuvirtausta schlieren-menetelmällä kaasun virratessa hitsauspistoolin läpi ilman työkappaletta. Kokeessa 2 hitsauspistooli suunnataan pienaan ja kaasua virtautetaan pistoolin läpi ilman hitsausvalokaarta ja kaasuvirtaus kuvataan schlieren-laitteistolla. Kokeessa 2 käytetään apuna suurnopeuskameran ohjelmiston mittaustoimintoa, jonka avulla varmistetaan, että kaikkien hitsauspistoolien kaasusuuttimet ovat kaikissa kokeissa yhtä kaukana pienasta. Kokeessa 3 kuvataan hitsaustapahtumaa schlieren-laitteistolla, kun hitsataan palko jalkoasennossa ruostumattoman teräslevyn päälle. Hitsauskokeissa käytetään hitsausprosessina pulssi-MAG-hitsausta. Schlieren-kuvauslaitteistolla tehtävät hitsauskokeet tehdään käsinhitsauksena. Schlieren-laitteistolla kuvattavissa hitsauskokeissa mitataan hitsauskoneesta virran ja jännitteen arvot, joiden avulla muodostetaan virta- ja jännitekäyrät. Käyrien avulla voidaan tarkastella schlieren-kuvia virtapulssin tietyssä vaiheessa. Kaikilla pistoolimalleilla ja hitsauskoneilla tehdään lisäksi hitsauskokeet, joissa hitsataan alapienahitsi. Hitsauskokeissa käytetään apuna pistoolinkuljetinta ja perusaineena ruostumatonta terästä. Hitsauskokeiden tulokset tarkastetaan silmämääräisesti ja tuloksia verrataan schlieren-kuvien näyttämien kaasuvirtauksien ominaisuuksiin.

Kaikissa kokeissa kaasun virtausnopeus säädetään arvoon 18 l/min. Virtausnopeus tarkastetaan hitsauspistoolin päästä digitaalisella rotametrilla ennen jokaista koetta. Hitsauskokeissa käytetään eri valmistajien hitsauskoneita niiden omilla pistooleilla. Kaasuvirtauskokeissa ilman hitsausvalokaarta käytetään euro-tyypin liittimellä varustettujen

pistoolien kanssa kone 6:tta. Erikoisliittimillä varustetut hitsauspistoolit testataan niiden omilla hitsauskoneillaan myös ilman hitsausvalokaarta tehtävissä kokeissa.

5.2 Tutkimuslaitteisto ja materiaalit

Schlieren-kuvaukseen käytettävän laitteiston valonlähteenä on valaisulaser, jonka lähettämän valon aallonpituus on 640 nm. Maskina käytetään 3 mm:n poranterästä leikattua kiekkoa, joka on kiinnitetty lasilevyyn. Ilmiöt kuvataan laitteiston suurnopeuskameralla.

Ilman hitsausvalokaarta tehdyissä schlieren-kokeissa suojakaasuna käytetään Ar + 18 % CO^2 -suojakaasuseosta. Kaasuseos valittiin seoksen hiilidioksidikomponentin ja huoneilman välisen suuren taitekerroineron vuoksi. Esimerkiksi Ar + 2 % CO^2 -seosta käytettäessä kaasuvirtaus näkyy hyvin huonosti kaasuseoksen matalan hiilidioksidipitoisuuden ja siten kaasuseoksen ja huoneilman välisen pienen taitekerroineron vuoksi. Hitsauskokeissa suojakaasuna käytetään ruostumattoman teräksen hitsaukseen soveltuvaa Ar + 2 % CO^2 -kaasuseosta. Hitsauskokeissa matalampihiilidioksidinen suojakaasuseos näkyy hyvin schlieren-kuvassa hitsausvalokaaren kuumentaessa suojakaasua, sillä suojakaasun ja ympäröimän ilman lämpötilaero aiheuttaa suuria taitekerroineroja. Kaikissa hitsauskokeissa käytetään lisäainelankana ruostumatonta Elga Cromamig 316 LSi 1,2 mm -lisäainelankaa. Kaikissa hitsauskokeissa käytettiin samaa lankakelaa. Lisäainelangan ainestodistus on nähtävissä liitteessä I. Perusaineena hitsauskokeissa, sekä hitsausvalokaaren palaessa tehtävissä schlieren-kokeissa käytetään 6 mm paksuja ruostumattomia teräslevyjä.

5.3 Tutkittavat hitsauspoltinmallit

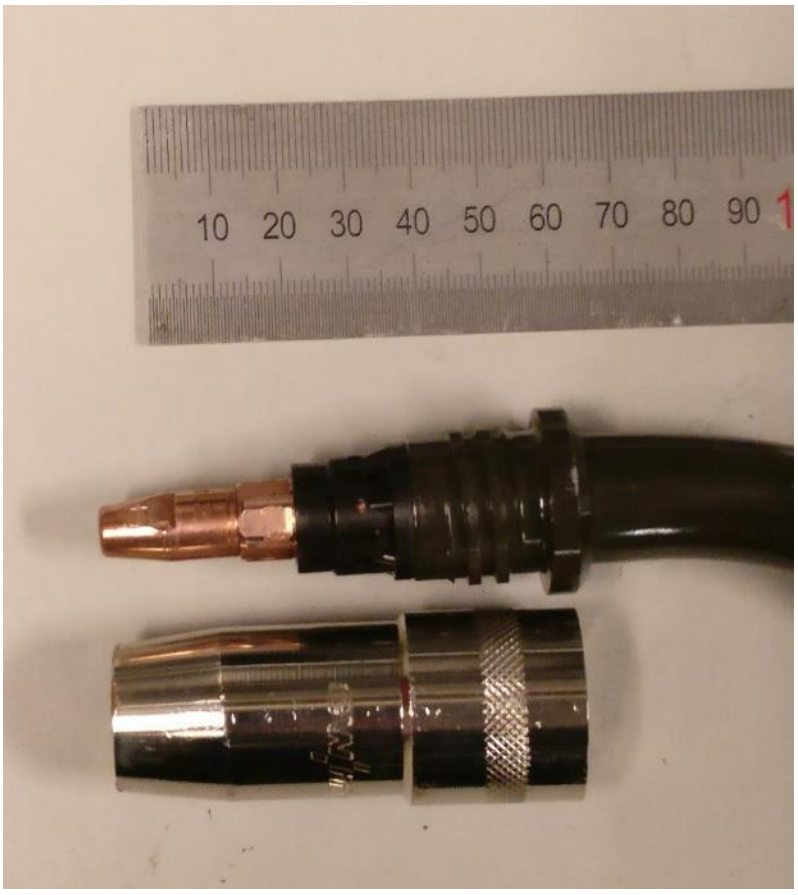
Työssä tutkitaan valmistaja 5:n hitsauspistooleja ja vertaillaan niiden kaasusuojaa kilpailijoiden pistooleihin. Lisäksi tutkitaan erilaisten kaasusuuttimien ja kaasunhajottajien vaikutusta kaasun virtaukseen. Tutkittavia hitsauspistoolimalleja on yhteensä 11 kappaletta, joista viisi on kilpailijoiden pistooleja. Tutkimuksiin valitaan valmistaja 1:n, valmistaja 2:n, valmistaja 3:n ja valmistaja 4:n hitsauspistoolit ja hitsauskoneet. Pistooli 9a:ta käytetään neljän erilaisen kaasusuuttimen testaukseen. Pistooli 9a, 9b ja 10 testataan myös lisädiffuusorin, sekä vaihtoehtoisen diffuusorin kanssa. Taulukkoon 1 on koottu kokeissa käytettävien hitsauspistoolien ja hitsauskoneiden mallitiedot. Taulukossa on myös ilmoitettu erilaisten hitsauspistoolimallien jäähdytystapa ja virrankesto 18–21 % hiilidioksidia sisältävällä argonkaasuseoksella.

Taulukko 1. Kokeissa tutkitut hitsauspistoolimallit ja hitsauskoneet.

Nume-ro	Valmistaja	Hitsauspistoolimalli	Hitsauskone	Jäähdytys	Kuormitettavuus, Ar + 18–21 % CO2 [A]
1	Valmistaja 1	Pistooli 1	Kone 1	Vesi	500
2	Valmistaja 2	Pistooli 2	Kone 2	Vesi	500
3	Valmistaja 2	Pistooli 3	Kone 3	Vesi	400
4	Valmistaja 3	Pistooli 4	Kone 4	Kaasu	300
5	Valmistaja 4	Pistooli 5	Kone 5	Vesi	520
6	Valmistaja 5	Pistooli 6	Kone 6	Vesi	400
7	Valmistaja 5	Pistooli 7	Kone 7	Vesi	500
8	Valmistaja 5	Pistooli 8	Kone 7	Kaasu	300
9	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin I	Kone 7	Vesi	500
10	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin II	Kone 7	Vesi	500
11	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin III	Kone 7	Vesi	500
12	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin IV	Kone 7	Vesi	500
13	Valmistaja 5	Pistooli 9b	Kone 7	Vesi	500
14	Valmistaja 2	Pistooli 2 ilman lisädiffuusoria	Kone 2	Vesi	500

15	Valmistaja 5	Pistooli 10	Kone 7	Vesi	400
16	Valmistaja 5	Pistooli 9a lisädiffuusorilla	Kone 7	Vesi	500
17	Valmistaja 5	Pistooli 9b lisädiffuusorilla	Kone 7	Vesi	500
18	Valmistaja 5	Pistooli 9b diffuusori 2:lla	Kone 7	Vesi	500
19	Valmistaja 5	Pistooli 10 diffuusori 2:lla	Kone 7	Vesi	400

Kuvissa 28–43 on esitetty tutkittujen hitsauspistoolien päät kaasusuuttimet irrotettuina.



Kuva 28: Valmistaja 1:n pistooli 1.

Kuva 29. Valmistaja 2:n pistooli 2

Kuva 30. Valmistaja 2:n pistooli 3.

Kuva 31. Valmistaja 3:n Pistooli 4. Kaasusuuttimen vieressä näkyvä holkki kiinnitetään diffuusorin ja virtasuuttimenpitimen ympärille.

Kuva 32. Valmistaja 4:n pistooli 5.

Kuva 33. Valmistaja 5:n pistooli 6.

Kuva 34. Valmistaja 5:n pistooli 7. Pistooli 7 on kone 7:lle suunniteltu versio pistoolista 6.

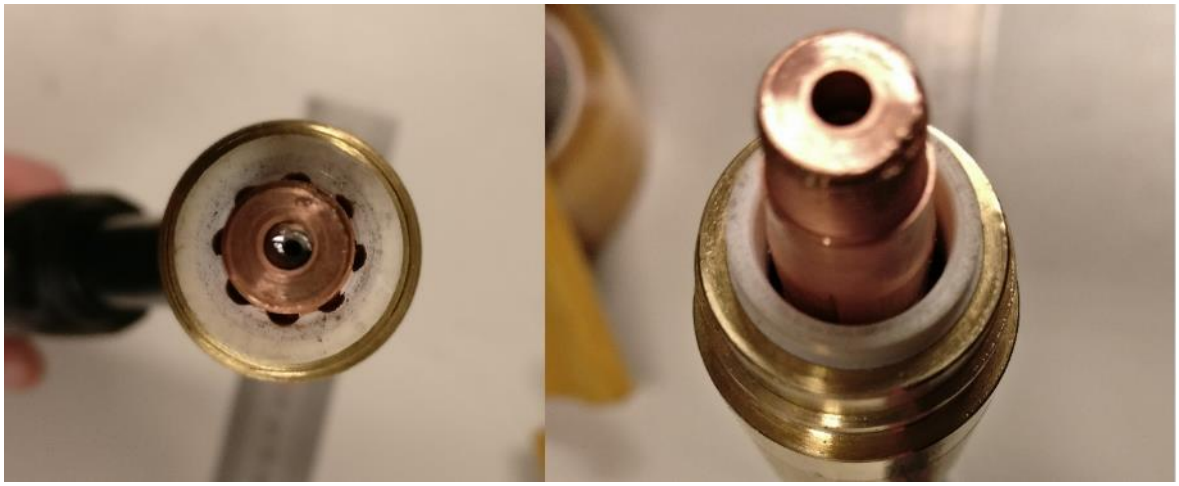
Kuva 35. Valmistaja 5:n pistooli 8.

Kuva 36. Valmistaja 5:n pistooli 9a. Kuvassa on pistoolin ensimmäinen kehitysversio. Pistooli 9b on ulkoisesti samanlainen.

Pistooli 9a ja 9b ovat ulkoisesti samanlaisia. Pistooli 10:ssä on 500 A:n pistooleihin verrattuna lyhyempi kaula ja hitsauspistoolin pää on kapeampi. Pistooli 9:n kaksi eri versiota eroavat toisistaan kaasukanavien osalta. Pistoolit 9a ja 9b käyttävät samoja kaasusuuttimia ja virtasuuttimenpitimiä. Myös pistooli 10:ssä käytetään samaa virtasuuttimenpidintä, kuin pistooli 9a ja 9b, mutta pistooli 10:ssä käytetään kapeampaa kaasusuutinta, kuin pistooli 9a:ssa ja 9bssä. Kuvassa 37 on esitetty pistooli 10:n pää ja kaasusuutin.

Kuva 37. Valmistaja 5:n pistooli 10 kaasusuutin irrotettuna.

Kuvassa 38 on esitetty pistoolien 9a ja 9b kaasukanavat. Pistooli 9a:ssa suojakaasu johdetaan virtasuuttimenpitimen sisälle kahdeksan kanavan kautta. Myös pistooli 10:ssä kaasu johdetaan samanlaisten kanavien kautta virtasuuttimenpitimen sisälle. Pistooli 9b:ssä kanavia ei ole ja suojakaasu pääsee jakautumaan vapaasti virtasuuttimenpitimen sisälle. Kuvassa virtasuuttimenpitimet ovat poistettuina.



Kuva 38. Pistooli 9:n eri versioiden kaasukanavat, vasemmalla 9a, oikealla 9b. Pistooli 10:ssä on samanlaiset kaasukanavat, kuin kuvassa vasemmalla olevassa pistooli 9a:ssa.

Näiden hitsauspistoolimallien lisäksi pistooli 9a:ta, sekä 9b:tä kokeiltiin lisädiffuusorilla, joka kiinnitettiin alkuperäisen messinkisen diffuusorin päälle. Pistooli 9b, sekä pistooli 10 testattiin myös uudella diffuusorilla, joka kiinnitettiin alkuperäisen messinkisen diffuusorina toimineen virtasuuttimenpitimen tilalle.

Kuvassa **39** on esitetty pistooli 9a lisädiffuusorilla. Lisädiffuusori kiinnittyy alkuperäisen messinkisen diffuusorin päälle kierrekiinnityksellä.

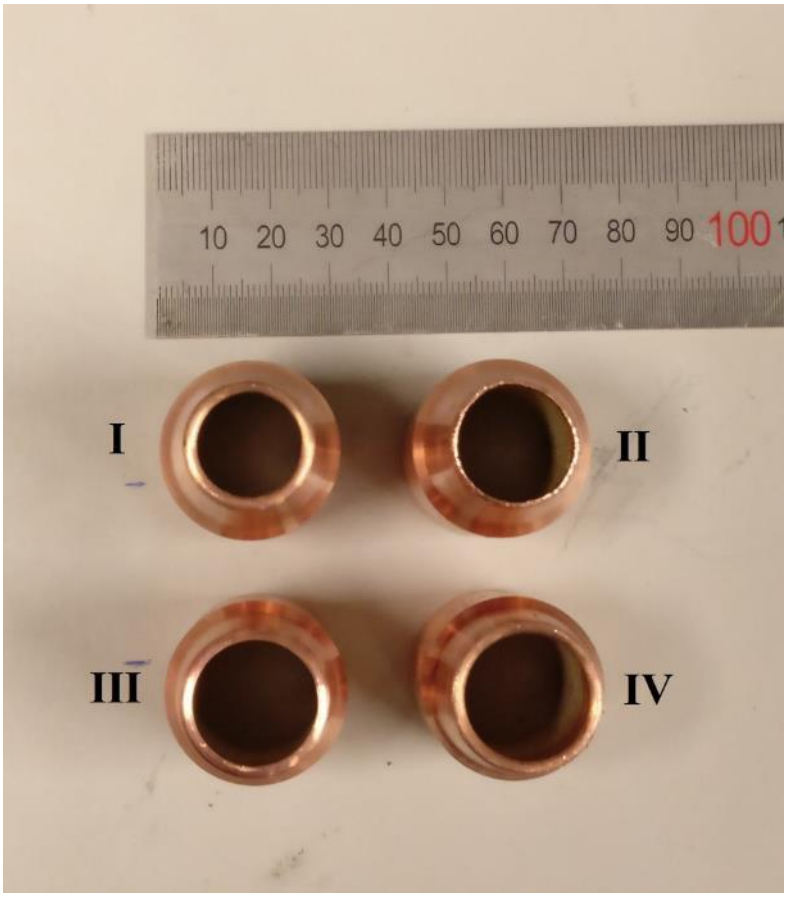
Kuva 39. Pistooli 9a lisädiffuusorilla. Molemmat pistooli 9:n malleista testattiin kuvan lisädiffuusorilla varustettuina.

Kuvassa 40 on esitetty pistooli 9b diffuusori 2:lla varustettuna. Diffuusori 2 vaihdettiin alkuperäisen messinkisen diffuusorina toimineen virtasuuttimenpitimen tilalle. Kuvassa 41 on esitetty pistooli 10 diffuusori 2:lla varustettuna.

Kuva 40. Pistooli 9b, jossa kiinnitettynä diffuusori 2.

Kuva 41. Pistooli 10 varustettuna diffuusori 2:lla.

Kuvassa 42 on esitetty pistooli 9a:lla tutkitut kaasusuuttimet. Suuttimet erosivat toisistaan aukon halkaisijan ja aukon reunan pyöristyksen osalta. Suutin I:n aukon halkaisija oli 15 mm ja aukon reuna oli pyöristetty. Suutin II:n aukon halkaisija oli 17 mm ja aukon reuna oli terävä. Suutin III:n aukon halkaisija oli 18 mm ja reuna oli terävä. Suutin IV:n aukon halkaisija oli 18 mm ja reuna oli pyöristetty.



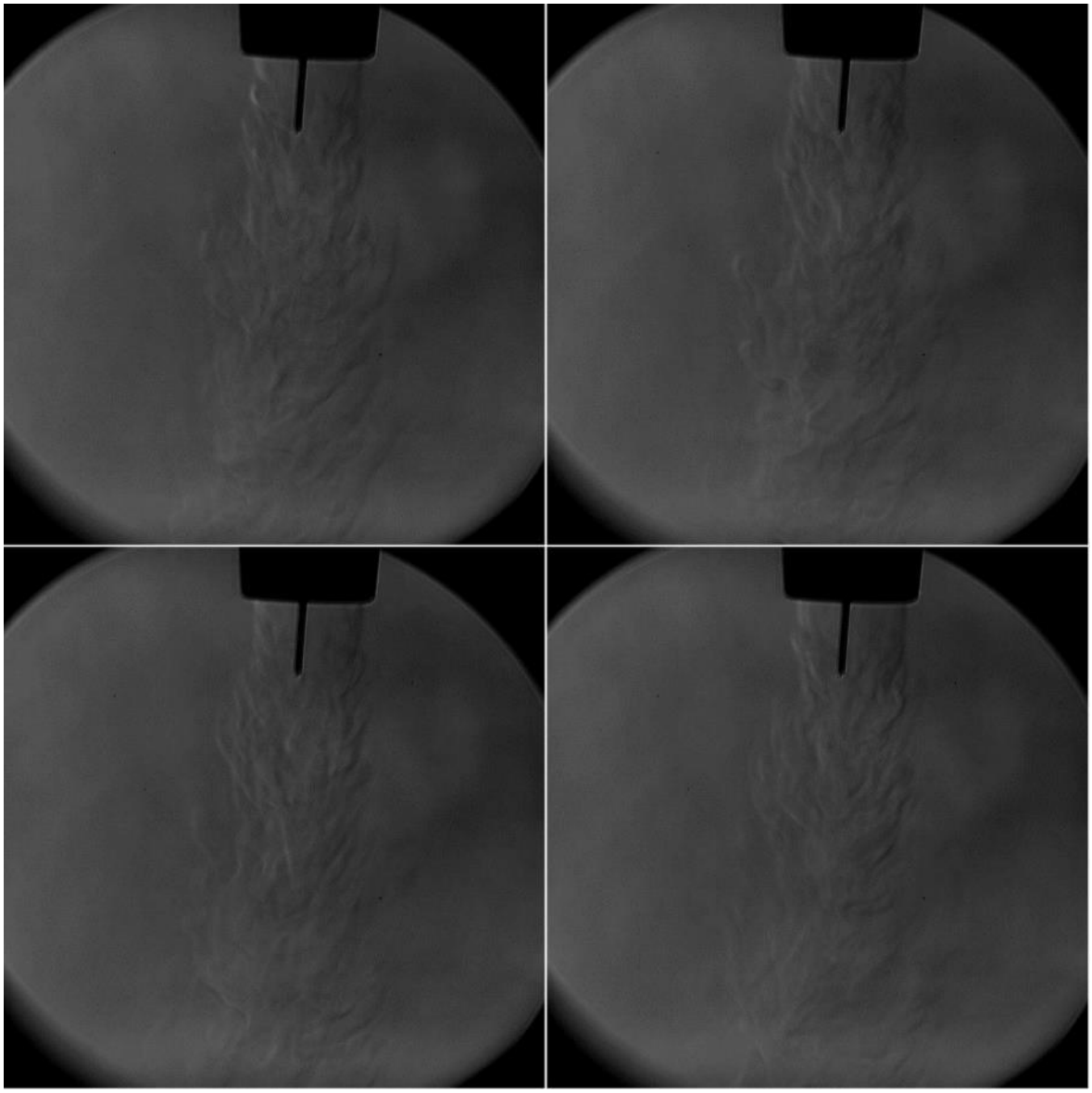
Kuva 42. Pistooli 9a:lla tutkitut kaasusuuttimet.

Pistooli 2 päätettiin kuvata koesarjan 1 vapaan virtauksen kokeessa ja koesarjan 3 hitsauskokeessa lisäksi ilman lisädiffuusoria. Pistooli 2:n virtasuuttimenpidin ja virtasuutin muistuttavat hyvin paljon pistooli 9a:n ja 9b:n virtasuutinta ja virtasuuttimenpidintä. Kokeilla haluttiin selvittää, vaikuttaako virtasuuttimen, virtasuuttimenpitimen ja kaasusuuttimen muodot merkittävästi suojakaasun virtaukseen. Kuvassa 43 on esitetty pistooli 2 ja pistooli 9a rinnakkain. Pistooli 2:sta on poistettu lisädiffuusori.

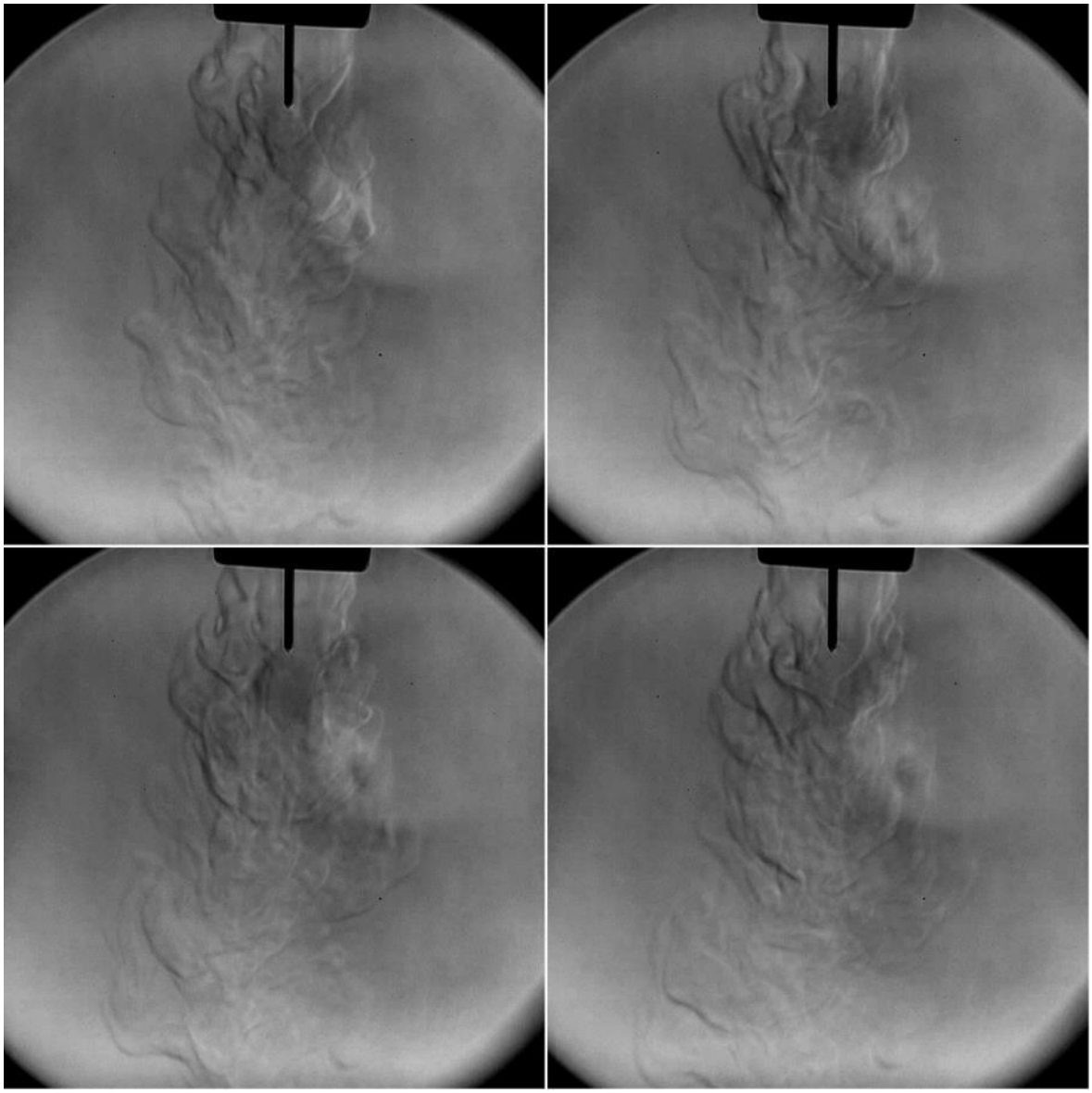
Kuva 43. Vasemmalla pistooli 9a ja oikealla pistooli 2, josta on poistettu lisädiffuusori.

5.4 Koesarja 1

Koesarjassa 1 tutkittiin hitsauspistoolien kaasuvirtausta suojakaasun virratessa pistoolin läpi vapaaseen ilmaan. Kaikkien euro-liittimellä varustettujen hitsauspistoolien kuvaamiseen käytettiin kone 6:tta. Erikoisliittimillä varustetut hitsauspistoolit testattiin niiden omilla koneillaan. Erikoisliittimillä varustettuja pistooleita olivat kaikki hitsauskone 7:lle suunnitellut pistoolit, sekä pistooli 2. Schlieren-kokeista koostetut kuvasarjat ovat nähtävissä liitteessä II. Kuvassa 44 on esitetty kuvasarja pistooli 6:n kaasuvirtauksesta koesarjassa 1 ja kuvassa 45 on esitetty pistooli 9b varustettuna suuttimella IV koesarjassa 1.



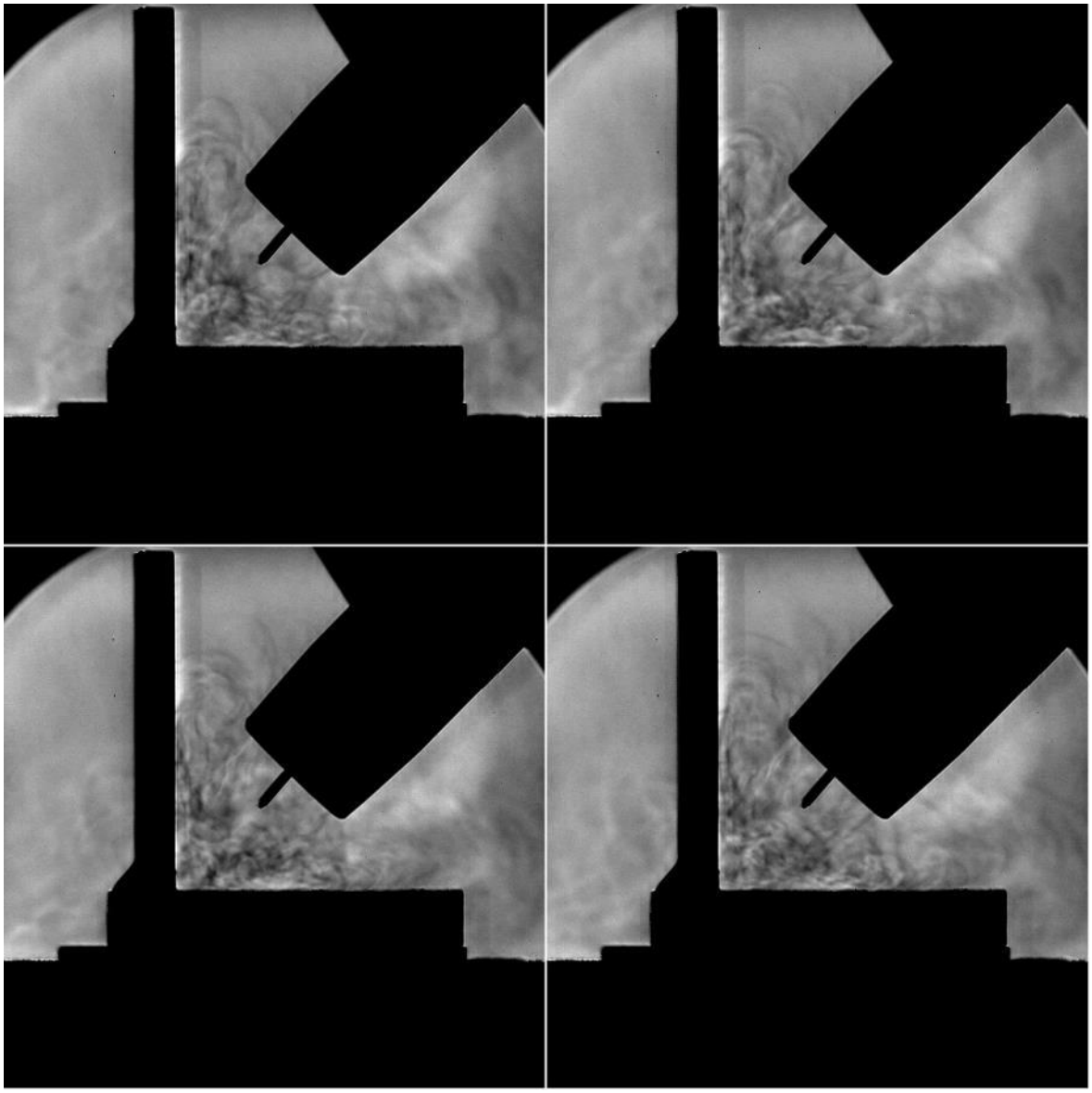
Kuva 44. Koe 1.6. Kuvasarja pistooli 6:n kaasuvirtauksesta.



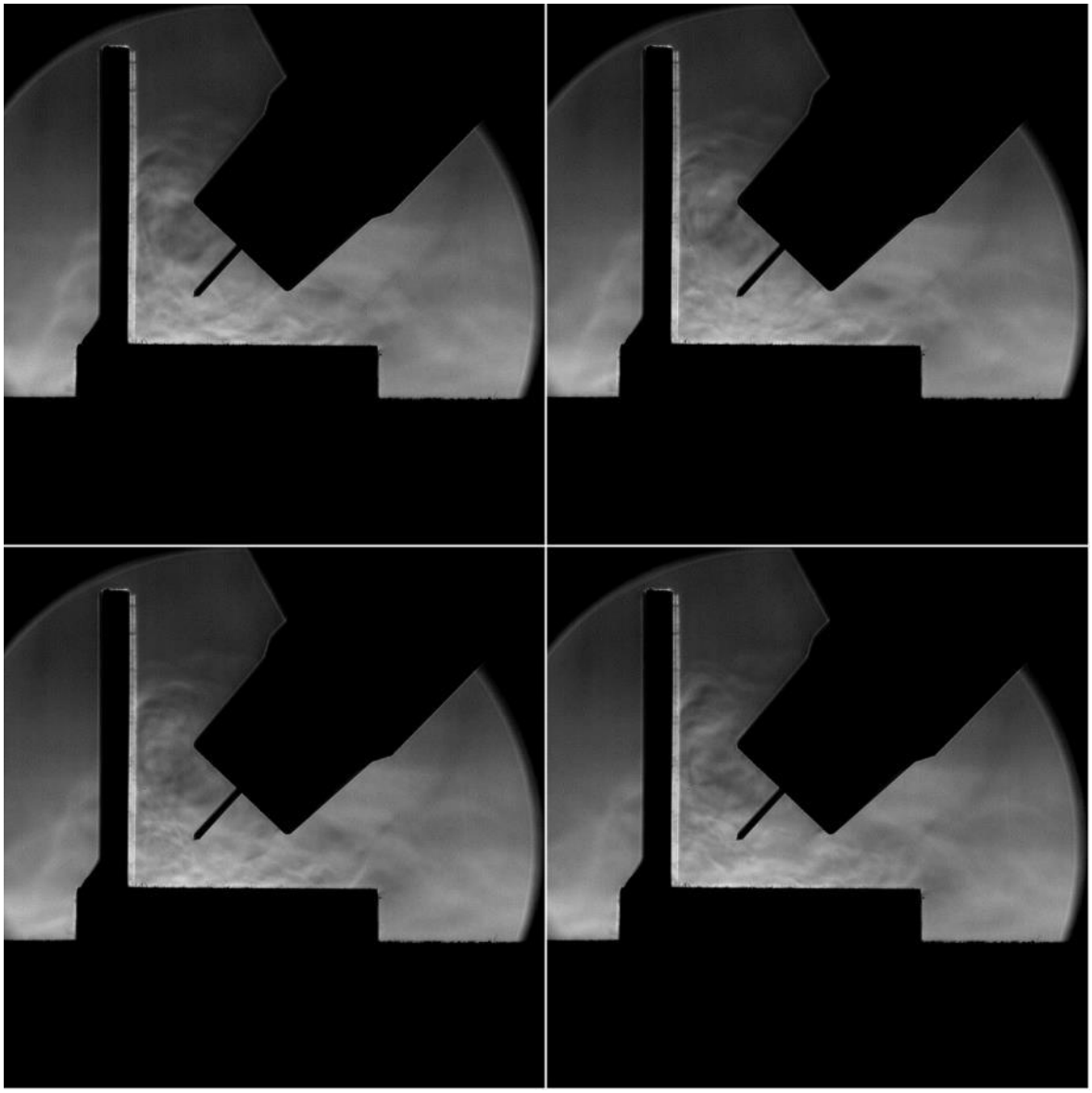
Kuva 45. Koe 1.13. Kuvasarja pistooli 9b:n kaasuvirtauksesta. Pistooli varustettiin kaasusuuttimella IV.

5.5 Koesarja 2

Koesarjassa 2 tutkittiin suojakaasuvirtauksen käyttäytymistä pienahitsaustilanteessa ilman hitsausvalokaarta. Hitsauspistoolien etäisyys pienan ylä- ja alalevyistä mitattiin suurnopeuskameran ohjelmiston mittaustoiminnolla ja pistoolien kaasusuuttimet asetettiin 10 mm:n etäisyydelle vaaka- ja pystylevyistä. Koesarjan 2 schlieren-kuvasarjat ovat nähtävissä liitteessä III. Kuvassa 46 on esitetty kuvasarja pistooli 6:n kaasuvirtauksesta koesarjassa 2 ja kuvassa 47 on esitetty Kaasusuuttimella IV varustetun pistooli 9b:n kaasuvirtaus koesarjassa 2.



Kuva 46. Koe 2.6. Pistooli 6:n kaasuvirtaus pienakokeessa.



Kuva 47. Koe 2.13. Pistooli 9b:n kaasuvirtaus pienakokeessa. Pistooli varustettiin kaasusuuttimella IV.

5.6 Koesarja 3

Koesarjassa 3 kuvattiin suojakaasuvirtausta schlieren-laitteistolla hitsauksen aikana. Kokeissa hitsattiin noin 5 cm:n pituinen palko ruostumattoman teräslevyn päälle jalkoasennossa käsinhitsauksena. Hitsauskokeissa käytettiin eri valmistajien hitsauskoneita niiden omilla pistooleilla. Hitsauksen jälkeen hitsauskoneiden ilmoittamat todelliset hitsausarvot tallennettiin. Hitsauskoneisiin liitettiin virran ja jännitteen mittauslaitteistot, joiden avulla saatiin virta- ja jännitekäyrät näkymään suurnopeuskameran kuvissa.

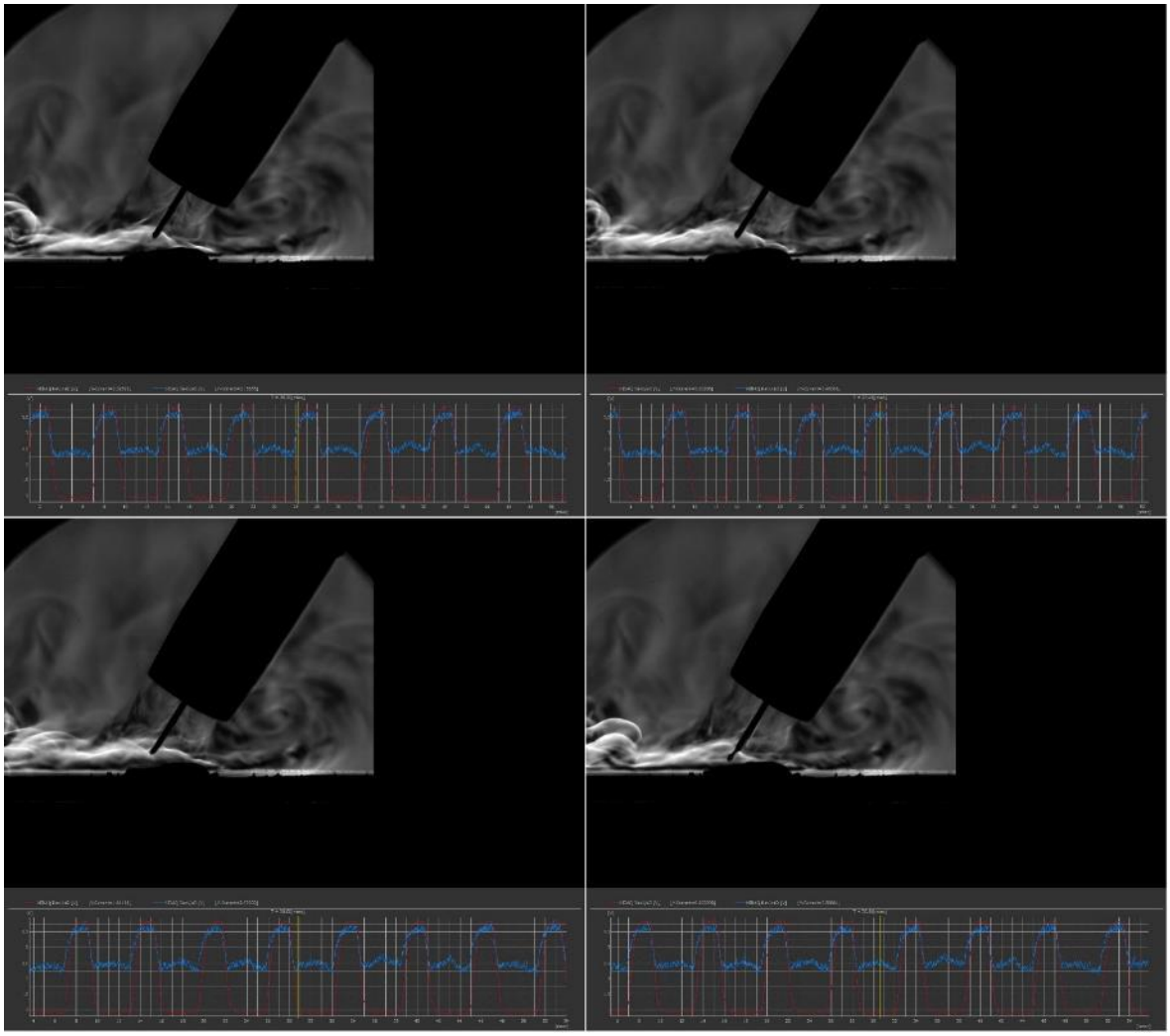
Kaikissa hitsauskokeissa asetettiin langansyöttönopeudeksi 7,5 m/min, jolloin virta on noin 200 A, riippuen hitsauskoneen valmistajasta ja mallista. Jännitteen hienosäätö pidettiin neutraalissa asennossa, mutta joidenkin hitsauskoneiden kanssa hienosäätöä jouduttiin käyttämään oikosuluttoman hitsauksen saavuttamiseksi. Taulukossa 2 on kokeissa käytetyt hitsausparametrit. Parametrit ovat todellisia hitsausparametreja, jotka tarkastettiin hitsauskoneesta hitsauksen jälkeen. Joissain hitsauskoneissa ei ollut parametrien mittaustoimintoa, jolloin taulukkoon merkittiin vain koneeseen asetetut hitsausparametrit.

Taulukko 2. Koesarjassa 3 käytetyt toteutuneet hitsausarvot. Viivalla merkittyjä parametreja ei mitattu.

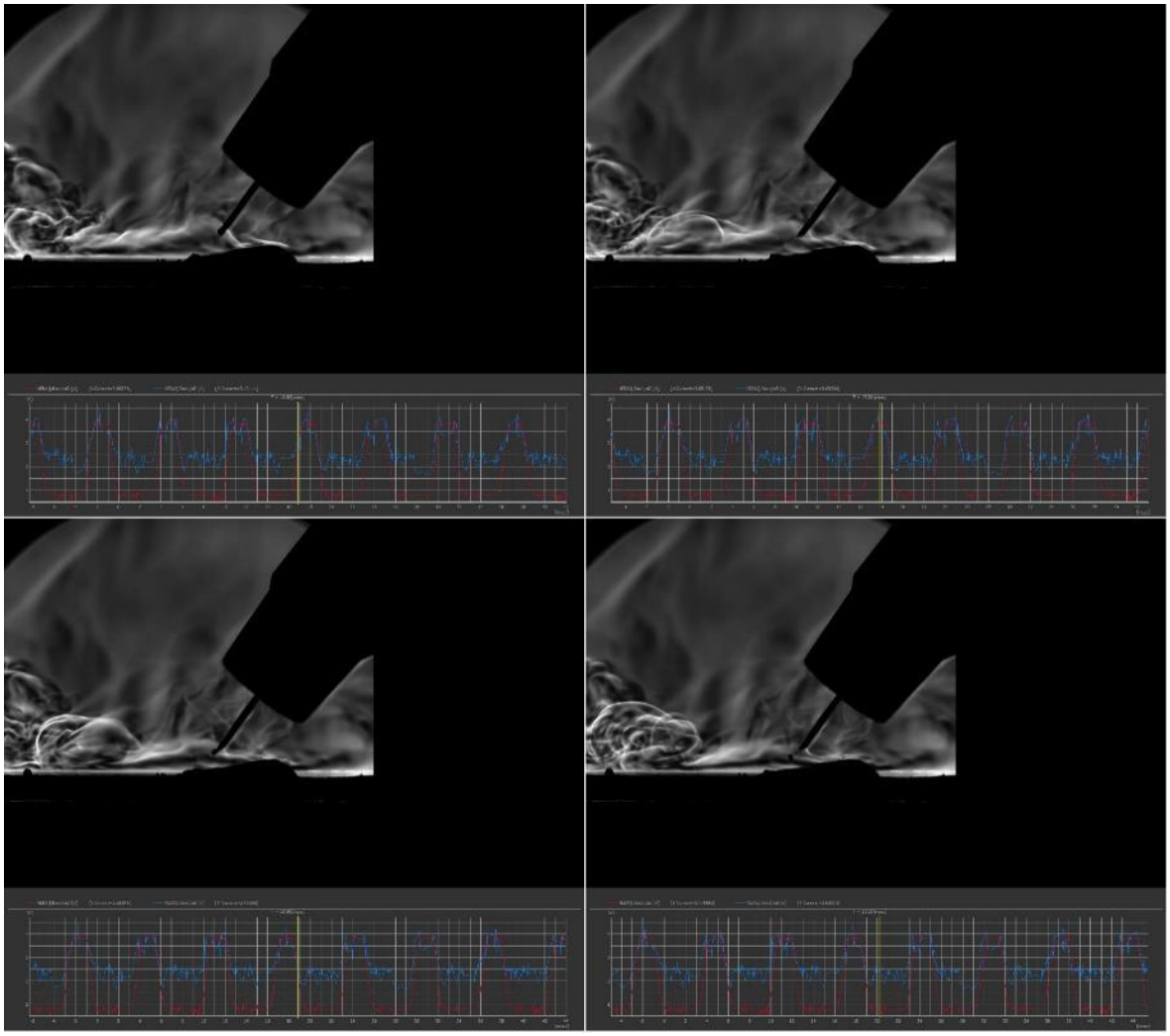
Numero	Valmistaja	Hitsauspistooli-malli	Hitsauskone	Langansyöttö-nopeus [m/min]	Virta [A]	Jännite [V]
1	Valmistaja 1	Pistooli 1	Kone 1	7,5	202	25,5
2	Valmistaja 2	Pistooli 2	Kone 2	7,5	183	24,3
3	Valmistaja 2	Pistooli 3	Kone 3	7,5	165	24,6
4	Valmistaja 3	Pistooli 4	Kone 4	7,5	-	-
5	Valmistaja 4	Pistooli 5	Kone 5	7,5	174	32,1
6	Valmistaja 5	Pistooli 6	Kone 6	7,4	193	25,6
7	Valmistaja 5	Pistooli 7	Kone 7	7,1	183	27,2
8	Valmistaja 5	Pistooli 8	Kone 7	7,4	188	26,0
9	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin I	Kone 7	7,2	175	26,5
10	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin II	Kone 7	7,4	171	26,2
11	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin III	Kone 7	7,2	173	26,8

12	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin IV	Kone 7	7,1	175	26,9
13	Valmistaja 5	Pistooli 9b	Kone 7	7,4	174	25,9
14	Valmistaja 2	Pistooli 2 ilman lisädiffuusoria	Kone 2	7,5	185	24,2
15	Valmistaja 5	Pistooli 10	Kone 7	7,3	171	26,4
16	Valmistaja 5	Pistooli 9a lisädiffuusorilla	Kone 7	7,2	177	26,8
17	Valmistaja 5	Pistooli 9b lisädiffuusorilla	Kone 7	7,2	167	26,7
18	Valmistaja 5	Pistooli 9b diffuusori 2:lla	Kone 7	7,2	167	26,7
19	Valmistaja 5	Pistooli 10 diffuusori 2:lla	Kone 7	7,3	178	26,3

Koesarjan 3 schlieren-kuvista koostetut kuvasarjat ovat nähtävissä liitteessä IV. Jokaisen kuvasarjan kuvan alapuolella on virta- ja jännitekäyrät, joissa hitsausvirta on merkitty punaisella ja jännite sinisellä käyrällä. Kuvasarjan kuvat on otettu virran nousuvaiheessa, virran huippuvaiheessa, virran laskuvaiheessa ja pohjavirtavaiheessa, jolloin virtapulssista johtuva kaaripaineen nousu ja pisaran irtoaminen näkyvät vaiheittain. Hitsaussuunta kuvasarjoissa on oikealta vasemmalle. Kaaripaineen suureneminen aiheuttaa suojakaasun pöllähtämisen. Kuvassa 48 on esitetty kuvasarja pistooli 6:n kaasuvirtauksesta koesarjassa 3 ja kuvassa 49 on esitetty kaasusuuttimella IV varustetun pistooli 9b:n kaasuvirtaus koesarjassa 3.



Kuva 48. Koe 3.6. Pistooli 6 hitsauskokeessa.



Kuva 49. Koe 3.13. Pistooli 9b hitsauskokeessa. Pistooli varustettiin kaasusuuttimella IV.

5.7 Koesarja 4: Hitsauskokeet

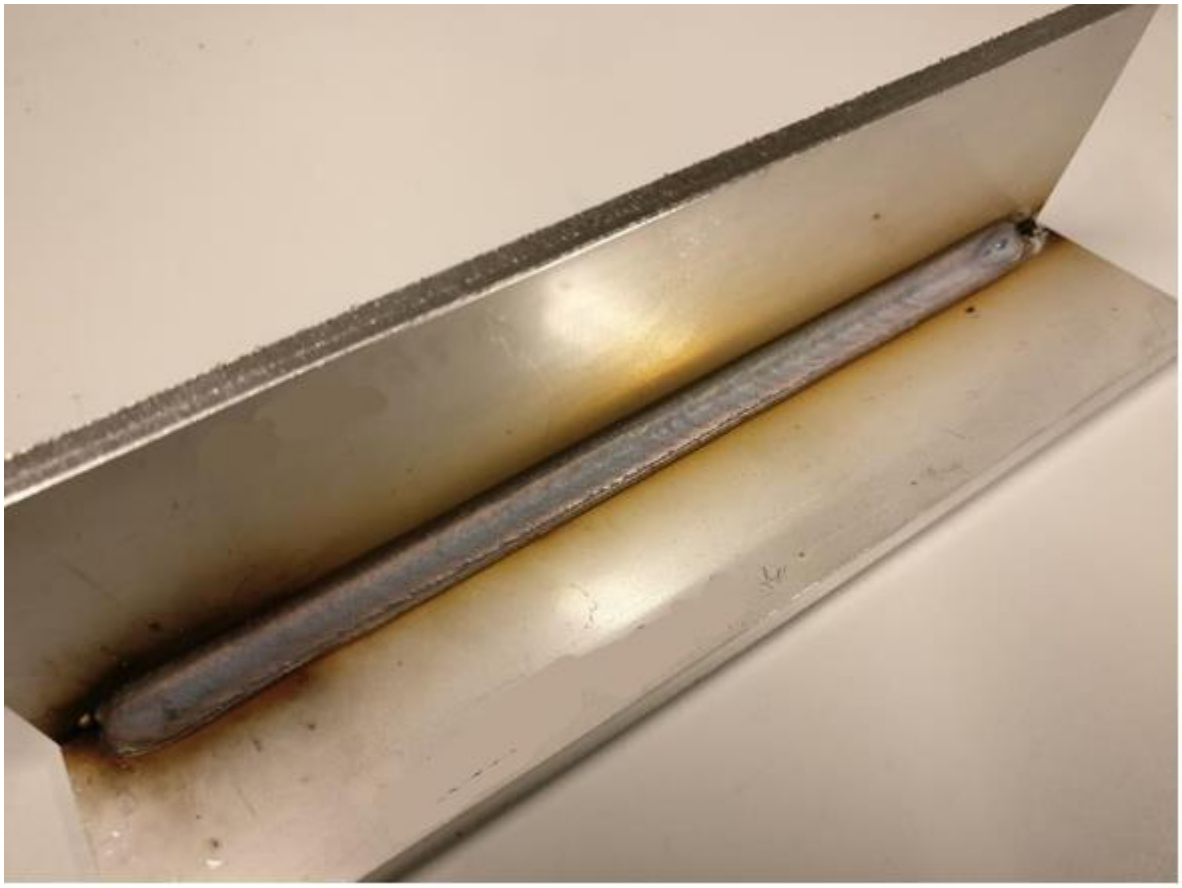
Hitsauskokeilla pyrittiin selvittämään, voidaanko schlieren-kuvauksella luotettavasti tulkita kaasuvirtauksen olevan hyvä ja tiivis, tai niin pyörteinen, että kaasuvirtauksen vajavaisuus aiheuttaa hitsausvirheitä. Hitsauskokeissa eri valmistajien pistoolimallit kuvattiin omilla hitsauskoneillaan. Kokeissa käytettiin apuna pistoolinkuljetinta, joihin hitsauspistooli kiinnitettiin. Pistooli suunnattiin pienaan 45º kulmaan ja hitsaus suoritettiin 10º työntävällä poltinkulmalla. Vapaalanganpituudeksi asetettiin kaikissa kokeissa 15 mm. Hitsausnopeus oli kaikissa kokeissa 0,475 m/min. Taulukkoon 3 on koottu hitsauskokeissa käytetyt parametrit. Parametrit ovat todellisia hitsausparametreja, jotka tarkastettiin hitsauskoneesta hitsauksen jälkeen. Joissain hitsauskoneissa ei ollut parametrien mittaustoimintoa, jolloin taulukkoon merkittiin vain koneeseen asetetut hitsausparametrit.

Taulukko 3. Hitsauskokeissa käytetyt toteutuneet hitsausarvot. Viivalla merkittyjä parametreja ei mitattu.

Numero	Valmistaja	Hitsauspistooli-malli	Hitsauskone	Langansyöttö-nopeus [m/min]	Virta [A]	Jännite [V]
1	Valmistaja 1	Pistooli 1	Kone 1	7,5	217	24,7
2	Valmistaja 2	Pistooli 2	Kone 2	7,5	232	23,6
3	Valmistaja 2	Pistooli 3	Kone 3	7,5	216	22,0
4	Valmistaja 3	Pistooli 4	Kone 4	7,5	-	-
5	Valmistaja 4	Pistooli 5	Kone 5	7,3	229	26,2
6	Valmistaja 5	Pistooli 6	Kone 6	7,5	207	23,5
7	Valmistaja 5	Pistooli 7	Kone 7	7,5	235	25,0
8	Valmistaja 5	Pistooli 8	Kone 7	7,5	240	25,1
9	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin I	Kone 7	7,5	237	25,2
10	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin II	Kone 7	7,5	239	24,8
11	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin III	Kone 7	7,5	250	24,8
12	Valmistaja 5	Pistooli 9a, kaasusuutin IV	Kone 7	7,5	239	25,0
13	Valmistaja 5	Pistooli 9b	Kone 7	7,5	251	24,8
14	Valmistaja 2	Pistooli 2 ilman lisädiffuusoria	Kone 2	7,5	234	23,7
15	Valmistaja 5	Pistooli 10	Kone 7	7,5	239	24,8
16	Valmistaja 5	Pistooli 9a lisädiffuusorilla	Kone 7	7,5	239	24,8

17	Valmistaja 5	Pistooli 9b lisädiffuusorilla	Kone 7	7,5	239	25,1
18	Valmistaja 5	Pistooli 9b diffuusori 2:lla	Kone 7	7,5	234	24,7
19	Valmistaja 5	Pistooli 10 diffuusori 2:lla	Kone 7	7,5	247	24,8

Koesarjan 4 hitsauskokeiden koekappaleista otetut valokuvat ovat liitteessä V. Kuvassa 50 on esitetty pistooli 6:lla hitsattu koekappale ja kuvassa 51 on esitetty kaasusuuttimella IV varustetulla pistooli 9b:llä hitsattu koekappale.



Kuva 50. Koe 4.6. Pistooli 6:lla hitsattu koekappale.

Kuva 51. Koe 4.13. Pistooli 9b:llä hitsattu koekappale. Kokeessa käytettiin kaasusuutin IV:ää.

6 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Tehtyjen kokeiden perusteella schlieren-kuvaus soveltuu erinomaisesti hitsauspistoolien kaasuvirtauksien tutkimiseen sekä ilman hitsausvalokaarta, että hitsausvalokaaren palaessa. Vaikka hitsausvalokaari synnyttää hyvin paljon voimakasta säteilyä, voidaan kaistanpäästösuotimen ja harmaasävysuotimen avulla, kameran lyhyellä valotusajalla, sekä kameran kuvan oton ja laserin pulssin tahdistuksella suodattaa kaikki valosaaste pois kuvista, jolloin hitsausvalokaari jää täysin näkymättömäksi.

Koesarjat 1 ja 3 osoittautuivat tehokkaiksi työkaluiksi suojakaasuvirtauksen tutkimisessa. Koesarja 2 taas ei tarjonnut merkittävää informaatiota kaasusuojauksesta. Koesarjassa 2 suojakaasu kerääntyy pienaan ja muodostaa leveän kaasurintaman kuvausalueen syvyyssuunnassa, jolloin kaasun virtausilmiöiden näkyvyys huononee.

6.1 Koesarja 1

Koesarja 1 oli tehokkain työkalu suojakaasuvirtauksen tarkasteluun. Kuvissa näkyy hyvin virtauksen pyörteily. Myös virtauksen pyörteilyn luonne on hyvin nähtävissä kuvissa. Joidenkin pistoolien suojakaasuvirtauksessa syntyi pyörteitä, jotka voivat kaapata ilmaa syvälle kaasupatsaan sisään. Esimerkiksi pistooli 9:n molemmat versiot synnyttivät hajanaisen kaasupatsaan, joka vetää herkästi ilmaa hitsaustapahtumaan. Joidenkin pistoolien kaasuvirtaus taas pysyi selkeäreunaisena kaasupatsaana. Koesarjan 1 kuvissa teräväreunaiset ja selkeät kontrastierot kertovat jyrkistä taitekerroineroista kuvausalueella. Jyrkkiä taitekerroineroja aiheuttaa voimakas turbulenssi, jossa virtauksen tiheys vaihtelee paikallisesti.

Kokeissa 1.1–1.5 Kuvattiin valmistaja 1:n, valmistaja 2:n, valmistaja 3:n ja valmistaja 4:n hitsauspistoolien kaasuvirtauksia schlieren-menetelmällä virtauttamalla suojakaasua pistoolien läpi vapaaseen ilmaan. Kokeessa 1.1. tutkittiin valmistaja 1:n pistooli 1:n suojakaasuvirtausta. Pistoolin tuottama suojakaasupatsas pysyy hyvin koossa, eli suurempia ilmaa kaasupatsaaseen koukkaavia pyörteitä ei esiinny. Virtaus on myös kauttaaltaan tasainen pyörteisyydeltään. Virtauksessa alkaa esiintyä pyörteitä noin 2 cm:n etäisyydellä kaasusuuttimen aukosta. Kokeen 1.2. Pistooli 2:n kaasuvirtaus oli koesarjan vähiten

pyörteilevä, sillä kaasupatsaan sisällä näkyy vain vähän voimakkaasta pyörteilystä kertovia selkeitä kontrastieroja. Kaasupatsaan reunoilla noin 2 cm:n päässä kaasusuuttimen päästä näkyy toisaalta pyörteitä, jotka koukkaavat huoneilmaa melko lähelle kaasupatsaan keskilinjaa. Kokeen 1.3. pistooli 3:n kaasuvirtaus oli melko lähellä kokeen 1.2. Pistooli 2:n kaasuvirtausta. Verrattuna Pistooli 2:een, pistooli 3:n suojakaasuvirtauksessa on hieman enemmän pyörteilyä. Toisaalta kokeen 1.3. pistooli 3:n suojakaasupatsaan reunat ovat suoremmat, kuin kokeen 1.2. pistooli 2:n kaasusuojassa, eli suuria pyörteitä ei esiinny.

Kokeessa 1.4. kuvattiin pistooli 4:n kaasuvirtausta. Kaasuvirtaus on hyvin epätasainen. Kaasupatsaan oikealla puolella näkyy pyörteitä ja selkeitä kontrastieroja, mutta vasemmalla puolella pyörteilyä on vähemmän ja kontrastierot ovat pienempiä. Virtauksen epätasaisuus voi johtua kaasusuuttimen kiinnityksestä. Pistooli 4:n kaasusuutin kiinnittyy virtasuuttimenpitimen ja diffuusorin ympärille kierteillä kiinnitettävään holkkiin. Holkissa on kolme jousta, jotka pitävät kaasusuuttimen kiinni pistoolissa. Kaasusuutin pääsee kääntymään vinoon virtasuuttimeen nähden, jolloin myös kaasuvirtauksesta tulee epäsymmetrinen. Kokeessa 1.5. Tutkittiin pistooli 5:n kaasuvirtausta. Myös valmistajan 4 pistooli 5:n kaasupatsaassa on havaittavissa epäsymmetrisyyttä. Kaasupatsaan oikealla puolella on suurempia pyörteitä ja vasemmalla puolella tiheämpää pyörteilyä. Kaasupatsaan oikean puolen tiheä ja nopea pyörteily johtuu suojakaasuvuodosta. Suojakaasu vuotaa kaasusuuttimen sisälle pienestä reiästä, jolloin kaasun virtausnopeus kasvaa ja virtaus alkaa pyörteilemään voimakkaasti. Kaasu päässee vuotamaan muovisen diffuusorin ja virtasuuttimen välistä. Pistooli 5:n diffuusori kiinnitetään kierrekiinnityksellä hitsauspistoolin runkoon yläpäästään, jolloin diffuusorin ja virtasuuttimen väliin jää rako, josta kaasu pääsee vuotamaan. Kierre on kaasun virtaussuunnassa kaasun tuloaukon yläpuolella, jolloin diffuusorin ja virtasuuttimen välistä tuleva suojakaasuvuoto suuntautuu ulos kaasusuuttimesta. Esimerkiksi pistooli 2:ssa diffuusori kiinnittyy kierrekiinnityksellä kaasun virtaussuunnassa virtausaukkojen alapuolelle, jolloin suojakaasu ei pääse vuotamaan diffuusorin ja virtasuuttimenpitimen välistä. Pistooli 2:n diffuusori kiinnittyy myös yläpäästään tiukasti muovista eristettä vasten.

Kokeessa 1.6. tutkittiin Pistooli 6:n kaasuvirtausta ja kokeessa 1.7. pistooli 7:n kaasuvirtausta. pistooli 7 on hitsauskone 7:lle suunniteltu versio pistooli 6:sta. Pistooli 6:n kaasusuuttimen takaosassa olevien suuttimen puristuskiinnityksessä käytettävien hahlojen

välistä vuotaa hyvin paljon suojakaasua kaasusuuttimen ulkopuolelle. Vuodon vuoksi kaasusuuttimen päästä ei voitu mitata kaasun tilavuusvirtaa luotettavasti, joten kaasusuuttimen hahlot päätettiin tukkia teippaamalla suutin alumiiniteipillä. Kokeen 1.6. pistooli 6:n kaasuvirtaus oli melko pyörteinen. Kaasupatsaassa näkyy selkeäreunaisia kontrastieroja ja pyörteitä alkaa näkyä kaasupatsaassa heti kaasun tullessa ulos kaasusuuttimesta. Kaasupatsaan reunat pysyvät kuitenkin ehjinä, eikä suuria kaasupatsaan keskelle ilmaa koukkaavia pyörteitä esiinny. Ilma voi kuitenkin kulkeutua hitsaustapahtumaan myös pienempien pyörteiden mukana ja ennen kaikkea imeytyä kaasuvirtaukseen kaasusuuttimen vuotokohdista. Kokeen 1.6. kuvat eivät vastaa todellisen hitsaustilanteen kaasuvirtausta kaasusuuttimen vuotojen teippauksen vuoksi.

Kokeessa 1.7. tutkitussa pistooli 7:ssä samaa vuoto-ongelmaa ei ole lyhyempien kaasusuuttimen hahlojen ja pidemmän kaasusuuttimen kiinnittymispinnan vuoksi. Pistooli 7:n kaasuvirtaus on hyvin samanlainen kuin pistooli 6:ssa. Eron kaasuvirtauksen käyttäytymiseen tekee kuitenkin pistooli 7:ssä käytetty suurempi kaasusuutin. Pistooli 7:n kuormitettavuus on 500 A ja pistooli 6:n kuormitettavuus on 400 A, joten pistooli 7 on pistooli 6:ta suurempi ja käyttää suurempaa kaasusuutinta. Tilavampi kaasusuutin ei kiihdytä kaasun virtausnopeutta kuten pistooli 6:n kaasusuutin, jolloin pyörteet pääsevät koukkaamaan syvemmälle kaasupatsaaseen.

Kokeessa 1.8. tutkittiin pistooli 8:n kaasusuojaa. Kaasu virtaa kaasusuuttimesta melko tasaisesti ja pyörteitä alkaa esiintyä kaasupatsaan keskiosissa vasta noin 1 cm:n päässä kaasusuuttimen aukosta. Kaasupatsas hajoaa epätasaisen muotoiseksi noin 5 cm:n päässä kaasusuuttimen aukosta. Tästä kaasuvirtauksen hajoamisesta ei kuitenkaan ole haittaa todellisessa hitsaustilanteessa, sillä tyypillisesti kaasusuuttimen etäisyys työkappaleesta on vain muutamia senttimetrejä.

Kokeissa 1.9–1.12 tutkittiin pistooli 9a:ta neljällä erilaisella kaasusuuttimella. Tutkitut kaasusuutinmallit olivat kokeen 1.9. suutin I, jonka aukon halkaisija oli 15 mm ja aukon reuna oli pyöristetty, kokeen 1.10. Suutin II, jonka aukon halkaisija oli 17 mm ja aukon reuna oli terävä, kokeen 1.11. suutin III, jonka aukon halkaisija oli 18 mm ja reuna oli terävä, sekä kokeen 1.12. suutin IV, jonka aukon halkaisija oli 18 mm ja reuna oli pyöristetty. Pistooli 9a:n tuottama suojakaasuvirtaus oli kaikilla suuttimilla kauttaaltaan hyvin pyörteinen ja

hajanainen. Suojakaasuvirtauksessa oli nähtävissä voimakkaita kontrastieroja, jotka kertovat voimakkaasta turbulenssista. Suojakaasupatsas levisi kaasusuutinta leveämmäksi jo muutamien senttimetrien etäisyydellä kaasusuuttimesta. Suojakaasuvirtaus tuli kaasusuuttimesta pyörteisenä ulos heti suuttimen aukosta lähtien, joten suojakaasun voidaan päätellä pyörteilevän voimakkaasti myös kaasusuuttimen sisällä. Kaasusuutinkokeiden perusteella voidaan päätellä, että pistooli 9a:n virtauksen pyörteily ei johdu kaasusuuttimen ulostuloaukon halkaisijasta, vaan kaasusuuttimen sisäpinnan ja virtasuuttimenpitimen välisestä poikkipinta-alasta, tai kaasunhajottajan reikien koosta ja määrästä ja kaasunhajottajan tilavuudesta. Testisuuttimista valittiin suutin IV pistooli 9a:lla ja 9b:llä tehtäviin jatkokokeisiin. Suurempi kaasusuuttimen aukon halkaisija tekee aiempien testien perusteella kaasusuojan herkemmäksi pyörteille, jolloin kaasupatsas hajoaa tai muuttuu epäsäännölliseksi vähemmästä turbulenssista.

Kokeessa 1.13. tutkittiin pistooli 9b:n kaasuvirtausta. Pistooli oli varustettu kaasusuutin IV:llä. Kuten pistooli 9a:n virtaus, oli 9b:n virtaus myös hyvin pyörteinen ja suojakaasupatsas epäsäännöllinen. Kaasupatsaan reunoille syntyi suuria kaasupatsaan muodon rikkovia pyörteitä ja myös kaasupatsaan sisällä näkyi hyvin voimakasta turbulenssia. Pistooli 9a ja 9b eroavat toisistaan päätemuoviholkin kaasukanavan osalta. Pistooli 9a:ssa on kahdeksan erillistä kanavaa, joita pitkin suojakaasu virtaa diffuusorin sisälle, kun pistooli 9b:ssä kanavia ei ollut, vaan suojakaasu pääsi jakautumaan vapaasti diffuusorin sisälle. Kokeiden 1.9.–1.13. perusteella suojakaasukanavan diffuusoria edeltävillä muodoilla ei ole vaikutusta suojakaasun virtaukseen alkuperäisellä messinkisellä diffuusorina toimivalla virtasuuttimenpitimellä varustetuissa pistooli 9:n versioissa.

Kokeessa 1.14. tutkittiin pistooli 2:n kaasuvirtausta, kun pistoolista oli poistettu muovinen lisädiffuusori. Kokeella selvitettiin, vaikuttaako kaasusuuttimen, virtasuuttimen ja virtasuuttimenpitimen välinen poikkipinta-ala merkittävästi kaasuvirtaukseen. Pistooli 2:n, pistooli 9a:n ja 9b:n virtasuuttimenpitimet ja virtasuuttimet ovat ulkomuodoltaan melko samankaltaisia. Pistoolien 9a ja 9b -hitsauspistoolien kaasusuutin II:ssa on samankokoinen ulostuloaukko kuin pistooli 2:n suuttimessa. Myös pistooli 2:n ja pistoolien 9a ja 9b suutin II:n sisähalkaisijat ovat likimain samat. Ilman diffuusoria pistooli 2:n kaasuvirtaus muuttuu selvästi turbulenttisemmaksi. Kaasuvirtaus on pyörteinen jo tullessaan ulos kaasusuuttimesta. Kaasupatsas pysyy kuitenkin hyvin kasassa. Pistoolien 9a, 9b ja

diffuusorittoman pistooli 2:n välillä on silti merkittävä ero, mikä ei kokeen perusteella selity kaasusuuttimen, virtasuuttimen ja virtasuuttimenpitimen välisillä muodoilla. Pistoolien 9a ja 9b virtauksen pyörteily johtuu siis diffuusorin ja pistoolin sisäisten kaasukanavien muotoilusta.

Kokeessa 1.15. tutkittiin pistooli 10:n kaasuvirtausta. Pistooli 10 on matalamman kuormitettavuuden versio pistooli 9:stä. Pistooli 10:n pää on kapeampi ja pistooli 10 käyttää kapeampaa ja lyhyempää kaasusuutinta kuin pistoolit 9 a ja 9b. Pistooli 10:ssä käytetään samoja virtasuuttimia ja diffuusoreja kuin suuremmissa 9a ja 9b -pistooleissa. Pistooli 10:n kaasukanava on samanlainen kuin pistooli 9a:ssa, eli kaasu kulkee diffuusoriin kahdeksan kanavan kautta. Pistoolin tuottama kaasuvirtaus on tasaisempi kuin 500 A:n malleissa. Vaikka virtauksessa on pyörteitä, ei kaasupatsas hajoa samoin kuin pistooli 9a:ssa ja 9b:ssä. Eron voidaan päätellä johtuvan kapeammasta kaasusuuttimesta. Kaasusuuttimen, virtasuuttimenpitimen ja virtasuuttimen välinen poikkipinta-ala on pienempi kuin pistooleissa 9a ja 9b, jolloin suojakaasun virtausnopeus on suurempi. Kaasu purkautuu nopeammin ulos suuttimesta, jolloin kaasupatsas pysyy kasassa virtauksen voimakkaasta pyörteilystä huolimatta. Kapean poikkipinta-alan aiheuttama virtausnopeuden nousu aiheuttaa kuitenkin omalta osaltaan myös lisää turbulenssia.

Kokeessa 1.16. tutkittiin pistooli 9a:n kaasuvirtausta, kun alkuperäisen messinkisen diffuusorin päälle kiinnitettiin muovinen lisädiffuusori. Kaasusuuttimena kokeessa käytettiin kaasusuutin IV:ää. Kokeen perusteella lisädiffuusori parantaa kaasuvirtausta. Kokeessa 1.12. todettiin pistooli 9a:n virtauksen olevan erittäin pyörteinen ja kaasupatsaan hajoavan jo muutamien senttimetrien päässä kaasusuuttimen aukosta. Kokeessa 1.16. käytetty lisädiffuusori vähentää suojakaasun pyörteilyä ja siten parantaa kaasupatsaan pysyvyyttä. Kaasuvirtaus on kuitenkin edelleen hyvin pyörteinen ja kaasupatsas epäsymmetrinen ja reunoiltaan hajanainen.

Kokeissa 1.17a. ja 1.17b. tutkittiin pistooli 9b:n kaasuvirtausta, kun pistoolin alkuperäisen messinkisen diffuusorin päälle kiinnitettiin lisädiffuusori. Kokeessa 1.17a. huomattiin suojakaasun vuotavan lisädiffuusorin ja virtasuuttimen välistä. Pistoolia päätettiin testata myös vuodot tukittuina kokeessa 1.16b. Hitsauspistoolia ei voitu testata hitsauskokeissa vuodot tukittuna teipin heikon lämmönkeston vuoksi. Kokeessa 1.17a. huomattiin

lisädiffuusorin vuotavan suojakaasua lisädiffuusorin alapään ja virtasuuttimen välistä, samoin kuin pistooli 5 kokeessa 1.5. Kokeen 1.17a. kuvissa kaasupatsaan vasemmalla puolella on melko vähäistä pyörteilyä ja virtaus on tasainen, mutta oikealla puolella kaasuvuoto aiheuttaa erittäin voimakasta turbulenssia. Kokeessa 1.17b. vuoto tukittiin, jolloin virtaus muuttui kauttaaltaan turbulenttiseksi ja kaasupatsaan reunat muuttuivat hajanaisiksi. Kun lisädiffuusorin ja virtasuuttimen välistä pääsi vuotamaan suojakaasua, lisädiffuusorin sisään ei päässyt kertymään suurta painetta ylimääräisten virtausaukkojen vuoksi, jolloin suojakaasu virtasi osittain laminaarisesti ja pienellä nopeudella. Teipattaessa vuodot paine nousee lisädiffuusorin sisällä korkeaksi liian pienten lisädiffuusorin reikien vuoksi, kaasun virtausnopeus nousee korkeaksi kaasun purkautuessa rei'istä kaasusuuttimeen ja syntyy voimakasta turbulenssia. Myös lisädiffuusorin sisähalkaisijan ja alkuperäisen virtasuuttimenpitimenä toimivan diffuusorin välinen poikkipinta-ala on hyvin pieni, mikä omalta osaltaan myös kasvattaa kaasun virtausnopeutta ja turbulenttisuutta.

Kokeissa 1.18a. ja 1.18b. tutkittiin pistooli 9b:n kaasuvirtausta, kun alkuperäisen messinkisen virtasuuttimenpitimenä toimivan diffuusorin tilalle vaihdettiin diffuusori 2. Kokeessa 1.18a. huomattiin myös diffuusori 2:n vuotavan suojakaasua. Kaasupatsas oli epäsymmetrinen vasemmalla puolella ollessa enemmän turbulenssia kuin oikealla puolella. Epäsymmetrinen virtaus johtuu diffuusori 2:n ja hitsauspistoolin eristeenä toimivan päätemuoviholkin välisestä välyksestä, josta suojakaasu pääsee vuotamaan kaasusuuttimen sisälle. Vuodon vaikutus on kuitenkin vähäisempi kuin kokeissa 1.17a. ja 1.17b. tutkitussa lisädiffuusorissa. Diffuusori 2:n vuoto aiheuttaa huomattavasti vähemmän pyörteilyä kuin aiempien kokeiden lisädiffuusorin vuoto, mikä johtuu suuremmasta vuotoreiästä, sekä aiempien kokeiden lisädiffuusorin ja alkuperäisen messinkisen diffuusorin välisestä pienestä poikkipinta-alasta. Vaikka diffuusori 2 vuotaa, on kaasun virtaus silti melko tasainen ja kaasupatsas pysyy melko hyvin koossa. Vuoto kuitenkin aiheuttaa turbulenssia kuvan kaasupatsaan vasemmalle puolelle, joka rikkoo kaasupatsaan vasemman sivun muotoa ja mahdollisesti kaappaa huoneilmaa virtaukseen. Kokeessa 1.18b. vuoto diffuusorin ja muovisen eristeholkin välistä tukittiin teippaamalla, jolloin suojakaasuvirtaus muuttui kauttaaltaan hyvin turbulenttiseksi. Virtauksen raju muutos johtuu, kuten kokeessa 1.17b., diffuusorin liian pienistä rei'istä. Liian pienet diffuusorin reiät nostavat suojakaasun paineen diffuusorin sisällä korkeaksi, jolloin kaasu purkautuu diffuusorista suurella nopeudella.

Vuoto diffuusorin ja eristeholkin välistä madalsi suojakaasun painetta ja siten myös kaasun virtausnopeutta.

Kokeessa 1.19. tutkittiin pistooli 10:n kaasuvirtausta, kun pistoolin alkuperäisen messinkisen virtasuuttimenpitimenä toimivan diffuusorin tilalle vaihdettiin diffuusori 2. Pistooli 10:ssä diffuusori 2:lla ei ole niin suurta vaikutusta kuin pistooli 9b:ssä. Suojakaasu ei myöskään vuoda diffuusorin takareunan ja eristemuoviholkin välistä. Diffuusori 2 muuttaa suojakaasuvirtausta pistooli 10:ssä hieman tasaisemmaksi. Kaasuvirtauksessa näkyy edelleen selkeäreunaisia, pyörteistä kertovia kontrastieroja, mutta kaasupatsaan reunat pysyvät suorina ja rikkoutumattomina pidemmän matkan verrattuna alkuperäiseen kaasunhajottajaan. Kaasupatsas hajoaa reunoiltaan epäselväksi noin 4–5 cm:n päässä kaasusuuttimen aukosta. Pistooli 10:n päätemuoviholkissa on kahdeksan kanavaa, joita pitkin suojakaasu virtaa diffuusoriin. Pistooli 9b:ssä taas kanavia ei ole ja kaasu pääse kulkemaan diffuusoriin vapaasti. Ero pistooli 10:n ja pistooli 9b:n välillä käytettäessä diffuusori 2:ta selittyy muoviholkin muotoilulla. Muoviholkin kapeat kanavat pistooli 10:ssä aiheuttavat suojakaasun paineen nousun kaasun virtauskanavassa muoviholkin takana. suojakaasu virtaa diffuusorin sisälle ja kaasun paine laskee. Pistooleissa 9 a ja 9b taas kaasuvirtausta kuristava rakenne on diffuusorin liian pienet reiät, jolloin kaasu virtaa ulos pyörteisenä paineen päästessä kerääntymään diffuusorin sisään.

6.2 Koesarja 2

Koesarjan 2 tulokset eivät antaneet lisää tietoa hitsauspistooleiden kyvystä tuottaa tiivis kaasusuoja. Pienamuotoinen liitos kerää suojakaasun työkappaleen ja kaasusuuttimen väliin kuvausalueen syvyyssuuntaiseksi rintamaksi, jolloin kaasupatsas erottuu huonosti kaasupatsaan ympärillä olevan kaasun ja pyörteiden vuoksi. Kaikissa kuvasarjoissa on havaittavissa suojakaasupyörre, joka muodostuu pienan pystylevyn ja kaasusuuttimen yläreunan väliin. Suojakaasupyörre pyörii kuvasarjoissa myötäpäivään. Pyörre mahdollistaa huoneilman imeytymisen lähelle varsinaista suojakaasupatsasta, mutta suojakaasun virtaus kohti hitsauskohtaa syrjäyttää pyörteen mukana tulevan ilman. Kuitenkin jos suojakaasupatsas on hyvin hajanainen ja pyörteinen, on mahdollista, että pyörteen mukana tuleva ilma pääsee kosketuksiin hitsisulan kanssa pienaliitoksen suojakaasua kokoavasta vaikutuksesta huolimatta. Kokeissa suutinetäisyys pienan kulmasta on noin 20 mm, jolloin virtasuuttimen päästä mitattu vapaalanganpituus on hitsauspistoolimallin kaasusuuttimen

ulkonemasta riippuen noin 25 mm. Hitsattaessa kuumakaarialueella vapaalanganpituus on tyypillisesti noin 15–25 mm. Pitkähkö vapaalanganpituus suurentaa ilman mukaan imeytymisen mahdollisuutta. Hitsattaessa lyhyemmällä vapaalangalla, on kaasusuutin lähempänä pienaa, jolloin pyörre ei pääse kuljettamaan huoneilmaa kosketuksiin kaasupatsaan kanssa. Koesarjan 2 kuvasarjoista ei saada koesarjan 1 tuloksia täydentäviä tietoja kaasusuojauksen laadusta, sillä kuvat ovat hyvin samankaltaisia kaikilla hitsauspistoolimalleilla.

6.3 Koesarja 3

Koesarjassa 3 kuvattiin schlieren-laitteistolla suojakaasun virtausta hitsauksen aikana. Kokeessa hitsattiin palko ruostumattoman teräslevyn päälle jalkoasennossa. Kokeissa hitsausvalokaaren aiheuttama voimakas säteily saatiin suodatettua kaistanpäästösuotimen, harmaasävysuotimen ja suurnopeuskameran ja valaisulaserin tahdistuksella täysin pois, jolloin hitsausvalokaari ei näkynyt kokeiden kuvissa. Pidentämällä suurnopeuskameran valotusaikaa hitsausvalokaaren muoto saataisiin näkyviin. Schlieren-laitteistolla kuvaaminen hitsauksen aikana soveltuu hyvin suojakaasun virtausilmiöiden kuvaamiseen ja suojakaasuvirtauksen ja kaaripaineen vuorovaikutuksen tarkasteluun. Kuvasarjojen kuvat otettiin virran nousuvaiheessa, virran huippuvaiheessa, virran laskuvaiheessa ja pohjavirtavaiheessa, jolloin kuvasarjoissa näkyy kaaripaineen nousu ja lisäainepisaran irtoaminen vaiheittain. Kuviin lisätyissä virta- ja jännitekäyrissä hitsausvirta on piirretty punaisella viivalla ja jännite sinisellä viivalla keltaisen pystyviivan merkitessä kuvanottohetkeä käyrästöllä. Kuvasarjoissa nähdään pulssin virrannousuvaiheesta johtuvan kaaripaineen nousun aiheuttama suojakaasun pöllähdys ja suojakaasuvirran pysähtyminen. Kaasupatsaiden pyörteisyys oli kaikilla pistoolimalleilla koesarjassa 3 hyvin samanlaista kuin koesarjassa 1. Koesarja 1 antaa kuitenkin hieman tarkemman kuvan suojakaasuvirtauksen laadusta suojakaasun päästessä virtaamaan pidemmän matkan vapaaseen ilmaan. Koesarja 3 hitsattiin käsin ja vapaalanganpituus pyrittiin pitämään mahdollisimman pitkänä, jotta suojakaasuvirtaus näkyisi hyvin. Vapaalanganpituus säädettiin sopivaksi hitsauksen aikana siten, että hitsaus tapahtui ilman oikosulkuja. Oikosulut aiheuttivat roiskeita ja rajuja kaasun virtausilmiöitä, jotka tekivät kuvista vaikeasti tulkittavia. Kuvasarjoissa hitsaussuunta on oikealta vasemmalle.

Kokeessa 3.1. kuvattiin valmistaja 1:n pistooli 1:n kaasuvirtausta hitsauksen aikana. Kuvasarjan ensimmäisestä ja toisesta kuvasta nähdään hitsausvirran nousuvaihe ja hitsaussuunnan edelle muodostuva suojakaasun pöllähdys. Kaaripaineen nousu aiheuttaa myös suojakaasupatsaan levenemisen ja pysähtymisen, jolloin kaasusuuttimen aukko muotoilee kaasupatsaan reunat aaltomaisiksi. Kaasupatsas pysyy kuitenkin ehjänä, joten kaaripaineen nousu ei aiheuttane ilman imeytymistä kaasuvirtaukseen. Kaasusuojaus vaikuttaa hyvin tiiviiltä.

Kokeessa 3.2. kuvattiin pistooli 2:n kaasusuojausta hitsauksen aikana. Kone 2 ja pistooli 2 tuottaa hyvin samankaltaisen kaaripaineen nousun kuin kokeen 3.1. valmistaja 1:n pistooli 1 ja kokeessa 3.1. käytetty kone 1. Suojakaasun pöllähdys hitsaussuunnassa on hyvin samankaltainen kuin pistooli 1:llä. Kaaripaine muotoilee kaasupatsasta kaasusuuttimen aukolla samoin kuin kokeessa 3.1. pistooli 2:n kaasuvirtaus pyörteilee vähemmän kuin pistooli 1:n, mikä huomattiin jo koesarjassa 1. Pistooli 2:n tuottama kaasusuojaus vaikuttaa olevan hyvin tiivis.

Myös kokeen 3.3. pistooli 3 tuottaa hyvin samankaltaisen kaaripaineen ja suojakaasun pöllähdyksen kuin pistooli 2. Pistooli 3:n tuottama kaasupatsas on reunoiltaan epätasaisempi kuin pistooli 1:n ja pistooli 2:n tuottama kaasuvirtaus. Pistooli 3:n virtauksessa on myös enemmän pyörteitä. Suojakaasupatsas pysyy kuitenkin hyvin kasassa ja kaasusuojaus vaikuttaa tiiviiltä.

Kokeessa 3.4. tutkittiin pistooli 4:n kaasusuojausta hitsauksen aikana. Kokeessa vapaalanganpituus jouduttiin pitämään melko lyhyenä tasaisen ja oikosuluttoman hitsauksen saavuttamiseksi. Lyhyestä vapaalangasta ja lyhyestä suutinetäisyydestä johtuen suojakaasupatsaan muoto ja pyörteisyys eivät näy hyvin kuvasarjassa. Kokeessa käytetyn Kone 4:n pulssissa virta pysyy melko korkeana, jolloin hitsausvalokaari on pitkä koko pulssin ajan. Kuvasarjan viimeisessä kuvassa on nähtävissä pisaran irtoaminen lisäainelangan päästä. Toisin kuin muilla tutkimuksessa käytetyillä hitsauskoneilla ja pistooleilla, irronnutta pisaraa seuraa pitkä vana pienempiä lisäainepisaroita. Kokeessa lisäainepisaroiden vana aiheutti herkästi oikosulkuja lisäainelangan ja työkappaleen välille. Hitsausvalokaaren syttyessä voimakkaasti uudelleen oikosulun jälkeen, kaasupatsas hajoaa ja syntyy roiskeita. Koetta varten hitsauskoneesta säädettiin kaarijännitteen hienosäätöarvoa

korkeammaksi hitsausvalokaaren pidentämiseksi ja oikosulkujen välttämiseksi. Virran nousu- ja huippuvaiheen aiheuttaman kaaripaineen nousun muodostama suojakaasun pöllähdys muodostuu melko kauas hitsaussuunnan edelle. Lyhyen suutinetäisyyden vuoksi kokeen 3.4. tuloksista ei voida vetää johtopäätöksiä pistooli 4:n kaasusuojauksesta.

Kokeessa 3.5. tutkittiin pistooli 5:n kaasusuojaa hitsauksen aikana. kokeessa kaaripaineen nousun aiheuttama kaasun pöllähdys oli koesarjan kaikista pistooleista ja hitsauskoneista pienin. Suojakaasupatsaan reunat ovat hyvin epätasaiset. Kuvasarjan ensimmäisessä, toisessa ja kolmannessa kuvassa nähdään suojakaasupatsaan kapeneminen. Kaaripaine pysäyttää suojakaasun virtauksen, jolloin kaasusuutin muotoilee kaasupatsaan reunoihin aallon. Aalto syvenee ja suojakaasupatsas kapenee suojakaasun virratessa suuttimesta lähemmäs hitsaustapahtumaa, jolloin ilma voi päästä kosketuksiin sulan kanssa. Kuvasarjan viimeisessä kuvassa näkyy seuraavan aallon muodostumisen alku suojakaasupatsaan keskivaiheilla. Suojakaasupatsaassa näkyy myös pyörteitä.

Kokeessa 3.6. tutkittiin pistooli 6:n kaasuvirtausta hitsauksen aikana. Pistooli 6:n tuottama suojakaasupatsas pysyy hyvin kasassa, eikä kaasupatsaan reunoilla näy patsaan muotoja rikkovia pyörteitä. Kaaripaineen suojakaasupatsasta muotoileva vaikutus on nähtävissä kuvasarjassa, kuten muidenkin tutkittujen pistoolimallien kohdalla. Kaasupatsaaseen ei muodostu yhtä suurta patsaan muodon rikkovaa aaltoa kuin kokeen 3.4. pistooli 5:llä. Myös kaaripaineen aiheuttama kaasun pöllähdys hitsaussuunnan edellä on hyvin samankaltainen kuin muilla hitsauskoneilla ja pistooleilla. Suojakaasupatsaan sisällä ei näy suuria pyörteitä. Kokeen 3.5. perusteella kaasusuojaus on tiivis. Suojakaasu pääsi vuotamaan hitsauspistoolin kaasusuuttimen ja pistoolin rungon välistä, joten luotettavan virtausmittauksen mahdollistamiseksi kaasusuuttimen vuodot päätettiin teipata alumiiniteipillä. Teippi oli kiinnitettynä kaasusuuttimessa myös kokeen aikana, joten kokeen tulos ei vastaa todellista hitsaustilannetta kyseisellä pistoolimallilla.

Kokeessa 3.7. tutkittiin pistooli 7:n tuottamaa kaasusuojausta hitsauksen aikana. Pistooli on hitsauskone 7:lle kehitetty versio kokeessa 3.6. tutkitusta pistooli 6:sta. Pistooli 7 ei vuotanut kaasusuuttimen ja pistoolin ruongon liitoksesta, kuten pistooli 6, vaikka molemmat pistoolit käyttävät hyvin samankaltaisia kaasusuuttimia. Pistooli 7:n kaasusuuttimen kiinnityspinta, johon suutin kiinnittyy puristuskiinnityksellä, on pitempi kuin pistooli 6:ssa, jolloin

suojakaasu ei pääse vuotamaan kaasusuuttimen takaosan hahloista. Pistooli 7:n tuottama kaasusuoja on hyvin samankaltainen kuin pistooli 6:n. Suuremmasta suuttimesta johtuen Pistooli 7:n kaasupatsas on leveämpi kuin pistooli 6:n. Kaasupatsaassa ei esiinny suuria patsaan reunoja rikkovia pyörteitä. Kone 7:n pulssimuoto tuottaa suuremman kaaripaineen nousun ja siten suuremman suojakaasun pöllähdyksen hitsaussuunnan edelle. Pöllähdyksen vaikutusta kaasusuojauksen tiiviyteen ei voida arvioida koesarjan 3 kuvasarjoista. Pistooli 7:n tuottama kaasusuojaus näyttää pistooli 6:n tavoin tiiviiltä.

Pistooli 8:n tuottamaa kaasusuojaa tutkittiin hitsauksen aikana kokeessa 3.8. Kaasupatsaan reunat muotoutuvat kaaripaineen vaihtelun vuoksi pistooli 8:lla melko aaltomaisiksi. Suojakaasupatsas kapenee aaltojen vaikutuksesta, mutta kaasupatsas pysyy selkeäreunaisena ja ehjänä, toisin kuin kokeen 3.5. pistooli 5:llä, jolla tehdyssä kokeessa esiintyi myös merkittävää kaasupatsaan kapenemista kaaripaineen vaikutuksesta. Kaaripaine vaikuttaa muotoilevan kaasupatsasta voimakkaimmin kaasusuuttimissa, joissa on supistuva aukko. Kaasupatsaan sisällä ei näy suurta turbulenssia ja kaasusuojaus näyttää hyvin tiiviiltä.

Kokeissa 3.9.–3.12. tutkittiin pistooli 9a:n kaasusuojausta hitsauksen aikana neljällä erilaisella kaasusuuttimella. Kaikissa kokeissa kaasupatsas oli hyvin repaleinen, kuten koesarja 1 osoitti. Kaasupatsasta oli vaikeaa erottaa hitsauksen aikana tapahtuneiden kaasupatsasta rikkovien oikosulkujen vuoksi, joiden aiheuttamat voimakkaat kaasun virtausilmiöt näkyvät kuvien taustalla. Kaasusuojaus näyttää kaikilla kaasusuutinmalleilla pyörteiseltä ja kaasupatsaan reunat epäselviltä. Kaasusuojauksen voidaan päätellä olevan vajavainen ja ilman imeytyvän mukaan hitsaustapahtumaan kaikilla suutinmalleilla. Suojakaasu tulee kaasusuuttimesta ulos pyörteisenä, kuten koesarjassa 1, joten kaasun voidaan päätellä virtaavan turbulenttisesti myös kaasusuuttimen sisällä. Kaasupatsaan repaleisuuden vuoksi kaaripaine ei muotoillut kaasupatsaan reunoihin aaltoja. Aaltoja ei muodostu, koska virtauksen pyörteisyys rikkoo kaasupatsaan reunoja, jolloin pienet reunojen muodot häviävät näkyvistä. Kaasupatsaan reunojen lievän aaltomaisuuden voidaan päätellä kertovan hyvästä, pyörteettömästä kaasuvirtauksesta.

Kokeessa 3.13. tutkittiin pistooli 9b:n tuottamaa kaasusuojausta hitsauksen aikana. Kokeissa käytettiin kaasusuutin IV:ää. Kuten pistooli 9a:n, myös pistooli 9b:n kaasupatsaan reunat

näkyvät huonosti ja kaasuvirtauksessa on runsaasti pyörteitä. Kokeen 3.13 tulos ei eroa kokeen 3.12. IV-suuttimella varustetusta pistooli 9a:sta.

Kokeessa 3.14. tutkittiin pistooli 2:n kaasuvirtausta hitsauksen aikana, kun pistoolista oli poistettu muovinen lisädiffuusori. Kokeella pyrittiin selvittämään, aiheuttaako virtasuuttimenpitimen, virtasuuttimen ja kaasusuuttimen sisäpinnan välinen poikkipinta-ala pistooli 9a:ssa syntyvän suojakaasun voimakkaan turbulenssin. Pistooli 2:n virtasuuttimenpidin, virtasuutin ja kaasusuutin ovat muodoiltaan melko samanlaisia, kuin pistooli 9a:ssa. Kokeen tulos on yhtenevä koesarjan 1 tulokseen. Kaasusuojaus ei muutu merkittävästi, kun lisädiffuusori poistetaan. Pistooli 2:n kaasupatsas on edelleen selkeäreunainen, turbulenssia on hyvin vähän ja kaasusuojaus näyttää tiiviiltä.

Pistooli 10:n kaasusuojausta tutkittiin hitsauksen aikana kokeessa 3.15. Pistooli 10:n kaasusuojaus on parempi kuin samanlaisella diffuusorilla varustettujen pistooli 9a:n ja 9b:n tuottama kaasusuojaus. Kaasupatsaan reunat erottuvat hyvin ja kaaripaineen kaasupatsasta muotoileva vaikutus näkyy melko selvästi. Kaasupatsas kuitenkin kapenee melko paljon lähellä hitsausvalokaarta, mistä voi aiheutua ilman kulkeutuminen hitsaustapahtumaan. Kuten koesarjassa 1, myös kokeessa 3.15. kaasupatsaassa näkyy turbulenssia, mutta kaasupatsas pysyy kasassa hitsauksen edellyttämällä suutinetäisyydellä.

Kokeessa 3.16. tutkittiin alkuperäisen messinkisen diffuusorin päälle kiinnitettävän lisädiffuusorin vaikutusta hitsauksen aikaiseen kaasuvirtaukseen pistooli 9a:lla. Kaasusuuttimena käytettiin suutin IV:ää. Kokeessa suutinetäisyys jäi hieman lyhyeksi, mikä vaikeuttaa kaasupatsaan näkemistä. Kaasupatsas näyttää huomattavasti paremmalta kuin kokeessa 3.12. tutkittu pistooli 9a:n kaasupatsas ilman lisädiffuusoria. Kaasupatsaan reunat ovat selkeät ja ehjät ja virtauksen sisällä ei näy voimakasta turbulenssia. Kaaripaineen kaasupatsasta muotoileva vaikutus näkyy hyvin kaasupatsaassa. Kokeen perusteella voidaan päätellä, että lisädiffuusori parantaa kaasusuojauksen tiiviyttä. Kuitenkin koesarjan 1 kokeen 1.16 perusteella kaasuvirtaus on edelleen turbulenttinen ja kaasupatsas repaleinen, joten lisädiffuusori ei ole optimaalinen ratkaisu pistooli 9a:n kaasusuojauksen parantamiseen. Lisädiffuusorin ja alkuperäisen diffuusorin väliin jää hyvin vähän tilaa jossa kaasu virtaa, jolloin suojakaasun virtausnopeus nousee korkeaksi ja virtaus muuttuu turbulenttiseksi.

Kokeessa 3.17. tutkittiin lisädiffuusorilla varustetun pistooli 9b:n kaasuvirtausta hitsauksen aikana. Pistooli varustettiin kaasusuutin IV:llä. Koesarjassa 1 lisädiffuusorin todettiin vuotavan suojakaasua lisädiffuusorin ja virtasuuttimen välistä. Vuotoa ei voitu tukkia teippaamalla kokeessa 3.17. hitsaustapahtuman kuumuuden vuoksi. Lisädiffuusori ei paranna virtausta pistooli 9b:llä, kuten 9a:lla. Kaasuvirtaus on repaleinen ja kaasupatsas reunoiltaan epäselvä, kuten ilman diffuusoriakin kokeessa 3.13. Koesarjan 1 kokeessa 1.17a. havaittu suojakaasun vuoto lisädiffuusorin ja virtasuuttimen välistä on nähtävissä myös kokeessa 3.17. Kaasupatsaan oikeassa reunassa näkyy huomattavasti enemmän turbulenssia kuin vasemmassa reunassa. Kaasupatsaan vasemman reunan virtaus näyttää heikolta ja hitaasti virtaavalta. Kaaripaine ei muotoile kaasupatsaan reunoihin aaltoja. Kokeen 3.17. kaasusuojaus ei näytä tiiviiltä.

Kokeessa 3.18. tutkittiin alkuperäisen messinkisen diffuusorina toimivan virtasuuttimenpitimen tilalle vaihdetun diffuusori 2:n vaikutusta hitsauksen aikaiseen kaasuvirtauksen pistooli 9b:llä. Kokeessa käytettiin kaasusuutin IV:ää. Pistooli 9b:n kaasusuoja paranee huomattavasti käyttämällä diffuusori 2:ta. Kaasupatsas pysyy hyvin koossa ja patsaassa ei näy suurta turbulenssia. Myös kaaripaineen kaasupatsaan reunoja muotoileva vaikutus näkyy, mutta tosin heikosti. Kokeessa ei nähdä koesarjassa 1 ilmennyttä suojakaasun ohivirtausta ja ohivirtauksen aiheuttamaa paikallista turbulenssia kaasupatsaassa. Suojakaasu pääsi vuotamaan diffuusorin yläosan ja muovisen eristeholkin välistä. Kokeessa 1.18b. vuoto tukittiin teipillä, jolloin kaikki suojakaasu purkautui diffuusorin rei’istä kaasusuuttimeen. Kaasun virtaus muuttui teippaamisen jälkeen hyvin turbulenttiseksi liian pienten diffuusorin reikien vuoksi. Kokeessa 3.18. ohivirtauksen vaikutukset eivät näy, koska paikallinen turbulenssi alkoi näkyä vasta muutamien senttimetrien etäisyydellä kaasusuuttimen aukosta, jolloin hitsauksen aikainen suutinetäisyys peittää turbulenssin näkymisen. Kokeen 3.18. perusteella diffuusori 2 on alkuperäistä diffuusoria parempi kaasusuojauksen kannalta. Ero johtunee diffuusori 2:n alkuperäistä messinkistä diffuusoria suuremmasta tilavuudesta. Myöskään diffuusori 2 ei ole optimaalinen diffuusorimalli pistooli 9b:hen liian pienten reikien ja vuotojen vuoksi.

Kokeessa 3.19 tutkittiin diffuusori 2:lla varustetun pistooli 10:n kaasusuojausta hitsauksen aikana. Kuten koesarjassa 1, myös kokeessa 3.19 diffuusori 2:n huomattiin vaikuttavan melko vähän pistooli 10:n kaasusuojaan. Kaasupatsas pysyy edelleen hyvin kasassa ja on

selkeäreunainen. Myös kaaripaineen kaasupatsasta muotoileva vaikutus on nähtävissä. Kaasupatsas ei kuitenkaan kapene kaasun edetessä hitsauskohtaan, kuten alkuperäisellä diffuusorilla tehdyssä kokeessa 3.15. Kaasusuojaus näyttää tiiviiltä ja kaasupatsas ehyeltä. Virtauksessa on vain vähän turbulenssia. Ero diffuusori 2:lla varustettuun pistooli 9b:hen voisi selittyä muovisen eristeholkin muotoilulla. Pistooli 10:n holkissa on kahdeksan kanavaa joita pitkin kaasu virtaa diffuusoriin. Pistooli 9b:n eristeholkissa kanavia ei ole ja kaasu levittäytyy vapaasti virtajohtimen ympärille ja diffuusorin sisälle. Eristeholkin kanavat kuristavat kaasuvirtausta ja suojakaasun paine nousee eristeholkin takana. Kaasu virtaa diffuusorin sisälle suurempaan tilavuuteen, jolloin paine laskee ja virtausnopeus hidastuu. Jos eristeholkissa ei ole kanavia, kaasun paine nousee korkeaksi diffuusorin sisällä ja kaasu purkautuu diffuusorista kovalla vauhdilla kaasusuuttimeen.

6.4 Koesarja 4: Hitsauskokeet

Hitsauskokeissa tutkittiin, miten schlieren-kuvissa havaitut kaasusuojauksen virtausilmiöt vaikuttavat käytännössä ja voidaanko schlieren-kuvien perusteellä päätellä, että kaasusuojaus on riittämätön ja hitsausvirheitä alkaa esiintyä käytännössä. Kokeissa hitsattiin pistoolinkuljetinta apuna käyttäen 200 mm pitkä alapienahitsi. Perusaineena käytettiin ruostumatonta terästä. Kaikki pistoolit asetettiin 10º työntävään poltinkulmaan ja hitsausvalokaari suunnattiin pysty- ja vaakalevyn liitoskohtaan 45º kulmassa. Koesarjan kuvissa hitsaussuunta on vasemmalta oikealle. Kokeiden perusteella schlieren-kuvien näyttämä kaasusuojan laatu vastaa todellisen hitsaustapahtuman kaasusuojaa ja kuvista voidaan päätellä kaasusuojauksen tiiviyttä luotettavasti.

Kokeessa 4.1. hitsattiin pistooli 1:llä ja kone 1:llä pienahitsi. pistooli 1:n kaasusuojaus näytti 1 ja 3 schlieren-kuvissa tiiviiltä. Hitsauskokeen perusteella pistooli 1:n kaasusuojaus on hyvä. Hitsin pinta on tasainen ja hitsissä on nähtävissä punertavaa väriä. Hitsaus ei ole aiheuttanut roiskeita. Pienan pysty- ja vaakalevyt ovat nokeentuneet vain vähän hitsin vierestä. Nokea on kertynyt hieman enemmän hitsin puolivälin oikealle puolelle lievän kateettipoikkeaman vuoksi. Pistoolinkuljetin nosti hitsauspistoolia 200 mm:n matkalla noin millimetrin, mikä aiheutti lisäainelangan ja hitsausvalokaaren suuntautumisen pystylevyyn.

Kokeessa 4.2. hitsattiin pistooli 2:lla ja kone 2:lla alapienahitsi. Sekä hitsauskokeen, että koesarjojen 1 ja 3 schlieren-kuvien perusteella pistooli 2:n kaasusuoja on tiivis. Hitsin pinta

on hyvin tasainen, hieman punertava ja melko kirkas. Levyn pintaan on tarttunut vain muutamia roiskeita. Hitsin reunoilla ei juuri ole nokea, paitsi hitsin loppupäässä kateettipoikkeaman vuoksi. Verrattuna kokeen 4.1. pistooli 1:een, vaikuttaa pistooli 2:n kaasusuoja olevan parempi. Pistooli 2:lla hitsatun hitsin pinta on sileämpi ja kirkkaampi kuin pistooli 1:llä, eikä hitsin ympäristössä ole niin paljoa nokea.

Kokeessa 4.3. hitsattiin pienahitsi pistooli 3:lla ja Kone 3:lla. Koesarjojen 1 ja 3 kokeissa pistooli 3:n kaasuvirtaus näytti hieman pyörteisemmältä kuin valmistaja 2:n uudemman pistooli 2:n kaasuvirtaus. Eroa ei kuitenkaan näy hitsin pinnanlaadussa. Hitsin pinta on lievästi punertava ja kirkas ja roiskeita on syntynyt vain muutamia hitsin aloituskohdassa ja aloituskohdan ympäristössä. Hitsin ympärillä on kuitenkin enemmän nokea kuin pistooli 2:lla hitsatussa hitsissä. Pistooli 3 näytti vain hieman pistooli 2:ta huonommalta koesarjan 1 schlieren-kuvassa. Pistoolien välinen ero on kuitenkin niin pieni, ettei eroa juuri huomaa hitsin laadussa.

Kokeessa 4.4. hitsattiin pistooli 4:llä ja kone 4:llä alapienahitsi. Pistoolin tuottama kaasuvirtaus näytti pyörteiseltä ja epäsymmetriseltä koesarjan 1 schlieren-kuvassa. Pistooli 4:llä hitsatun hitsin pinta on tasainen, mutta aiemmissa kokeissa nähtyä punertavaa väriä ei esiintynyt. Hitsipalon ympäristöön oli tarttunut nokea. Hitsaus tuotti myös runsaasti roiskeita. Hitsauksen roiskeisuus voi johtua huonosta kaasusuojasta tai hitsauskoneen virheellisistä säädöistä, kuten liian suureksi säädetystä jännitteestä, mikä johtaa liian pitkään hitsausvalokaareen. Kokeessa 4.4. ilmenneen hitsauksen roiskeisuuden ei kuitenkaan voida päätellä johtuvan huonosta kaasusuojauksesta, sillä kaasusuojauksen ollessa vajaa, olisi myös hitsin pinnassa epätasaisuutta ja nokea syntyisi enemmän.

Kokeessa 4.5. hitsattiin alapienahitsi pistooli 5:llä ja kone 5:llä. Koesarjassa 1 pistooli 5:n kaasuvirtaus näytti melko turbulenttiselta. Kaasupatsas oli myös epäsymmetrinen suojakaasun vuodon vuoksi. Ero esimerkiksi pistooli 3:een ja pistooli 2:een on nähtävissä myös hitsissä. Hitsin pinta on samea ja punertavaa väriä näkyy vain vähän hitsipalon reunoilla. Roiskeita ei ole kuitenkaan syntynyt kuin hitsauksen aloituksessa. Työkappaleen pinnassa on nokea vain hitsauksen aloituskohdan ympäristössä.

Kokeessa 4.6. hitsattiin alapienahitsi pistooli 6:lla ja kone 6:tta. Pistoolin kaasusuutin teipattiin koetta varten suojakaasun vuotamisen välttämiseksi. Koesarjan 1 schlieren-kokeessa pistooli 6:n kaasuvirtaus näytti turbulenttiselta, mutta kaasupatsas pysyi kasassa. Hitsauskokeen koekappaleen perusteella pistooli 6:n kaasusuojaus on tiivis. Hitsipalon pinta on punertava, eikä roiskeita ole kappaleen pinnassa kuin hitsauksen aloituskohdassa ja kaksi roisketta hitsauksen lopetuskohdassa. Nokea ei ole tarttunut työkappaleen pintaan kuin hitsauksen aloituskohdan ympäristössä. Kokeen perusteella voidaan päätellä, että schlieren-kuvassa näkyvä kaasupatsaan sisällä oleva turbulenssi ei vaikuta hitsaukseen ja kaasusuojauksen tiiviyteen.

Kokeessa 4.7. hitsattiin alapienahitsi pistooli 7:llä ja kone 7:llä. Koesarjan 1 schlieren-kuvassa Pistooli 7:n kaasuvirtaus näytti hyvin samanlaiselta kuin kokeen 4.6. pistooli 6:n kaasuvirtaus. Pistooli 7:llä hitsatun koekappaleen perusteella pistooli tuottaa tiiviin kaasusuojauksen. Hitsauksessa ei ole syntynyt roiskeita edes hitsauksen aloituskohtaan, hitsin pinta on sileä ja väri on hieman punertava. Pienan pystylevyyn on tarttunut hieman nokea, mikä johtuu hitsin kateettipoikkeamasta. Lisäainelanka on suuntautunut hitsauksen edetessä enemmän pienan vaakalevyyn, jolloin kaasusuojaus pystylevyn puolella ei ole ollut niin kattava kuin vaakalevyn puolella. Hitsin keskilinjassa ja vaakalevyn ja hitsin liitoskohdassa on kuitenkin pintakuonaa, mikä kertoo ilman pääsystä kosketuksiin sulan kanssa.

Kokeessa 4.8. hitsattiin pistooli 8:lla ja kone 7:llä alapienahitsi. Pistooli 8:n kaasuvirtauksessa oli koesarjan 1 schlieren-kuvassa turbulenssia, joka toisinaan rikkoi kaasupatsaan reunojen muotoa. Pistoolilla hitsattu pienahitsi on hitsin puolivälin jälkeen melko epätasainen. Hitsin epätasaisuus johtuu pistoolinkuljettimen heilumisesta hitsauksen aikana, mikä johtui hitsauspistoolin monitoimiletkun aiheuttamasta vedosta. Hitsin pinta vaikuttaa kuitenkin hyvälaatuiselta. Hitsin pinta on sileä ja punertava eikä roiskeita ole tarttunut levyihin. Levyihin on tarttunut nokea vain kohdissa, jossa hitsauspistooli on päässyt heilumaan sivusuunnassa. Pintakuonaa ei esiintynyt.

Kokeissa 4.9.–4.12. hitsattiin pienahitsi pistooli 9a:lla. Kokeissa vertailtiin erilaisten kaasusuuttimien reikien koon ja reiän reunan muotoilun vaikutusta kaasusuojan tiiviyteen ja suojakaasun pyörteilyyn. Koesarjan 1 schlieren-kuvissa suojakaasuvirtaus näytti hyvin

turbulenttiselta ja kaasupatsas ei pysynyt koossa millään suuttimella. Kaasusuuttimilla I-III hitsatuissa kokeissa 4.9.–4.11. kaikissa hitseissä havaittiin pintakuonaa hitsin keskilinjassa. Myös pienan pystylevy nokeentui suuttimia I-III käytettäessä. Suuttimilla I-III hitsattujen palkojen pinta oli samea ja suomuinen. Hitsauskokeiden 4.9.–4.12. paras hitsi syntyi kaasusuuttimella IV. Suuttimella IV hitsatun kokeen 4.12. hitsipalossa ei näy pintakuonaa ja nokea on tarttunut levyihin vain vähän. Missään kokeessa ei syntynyt roiskeita.

Kokeessa 4.13. hitsattiin pienahitsi pistooli 9b:llä. Kaasusuuttimena kokeessa käytettiin suutin IV:ää. Koesarjan 1 schlieren-kuvissa pistooli 9b:n kaasuvirtaus näytti turbulenttiselta ja kaasupatsas ei pysynyt koossa. Heikko kaasusuojaus näkyy myös hitsausjäljessä, kuten pistooli 9a:n kohdalla. Hitsin keskilinjassa on pintakuonaa ja nokea on muodostunut sekä pienan vaaka- että pystylevyyn. Hitsin pinta on samea, eikä punertavaa päästöväriä ole nähtävissä. Hitsauksessa ei ole kuitenkaan syntynyt roiskeita.

Kokeessa 4.14. hitsattiin pienahitsi kone 2:lla ja pistooli 2:lla, josta oli poistettu lisädiffuusori. Kokeella haluttiin selvittää, kuinka suuri vaikutus kaasusuuttimen sisäisillä virtasuuttimen ja virtasuuttimenpitimen muodoilla on kaasuvirtaukseen. Koesarjan 1 schlieren-kuvissa huomattiin pistooli 2:n kaasuvirtauksen muuttuvan hieman turbulenttisemmaksi lisädiffuusorin poistamisen myötä. Kaasupatsas pysyi kuitenkin kasassa hyvin. Verrattuna diffuusorilla varustetulla pistooli 2:lla hitsattuun pienahitsiin, oli kokeen 4.14. pienan levyt nokeentuneet enemmän. Hitsin pinta oli kuitenkin hyvin tasainen ja hieman punertava, kuten lisädiffuusorilla varustetulla pistooli 2:lla hitsattu pienahitsi. Kokeen perusteella pistoolien 9a, 9b ja 10 kaasusuojauksen pyörteisyys johtuu diffuusorin tilavuudesta, diffuusorin reikien koosta ja lukumäärästä, sekä diffuusoria edeltävien kaasukanavien muodosta.

Kokeessa 4.15. hitsattiin pienahitsi pistooli 10:llä ja kone 7:llä. Kaasuvirtauksessa oli pyörteitä, mutta kaasupatsas pysyi melko hyvin kasassa hitsauksen suutinetäisyyden rajoissa. Pistooli 10:llä hitsatussa pienahitsissä on hieman nokea vaaka- ja pystylevyissä. Pintakuonaa on syntynyt vain vähän hitsin loppupäähän. Hitsin pinta on samea, mutta punertava päästöväri on hieman näkyvissä. Roiskeita on syntynyt vain vähän hitsauksen aloituskohdassa.

Kokeessa 4.16. hitsattiin pienahitsi lisädiffuusorilla varustetulla pistooli 9a:lla ja kone 7:llä. Kaasusuuttimena käytettiin suutin IV:ää. Koesarjan 1 perusteella alkuperäisen messinkisen diffuusorin päälle kiinnitetty lisädiffuusori paransi pistooli 9a:n kaasuvirtauksen laatua. Virtauksessa oli edelleen pyörteitä, mutta kaasupatsas pysyi kasassa hieman paremmin kuin ilman lisädiffuusoria. Kaasuvirtauksessa esiintyi kuitenkin suuria pyörteitä, jotka rikkoivat kaasupatsaan muotoa. Kokeen 4.16. pienahitsi on koesarjan 1 näyttämistä poiketen jopa hieman huonompi kuin ilman lisädiffuusoria hitsattu pienahitsi. Hitsin keskilinjassa on pintakuonaa ja pienan pystylevy on nokeentunut voimakkaasti. Nokeentuminen johtuu hitsipalon kateettipoikkeamasta. Hitsausvalokaari on suunnattu enemmän vaakalevyyn. Hitsipalko on samea ja pinnan kuviot neulasmaisia. Päästöväriä ei ole nähtävissä. Hitsauksessa ei ole syntynyt roiskeita. Lisädiffuusori kuumeni voimakkaasti hitsauksen aikana ja lyheni palamisen vaikutuksesta 2 mm virtasuuttimen puolelta. Lisädiffuusorin palaminen on aiheuttanut voimakkaan suojakaasun vuodon virtasuuttimen ja diffuusorin alalaidan välistä.

Kokeessa 4.17. hitsattiin pienahitsi lisädiffuusorilla varustetulla pistooli 9b:llä ja kone 7:llä. Kaasusuuttimena käytettiin suutin IV:ää. Koesarjassa 1 havaittiin lisädiffuusorin vuotavan suojakaasua lisädiffuusorin ja virtasuuttimen välistä. Koesarjassa 1 vuodot teipattiin, jolloin virtauksessa alkoi esiintyä voimakasta turbulenssia. Kokeessa 4.17 vuotoja ei voitu teipata hitsauksen kuumuuden vuoksi. Lisädiffuusorilla varustettuna pistooli 9b tuotti laadukkaamman hitsin kuin ilman lisädiffuusoria. Hitsin keskilinjassa on lähellä aloituskohtaa vain pieni rykelmä pintakuonaa. Hitsin pinta on sileä ja punertava päästöväri näkyy hyvin. Pienan alalevyssä on nokea vain hitsin viimeisellä kolmanneksella, mikä johtuu pistoolinkuljettimen liikeradan epätarkkuudesta. Hitsauksessa ei ole syntynyt roiskeita.

Kokeessa 4.18. hitsattiin pienahitsi kone 7:llä ja pistooli 9b:llä, jonka alkuperäisen diffuusorina toimivan virtasuuttimenpitimen tilalle vaihdettiin diffuusori 2. Kaasusuuttimena käytettiin suutinmalli IV:ää. Koesarjassa 1 havaittiin suojakaasun vuotavan diffuusorin ja muovisen eristeholkin välistä. Vuodon teippaus aiheutti voimakasta turbulenssia liian pienien diffuusorin reikien vuoksi. Ilman vuotojen teippausta kaasuvirtaus oli hieman epäsymmetrinen, mutta kaasupatsas pysyi kasassa. Verrattuna alkuperäisellä diffuusorilla varustetulla pistooli 9b:llä hitsattuun hitsiin, tuo diffuusori 2 vain vähän

parannuksia. Hitsin keskilinjassa on edelleen pintakuonaa, mutta pintakuonaa lukuun ottamatta hitsin pinta on parempi. Hitsin pinta on sileä ja punertava päästöväri näkyy hyvin. Nokea on sekä pienan pysty- että vaakalevyissä yhtä paljon kuin alkuperäisellä diffuusorilla hitsatussa pienahitsissä. Roiskeita ei ollut tarttunut koekappaleeseen.

Kokeessa 4.19. hitsattiin pienahitsi kone 7:llä ja pistooli 10:llä, jonka alkuperäisen diffuusorina toimivan virtasuuttimenpitimen tilalle vaihdettiin diffuusori 2. Koesarjan 1 perusteella diffuusori 2 toi hieman parannusta pistooli 10:n kaasuvirtaukseen. Kaasupatsas pysyi paremmin kasassa ja turbulenssia oli vähemmän diffuusori 2:lla. Diffuusori 2:lla varustetulla pistooli 10:llä hitsattu pienahitsi taas oli huonompi kuin alkuperäisellä diffuusorilla hitsattu pienahitsi. Kokeen 4.19. Pienahitsin keskilinjassa oli pintakuonaa, mitä ei alkuperäisellä diffuusorilla varustetulla pistoolilla hitsatussa pienassa ollut. Nokea muodostui yhtä paljon molemmilla diffuusoreilla. Pinnaltaan hitsipalko on pintakuonaa lukuun ottamatta samanlainen kuin alkuperäisellä diffuusorilla hitsattu palko. Roiskeita ei tarttunut työkappaleeseen hitsauksessa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSAIHEET

Kokeiden perusteella schlieren-kuvaus soveltuu erittäin hyvin hitsauspistooleiden kaasusuojauksen tiiviyden arviointiin sekä hitsauksen aikana, että ilman hitsausvalokaarta. Käyttökelpoisimmiksi kokeiksi osoittautui koesarjan 1 kokeet, joissa suojakaasu virtasi hitsauspistoolin läpi vapaaseen ilmaan. Kokeiden avulla voidaan nähdä suojakaasuvirtauksen pyörteet ja suojakaasupatsaan muoto, jolloin voidaan arvioida kaasusuojauksen kattavuutta. Koesarjan 3 kokeet kertovat myös kaasusuojan tiiviydestä. Koesarjassa 3 kuvattiin kaasuvirtausta hitsauksen aikana, jolloin kaaripaineen aiheuttamat kaasun virtausilmiöt saadaan näkyviin. Koesarjan 3 kaltaista hitsauksen aikaista schlieren-kuvausta voidaan hyödyntää esimerkiksi tutkittaessa hitsausvalokaaren syttyvyyttä tai pulssimuodon vaikutusta kaaripaineeseen. Koesarja 2 ei antanut tietoa kaasuvirtauksista. Koesarjan 3 hitsauskokeissa kaaripaineen huomattiin muotoilevan suojakaasupatsaan reunojen muotoa aaltomaiseksi. Patsaan aaltomaisuutta esiintyi hitsauspistooleilla, joiden tuottama kaasupatsas pysyi hyvin koossa koesarjan 1 kokeissa. Kaaripaineen kaasupatsasta muotoilevan vaikutuksen huomattiin olevan myös voimakkaampaa pistooleilla, joissa oli supistuva kaasusuutin. Kaasupatsaan reunoihin hitsauksen aikana syntyvät aallot kertovat laadukkaasta ja pyörteettömästä suojakaasuvirtauksesta, sillä kaasun voimakkaan turbulenssin vaikutuksesta pieniä aaltokuvioita ei pääsisi syntymään. Voimakas turbulenssi saa suojakaasun virtaamaan myös hieman sivusuunnassa varsinaiseen kaasuvirtaukseen nähden, jolloin aaltokuvioita ei synny. Aaltokuviot saattavat muodostua myös liian syviksi hitsauksen aikana joillain pistoolimalleilla, jolloin hitsaustapahtumaan voi päästä ilmaa.

Koesarjan 1 schlieren-kuvien ja koesarjan 4 hitsauskokeiden perusteella kaasusuojan kannalta huonoin schlieren-kuvassa näkyvä ilmiö on kaasupatsaan reunoja ja muotoa rikkovien suurten pyörteiden esiintyminen. Verrattaessa toisiinsa pistooleja, jotka tuottivat hyvin koossa pysyvän kaasupatsaan, oli pistooleilla hitsattu pienahitsi laadukas, vaikka kaasupatsaan sisällä olevien pyörteiden määrä vaihteli pistoolimallien välillä. Kaasupatsaan sisäisten pyörteiden määrä vaikutti melko vähän hitsipalon pinnanlaatuun. Hitsauspistoolit, joiden kaasupatsas hajosi voimakkaan turbulenssin vaikutuksesta, tuottivat hitsin, jonka keskilinjassa oli pintakuonaa, hitsin pinta oli samea ja työkappale nokeentui hitsauksessa.

Kokeissa huomattiin pistoolien 9a, 9b ja 10 suojakaasuvirtauksen turbulenttisuuden johtuvan diffuusorin muotoilusta. Kokeissa tutkittiin virtauksen ominaisuuksia erilaisilla kaasusuuttimilla, jotka eivät muuttaneet virtauksen luonnetta ratkaisevasti. Turbulenssia alkoi syntyä jo kaasusuuttimen sisällä. Kokeissa suljettiin pois myös virtasuuttimen ja virtasuuttimenpitimen ulkomuodon vaikutus virtaukseen vertaamalla pistooleita 9a, 9b ja 10 toiseen, ulkoisesti samanmuotoisella virtasuuttimella, virtasuuttimenpitimellä ja kaasusuuttimella varustettuun hitsauspistooliin.

Työssä testattiin myös kahta erilaista diffuusoriratkaisua pistooleilla 9a, 9b ja 10. Molemmat diffuusorit muuttivat kaasuvirtausta parempaan suuntaan, mutta optimaalista diffuusoriratkaisua ei kokeissa löytynyt. Alkuperäisen messinkisen diffuusorin päälle kiinnitettävä lisädiffuusori paransi virtausta molemmilla pistooli 9:n versioilla, mutta suojakaasua pääsi vuotamaan diffuusorin ja virtasuuttimen välistä aiheuttaen epäsymmetrisen kaasuvirtauksen. Vuotojen tukkiminen aiheutti virtauksen muuttumisen turbulenttiseksi. Virtauksen muuttuminen turbulenttiseksi vuotojen tukkimisen jälkeen johtuu lisädiffuusorin ulkopinnan ja alkuperäisen diffuusorin sisäpinnan välisestä pienestä tilasta, johon kaasu virtaa. Lisädiffuusori kuristaa kaasun virtausta, jolloin kaasun nopeus kasvaa kaasun paineen noustessa ja turbulenssia alkaa esiintyä. Suojakaasun vuotaminen mahdollisti suojakaasulle suoremman reitin ulos diffuusorista ja esti paineen nousun diffuusorin sisällä. Toinen tutkittu diffuusorimalli vaihdettiin alkuperäisen diffuusorin tilalle. Myös diffuusori 2 vuoti suojakaasua, jolloin esiintyi sama ohivirtausilmiö, kuin lisädiffuusorilla. Jälleen vuodon tukkiminen aiheutti voimakasta turbulenssia. Voimakas turbulenssi johtunee diffuusori 2:n tapauksessa liian pienistä rei’istä.

Jatkotutkimuksissa voitaisiin tutkia konenäön hyödyntämismahdollisuuksia schlieren-kuvauksessa. Konenäköä voitaisi käyttää hyvän ja huonon kaasusuojan erottamiseen schlieren-kuvista. Pistoolien 9a, 9b ja 10 kehitystyö vaatii jatkotutkimusta. Tutkimuksissa voitaisi testata erilaisten diffuusorimallien vaikutusta kaasuvirtaukseen varioimalla muun muassa diffuusorin reikien lukumäärää, suuntausta ja halkaisijaa, sekä diffuusorin tilavuutta. pistooli 9a, 9b ja 10 kaasuvirtausta voisi tutkia myös virtaustekniikan laskentaohjelmilla. Pistoolin virtauskanavan muodot mallinnetaan 3D-mallina laskentaohjelmaan, joka laskee kaasuvirtauksen nopeuden ja käyttäytymisen ja siten ilmaisee turbulenttisuuden.

8 YHTEENVETO

Huoneilman päästessä kosketuksiin hitsisulan kanssa syntyy ilman hapen ja typen vaikutuksesta huokosia, hitsiaine ja perusaineen muutosvyöhyke haurastuvat, hitsipalon pinnanlaatu kärsii ja hitsi nokeentuu lisäaineiden palaessa pois hitsiaineesta. Huoneilma voi päästä kosketuksiin sulan kanssa suojakaasujärjestelmän häiriöiden, kuten vuotojen tai hitsausroiskeista likaantuneen kaasusuuttimen, sekä liian korkeaksi tai liian matalaksi säädetty suojakaasun tilavuusvirran vuoksi. Ilman pääsy hitsaustapahtumaan voi aiheutua myös epäoptimaalisesta hitsauspistoolin kaasukanavan muotoilusta, jolloin suojakaasuvirtaukseen muodostuu pyörteitä, jotka mahdollistavat huoneilman imeytymisen mukaan virtaukseen.

Tässä työssä tutkittiin erilaisten hitsauspistoolimallien tuottamia suojakaasuvirtauksia schlieren-kuvauksen avulla ja selvitettiin, millaisilla hitsauspistoolin suojakaasukanavan muodoilla voidaan vaikuttaa kaasuvirtauksen turbulenttisuuteen. Työssä tutkittiin kaasuvirtauksia kolmella schlieren-kuvausta hyödyntävällä kokeella. Koesarjassa 1 suojakaasuvirtaus suunnattiin vapaaseen ilmaan, koesarjassa 2 kaasuvirtaus suunnattiin pienaan ja koesarjassa 3 hitsattiin palko ruostumattoman teräslevyn päälle jalkoasennossa. Koesarjassa 4 tehtiin hitsauskokeet, joissa hitsattiin pienaliitos ruostumattomaan teräkseen.

Kokeissa havaittiin haitallisimpien suojakaasun virtausilmiöiden olevan schlieren-kuvassa näkyvä voimakas suojakaasupatsaan muotoa rikkova turbulenssi. Verrattaessa toisiinsa pistooleja, jotka tuottivat hyvin koossa pysyvän kaasupatsaan, oli pistooleilla hitsattu pienahitsi laadukas, vaikka kaasupatsaan sisällä olevien pyörteiden määrä vaihteli pistoolimallien välillä. Koesarjassa 4 havaittiin pyörteiden ja kaasupatsaan hajoamisen aiheuttavan perusainelevyjen nokeentumista hitsin ympäristössä, hitsin pinnan muuttumisen neulasmaiseksi ja sameaksi, sekä pintakuonan muodostumista hitsin pintaan. Myöskään ruostumattomalle teräkselle tyypillinen päästöväri ei näkynyt hitsin pinnassa, jos kaasusuojaus oli vajaa. Kokeissa havaittiin diffuusorin muotoilulla olevan suurin vaikutus kaasuvirtauksen turbulenttisuuteen. Kaasusuuttimen aukon koolla ja kaasusuuttimen ja virtasuuttimen välisellä poikkipinta-alalla oli vähäinen vaikutus virtauksen turbulenttisuuteen.

LÄHTEET

AGA. 2013a. Suojakaasukäsikirja [verkkodokumentti]. Päivitetty 11.2.2013 [viitattu 11.1.2017]. 53 s. Saatavissa: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20Shielding%20Gases%20Handbook%20FI634_122349.pdf?v=1.0

AGA. 2013b. Tuoteluettelo. Teollisuuskaasut [verkkodokumentti]. Päivitetty 24.6.2013 [viitattu 16.1.2017]. 28 s. Saatavissa: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20IG%20Gases%20White%20Paper%20FI634_122350.pdf?v=1.0

AGA. 2014. Käytännön ohjeita MIG/MAG-hitsaukseen [verkkodokumentti]. Päivitetty 4.3.2014 [viitattu 11.1.2017]. 24 s. Saatavissa: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20MIG%20MAG%20Welding%20Brochure%202014%20FI634_122347.pdf?v=2.0

Aspberg, E. 2014. Otsoni ja terveyshaitat hitsauksessa [verkkodokumentti]. Päivitetty 6.10.2014 [viitattu 1.3.2017]. Oy Woikoski AB. 9 s. Saatavissa: http://www.woikoski.fi/sites/default/files/Otsoni%20ja%20terveyshaitat%20valokaarihitsauksessa_0.pdf

AWS. 2004. Welding Handbook. Ninth Edition. Volume 2. Welding Processes, Part 1. Miami, USA: American Welding Society. 955 s.

Bernard. MIG Welding Shielding Gas Basics [Bernardin www-sivuilla]. [Viitattu 1.2.2017]. Saatavissa: http://www.bernardwelds.com/mig-welding-shielding-gas-basics-p152080#.WJHp81N96Uk

Degen, N. 2012. An Overview on Schlieren Optics and its Applications. Zürich, Sveitsi: ETH-Zürich. 36 s.

Dreher, M., Füssel, U., Rose, S., Häßler, M., Hertel, M. & Schnick, M. 2013. Methods and results concerning the shielding gas flow in GMAW. Welding in the World 57:3. S. 391-410.

Hobart Institute of Welding Technology. 2010. Pocket Welding Guide – A Guide to Better Welding. 30th edition. Ohio, USA: Hobart Institute of Welding Technology. 146 s.

Kah, P. & Mvola Belinga, E. 2016. Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 88:9. S. 2369-2387.

Kemppi a. Tietoja Kempistä [Kemppi Oy:n www-sivuilla]. [Viitattu 3.2.2017]. Saatavissa: https://www.kemppi.com/fi-FI/yritys/kemppi/tietoa-yrityksesta/

Kemppi b. Kemppi lanseeraa uuden Kemppi ARC System 3 -ratkaisun ja täydentää osaamistaan hankkimalla norjalaisen Weldindustry AS:n [Kemppi Oy:n www-sivuilla]. [Viitattu 3.2.2017]. Saatavissa: http://productinfo.kemppi.com/media/?dir=williams_2014&file=launch_twxm&img=media_img_williamslaunch_2014&lang=fi

Kemppi c. Kemppi Oy:n historiaa [Kemppi Oy:n www-sivuilla]. [Viitattu 3.2.2017]. Saatavissa: https://www.kemppi.com/fi-FI/yritys/get-to-know-us/kemppi-oyn-historiaa/

Lepola, P. & Ylikangas, R. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. Helsinki: Sanoma Pro Oy. 415 s.

Lincoln Electric. 2015. Gas Metal Arc Welding [verkkodokumentti]. Päivitetty 3.6.2015 [viitattu 24.1.2017]. 96 s. Saatavissa: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarcl-56/c4200.pdf

Lukkari, J. 2002a. Hitsaustekniikka: Perusteet ja kaarihitsaus. 4. painos. Helsinki: Opetushallitus. 292 s.

Lukkari, J. 2002b. Hitsien laatu ja hitsausvirheet. Hitsausuutisissa julkaissut artikkelit, osat 1-5 [verkkodokumentti]. Helsinki: Oy ESAB. Päivitetty 19.2.2002 [Viitattu 16.1.2017]. 15 s. Saatavissa: http://www.tooloutlet.fi/upload/File/Hitsien_laatu_ja_hitsausvirheet.pdf?rnd=1333530538

Lyttle, K. 1993. Shielding Gases. Teoksessa: Olson, D.L., Siewert, T. A., Liu, S & Edwards, G. R. 1993. ASM Handbook. Vol. 6: Welding, Brazing, and Soldering. Ohio, USA: ASM International. S. 64-69.

Mathers, G. 2002. The Welding of Aluminium and Its Alloys. Woodhead Publishing. 248 s.

Merzkirch, W. 2007. Density-Based Techniques. Teoksessa: Tropea, C., Yarin, A. & Foss, J. F. 2007. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berliini, Saksa: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. S. 473-486.

Monk, A. & Morrett, B. 2009. Troubleshooting the MIG Welding Process [verkkodokumentti]. Julkaistu 28.4.2009. [Viitattu 17.1.2017]. Saatavissa: http://www.assemblymag.com/articles/86511-troubleshooting-the-mig-welding-process

Outokumpu. 2010. Welding Handbook. Espoo: Outokumpu. 138 s.

Schnick, M., Dreher, M., Zschetzsche, J., Fuessel, U. & Spille-Kohoff, A. 2012. Visualization and Optimization of Shielding Gas Flows in Arc Welding. Welding in the World 56:54. S. 54-61.

Settles, G. S. 2001. Schlieren and Shadowgraph Techniques. New York, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 376 s.

Stenbacka, N. 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. 1. painos. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys. 159 s.

Weman, K. 2012. Welding processes handbook. Second edition. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited. 280 s.

Woikoski. 2015. Suojakaasun valinta [verkkodokumentti]. Päivitetty 28.8.2015 [viitattu 1.3.2017]. Saatavissa: http://www.woikoski.fi/sites/default/files/suojakaasun_valinta_ja_kemialliset_koostumukset_28082015_2_0.pdf

Lisäainelangan ainestodistus.

Inspection Certificate 3.1 - Chemical Analysis
Test Report 2.2 - Mechanical Properties
according to EN 10204

Certificate No
119657

Order No	ELGA Order No	Specification	Data Sheet rev.
	KU0044027	AWS/ASME SFA 5.9: ER316LSi EN-ISO 14343-A: G 19 12 3 LSi	10

Product	Batch No	Part No
Cromamig 316LSi 1,2 X 15KG	636014	98102012

Wire chemical analysis, wt.%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
0,011	0,85	1,58	0,015	0,013	18,44	12,24	2,54	0,07	0,040

Mechanical properties - All-weld metal.

Yield Strength MPa	Tensile Strength MPa	Elongation A5%	Impact value average J	Test temp. °C
400	600	40	50	-196

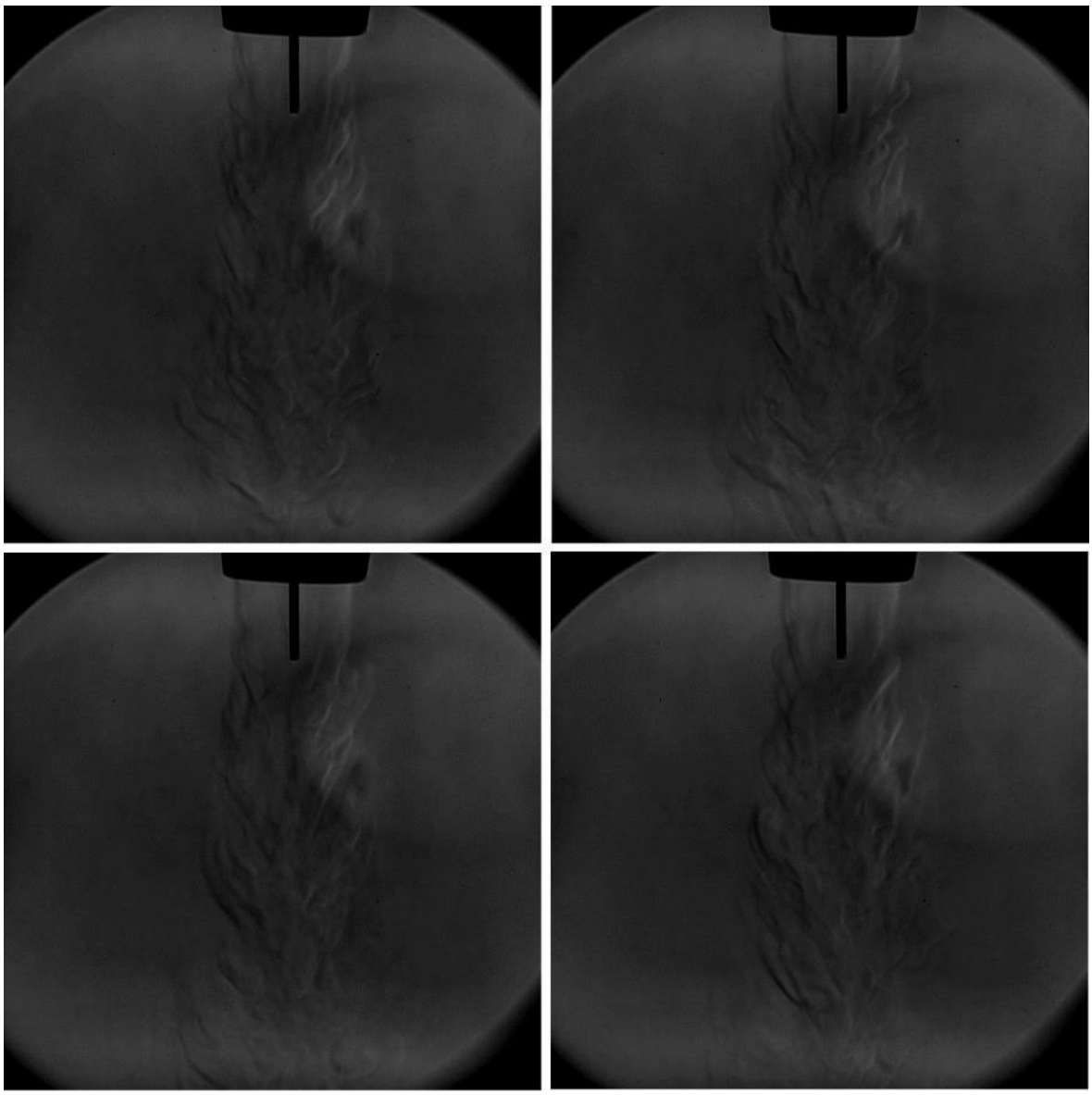
Shielding gas: M12, Ar + 2% CO2

We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order contract.

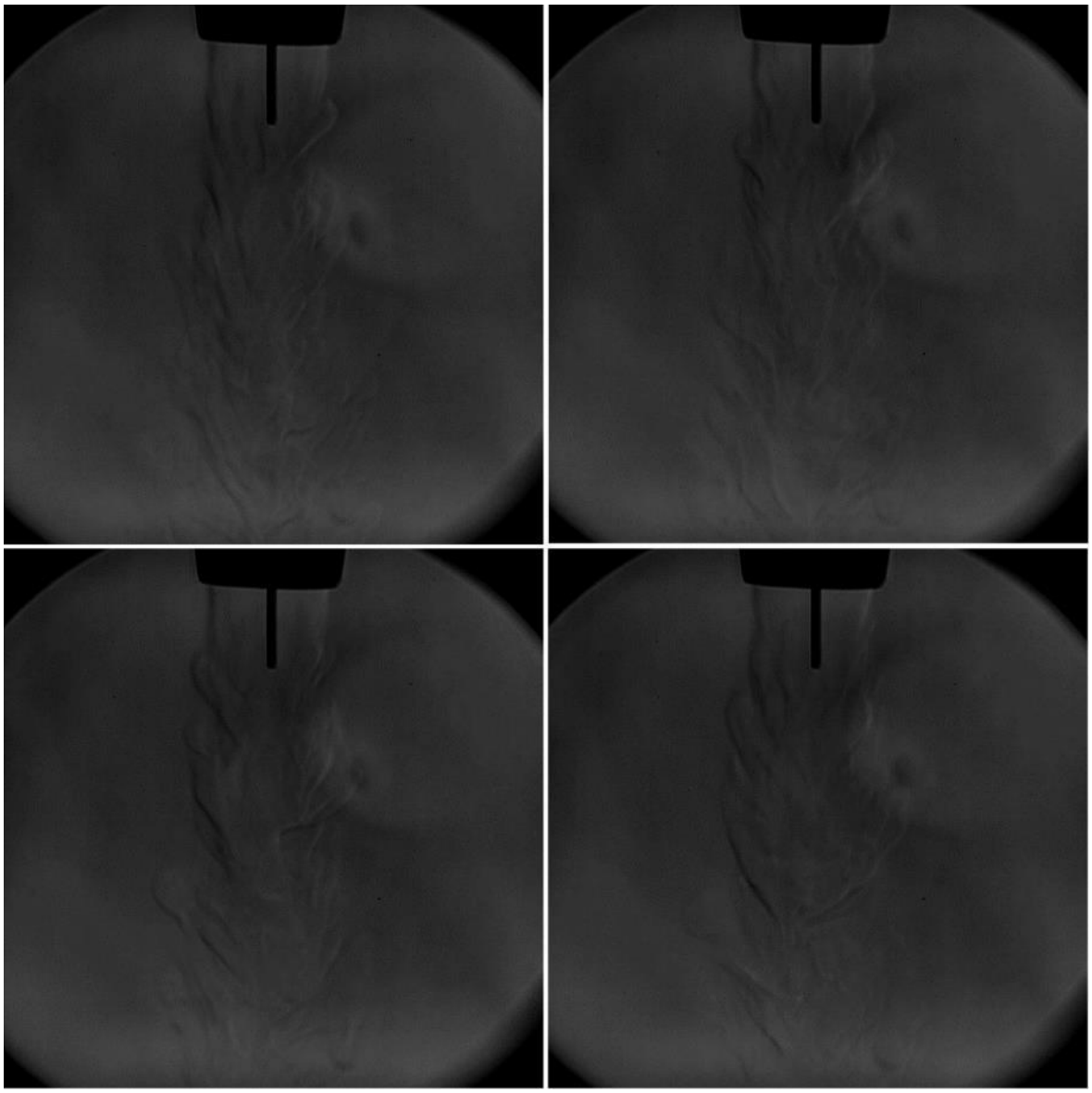
Adriana Draganoi, QC Manager
Date: 2016-10-21

Koesarjan 1 kuvasarjat.

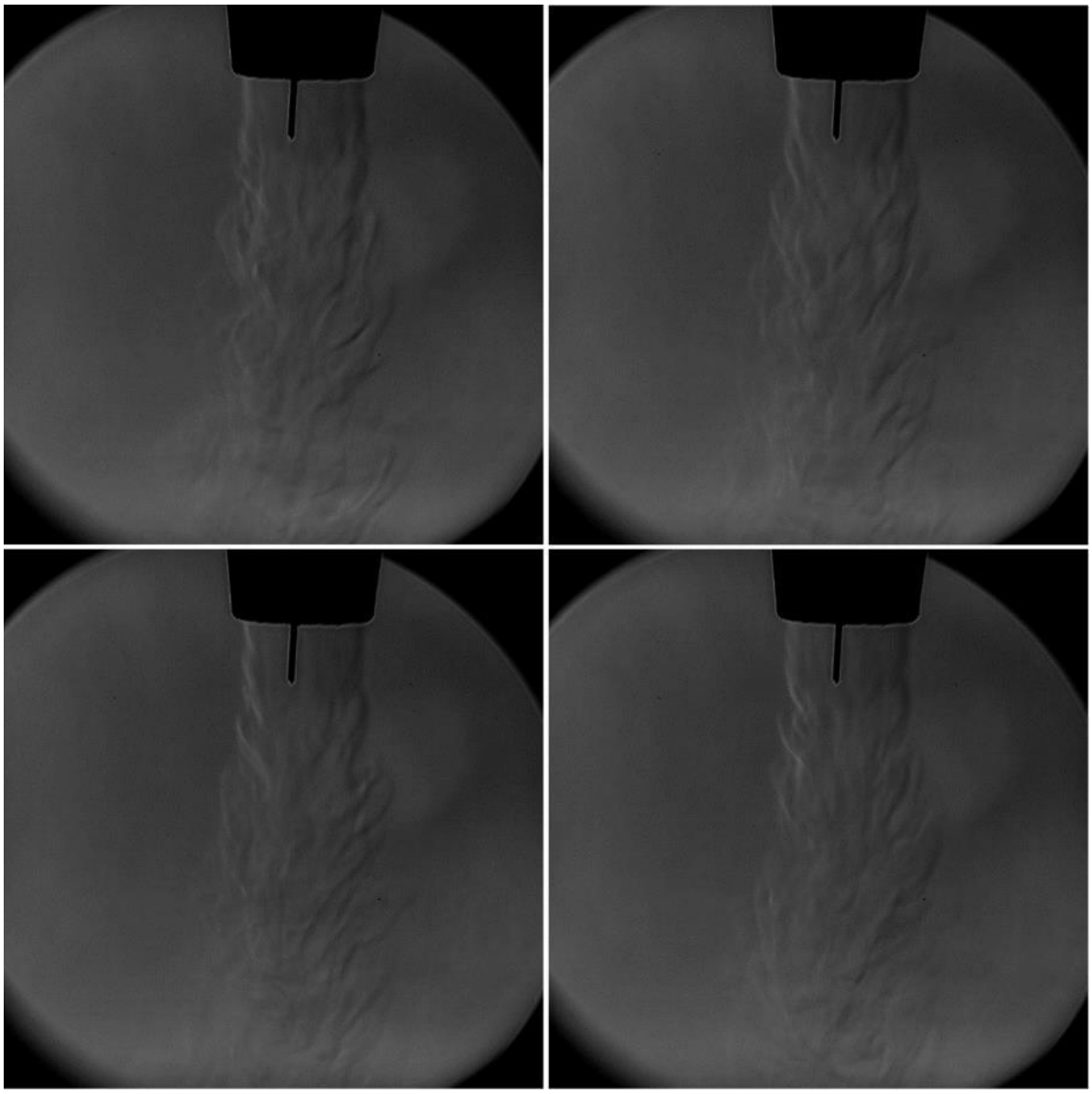
Koe 1.1. Pistooli 1



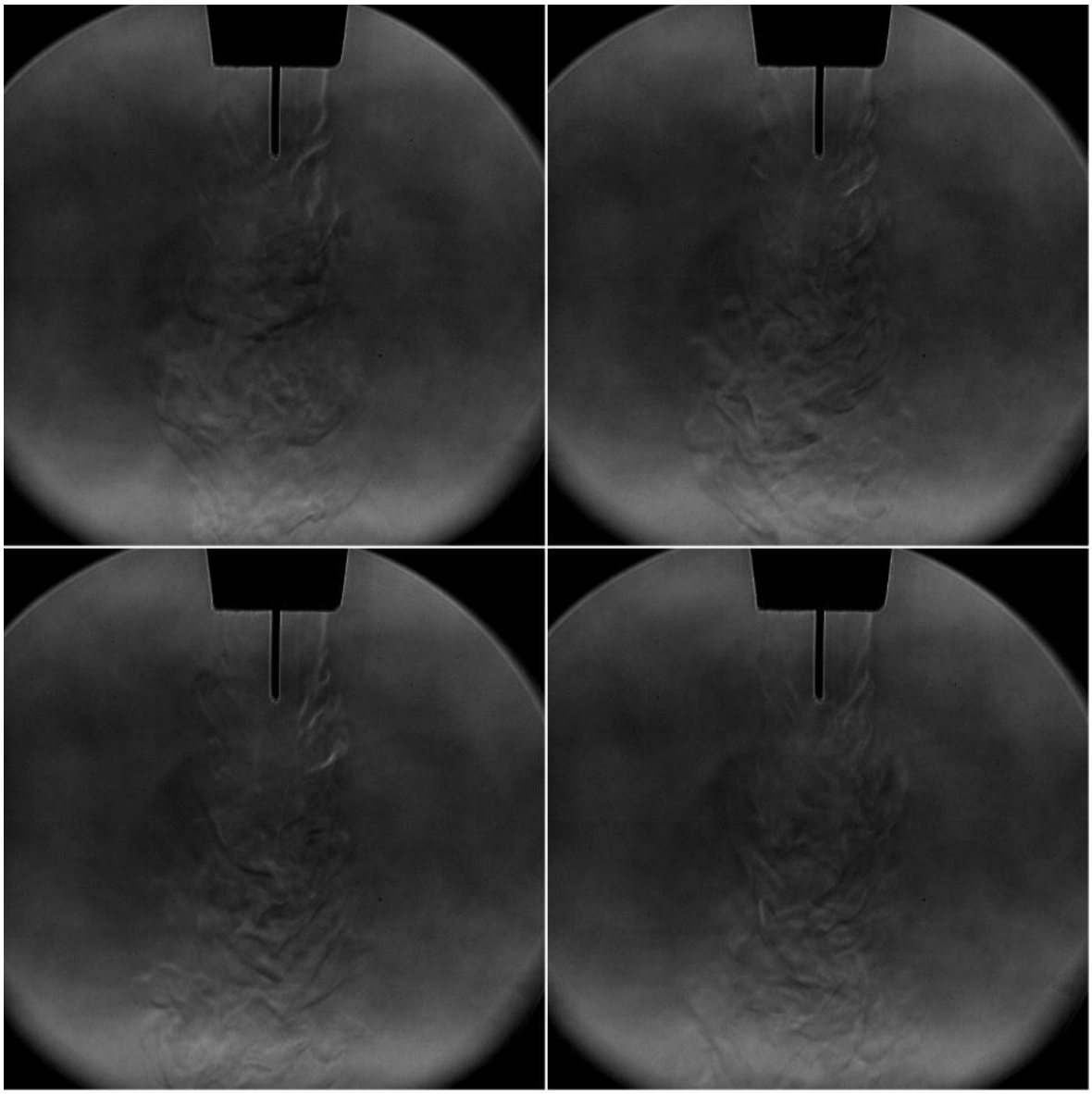
Koe 1.2. Pistooli 2



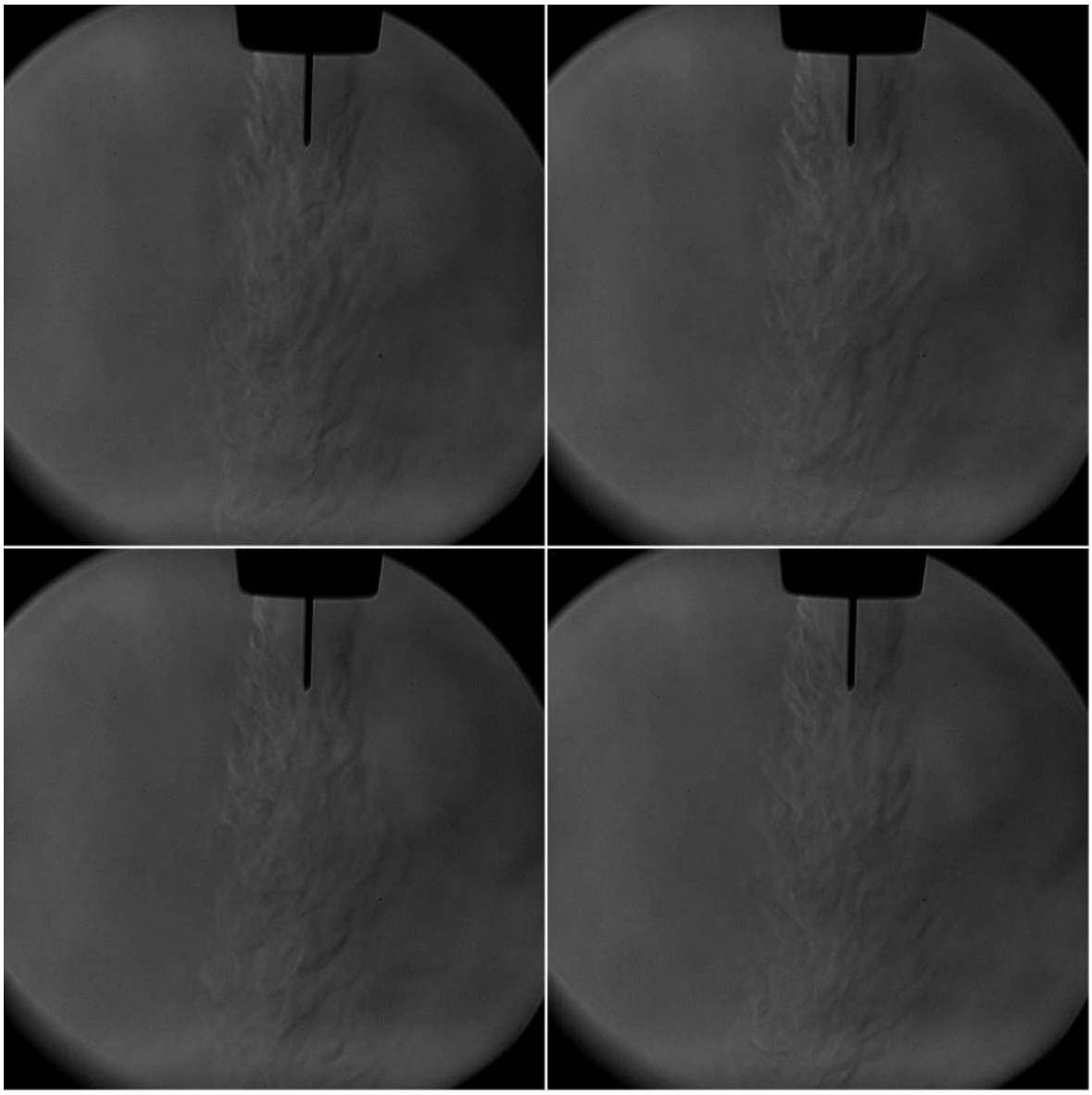
Koe 1.3. Pistooli 3



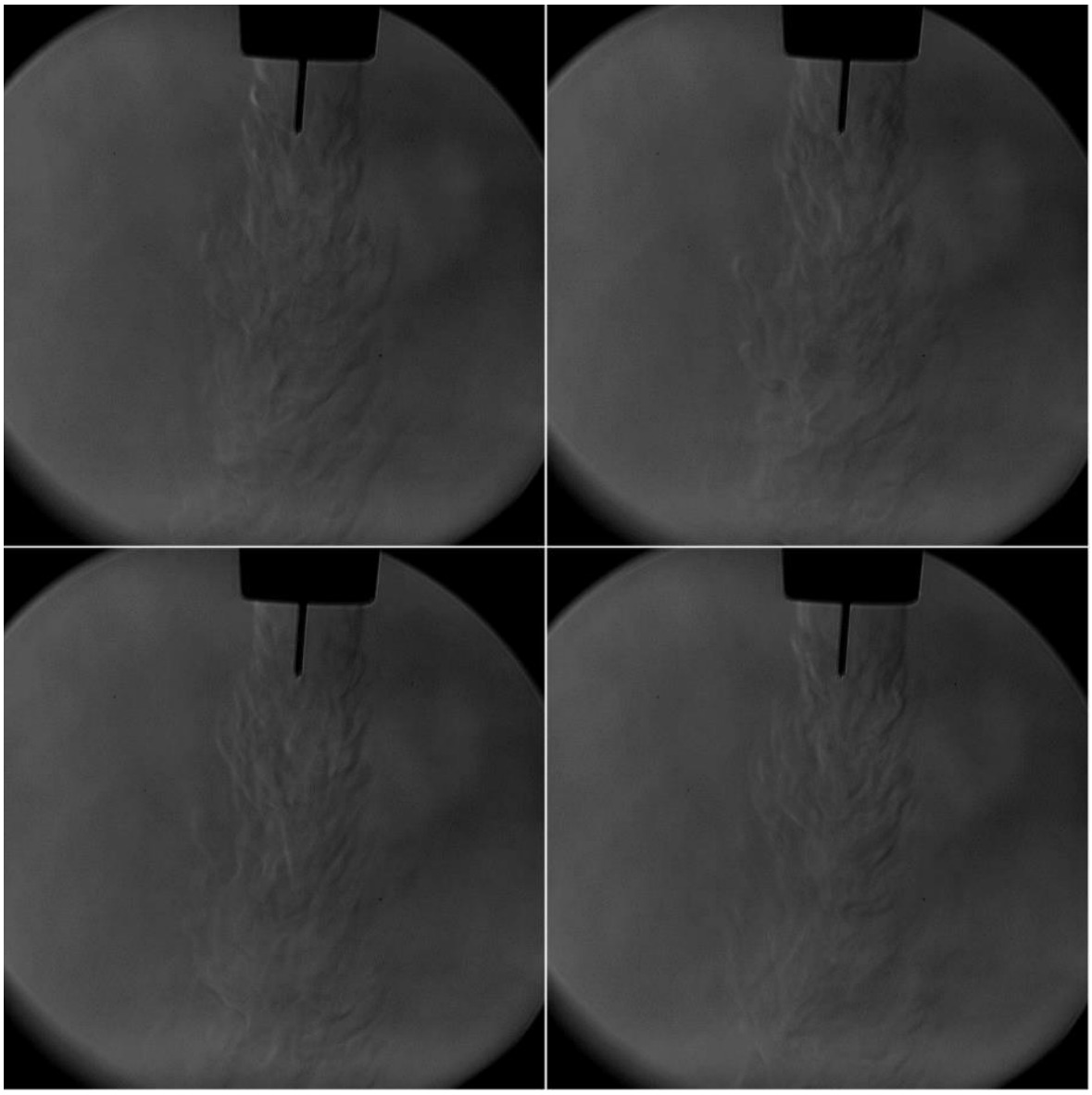
Koe 1.4. Pistooli 4



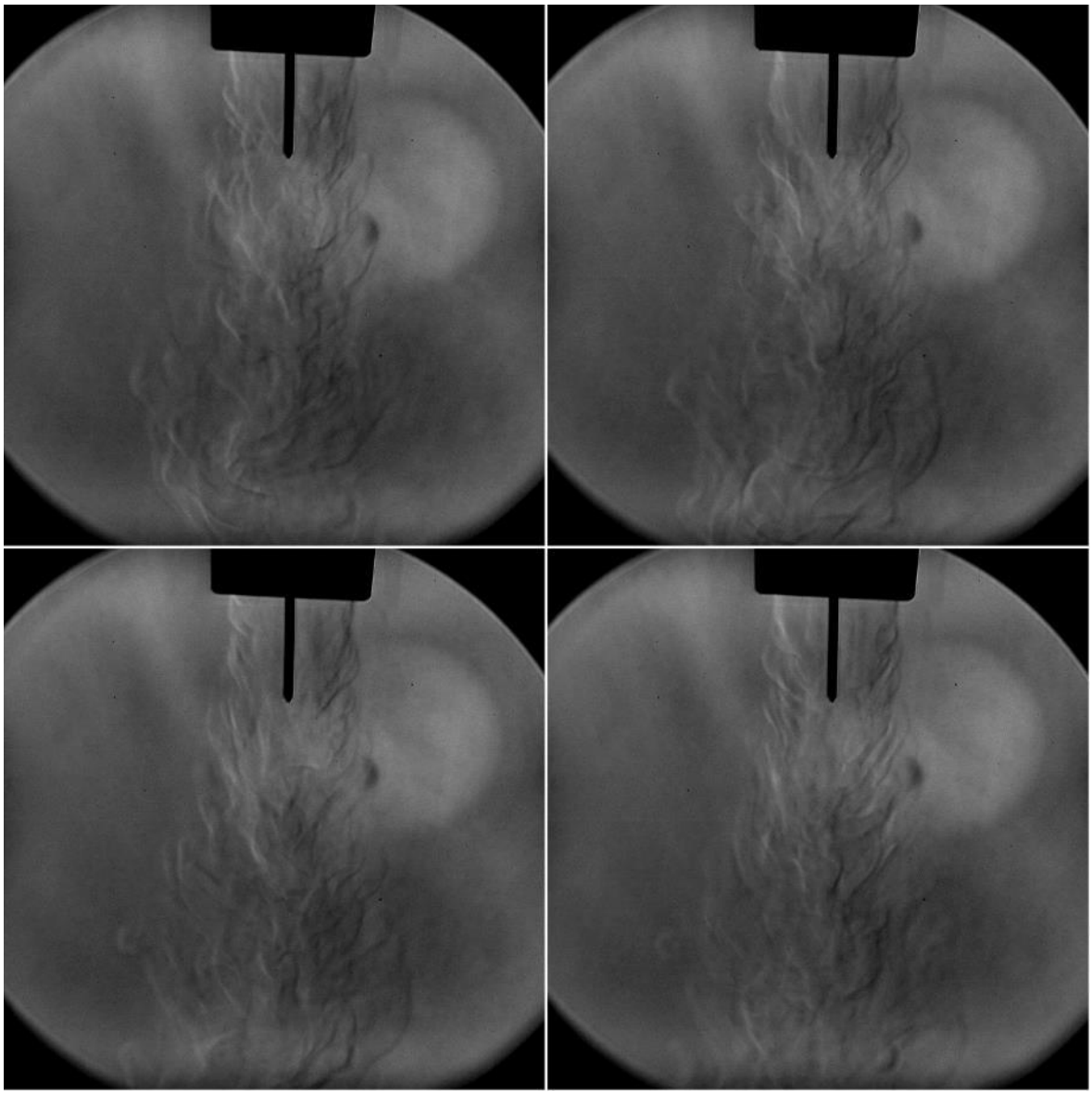
Koe 1.5. Pistooli 5



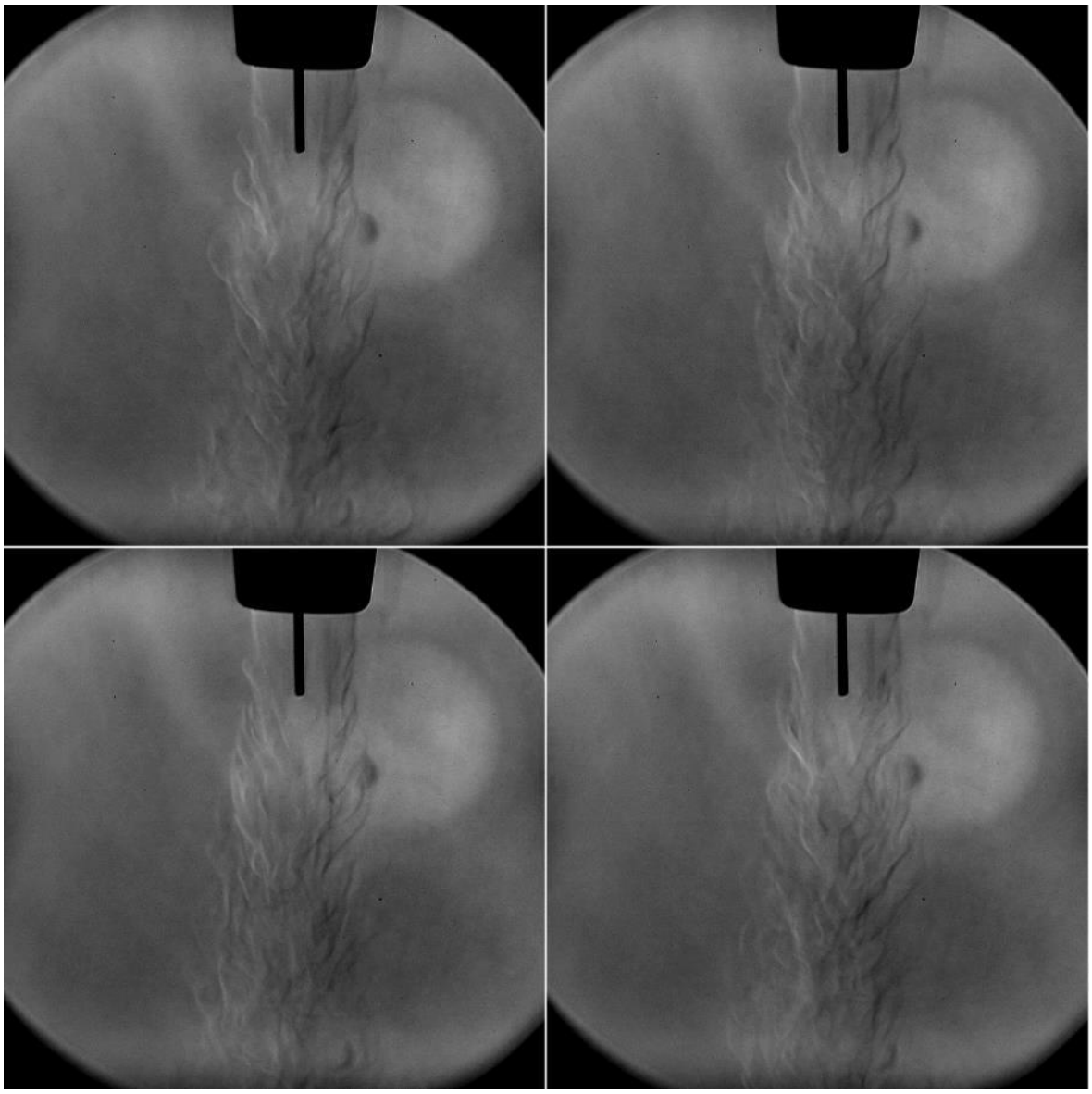
Koe 1.6. Pistooli 6



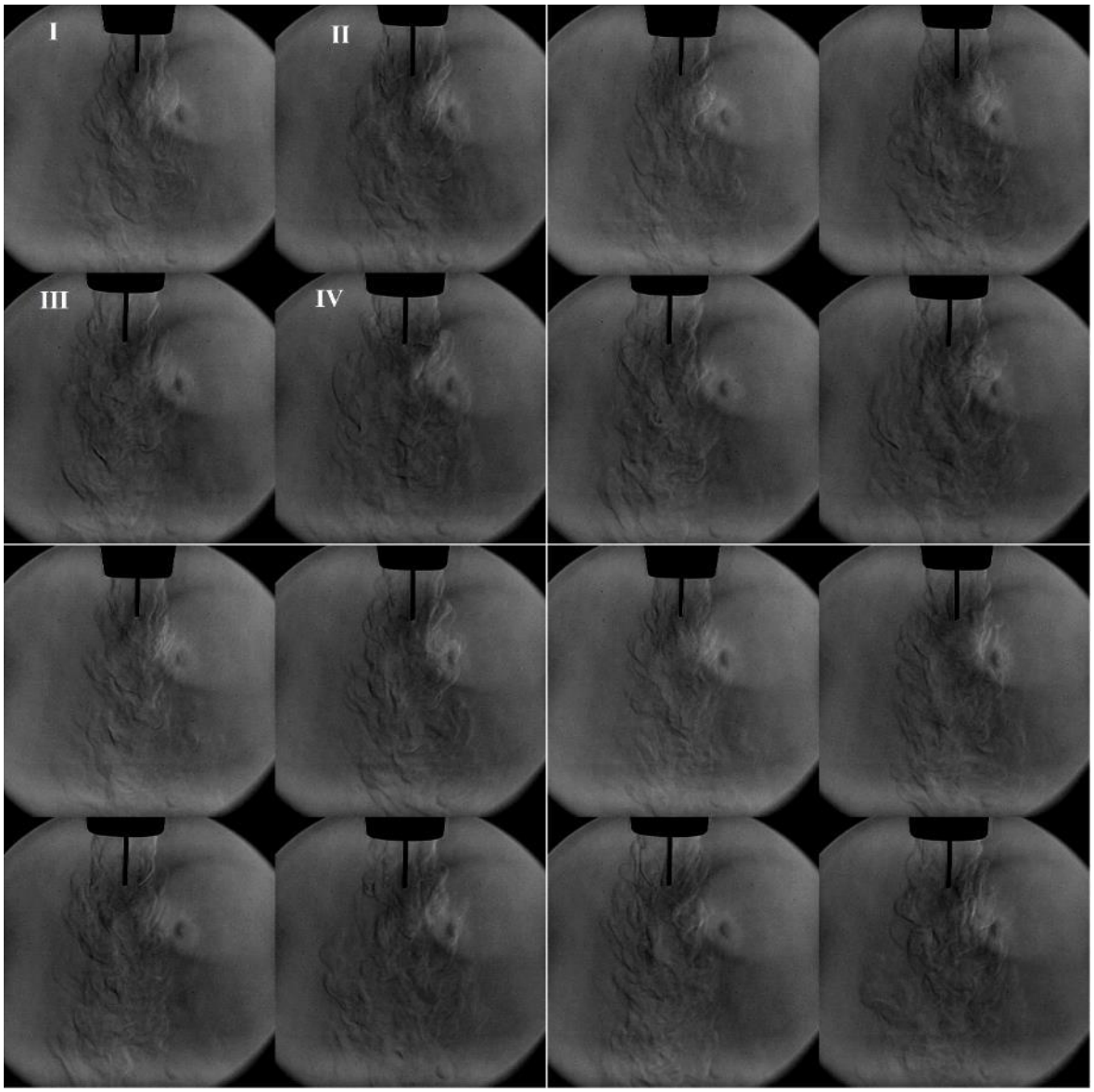
Koe 1.7. Pistooli 7



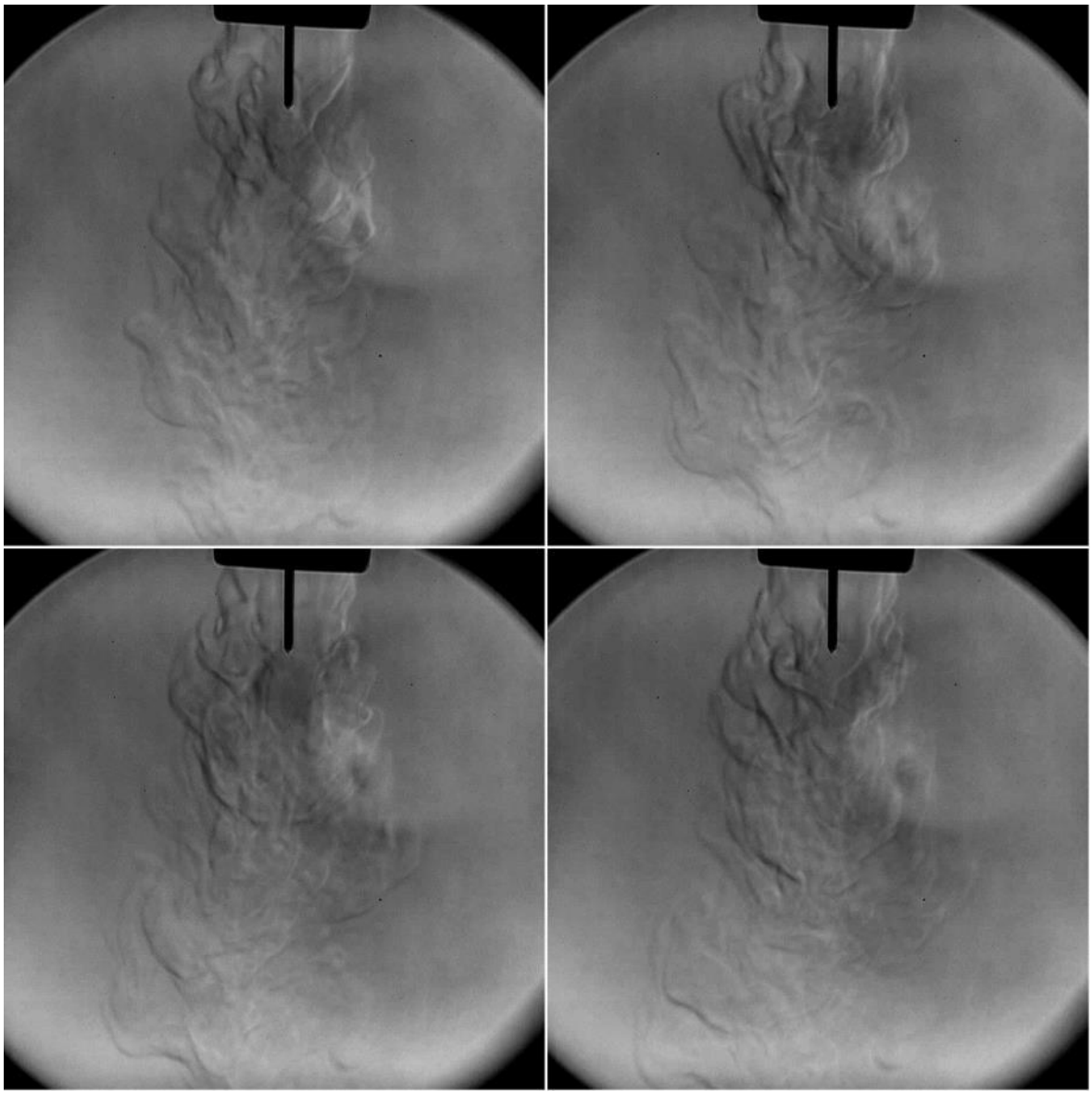
Koe 1.8. Pistooli 8



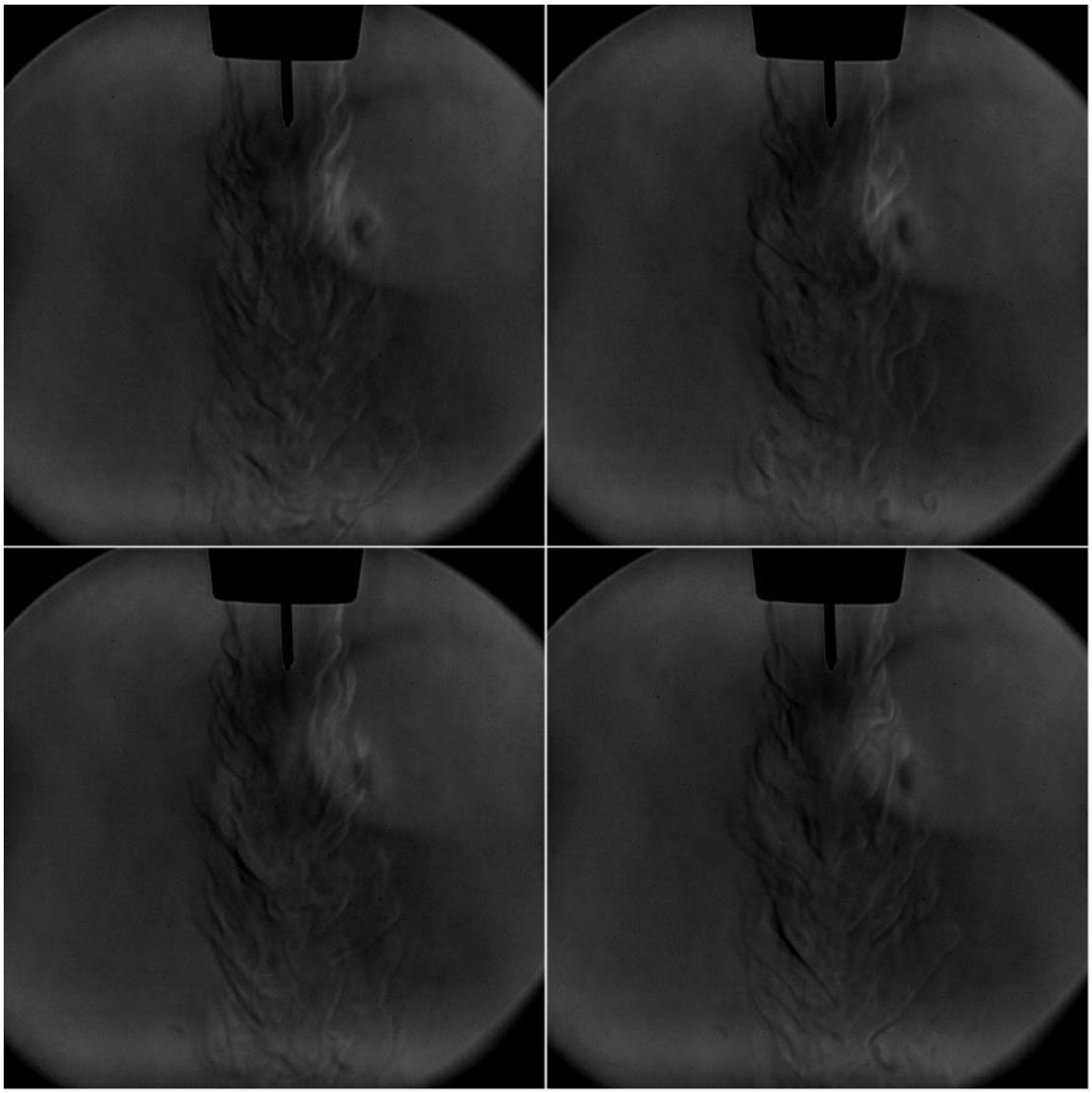
Kokeet 1.9.–1.12. Pistooli 9a, suuttimet I–IV. Kuvasarjan ensimmäisen ruudun kuviin on merkitty suuttimen numero.



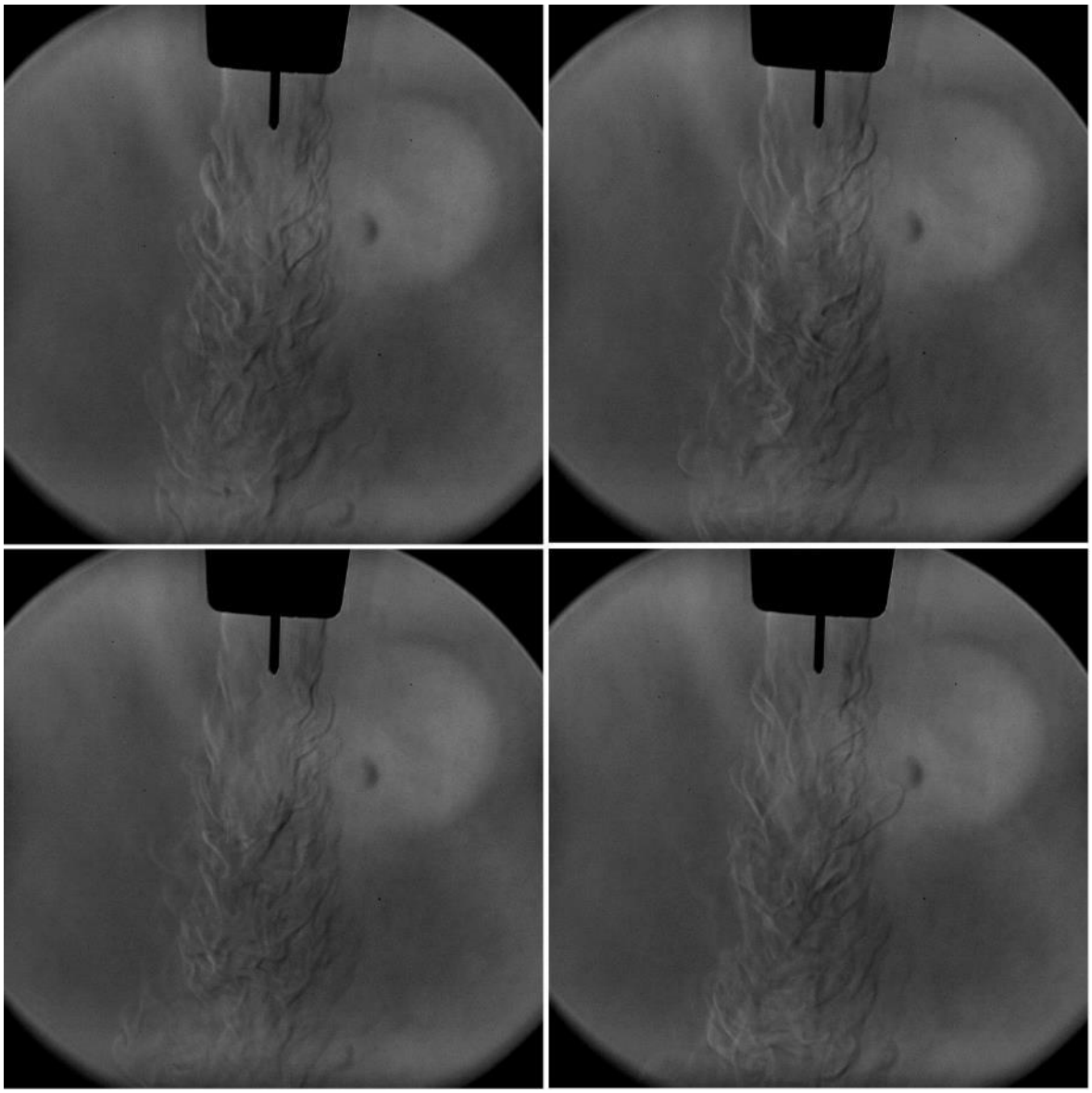
Koe 1.13. Pistooli 9b, suutin IV



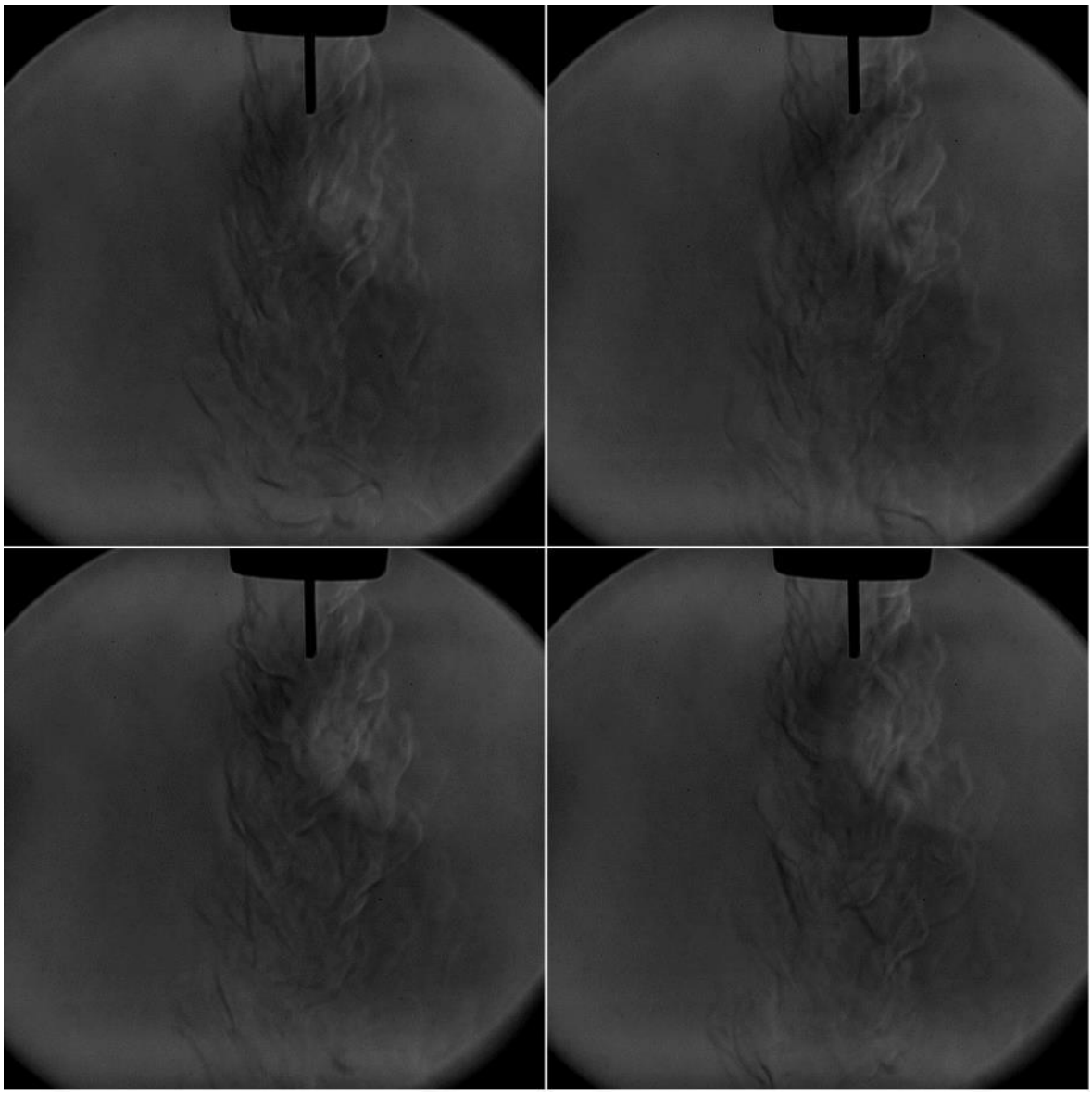
Koe 1.14. Pistooli 2 ilman lisädiffuusoria



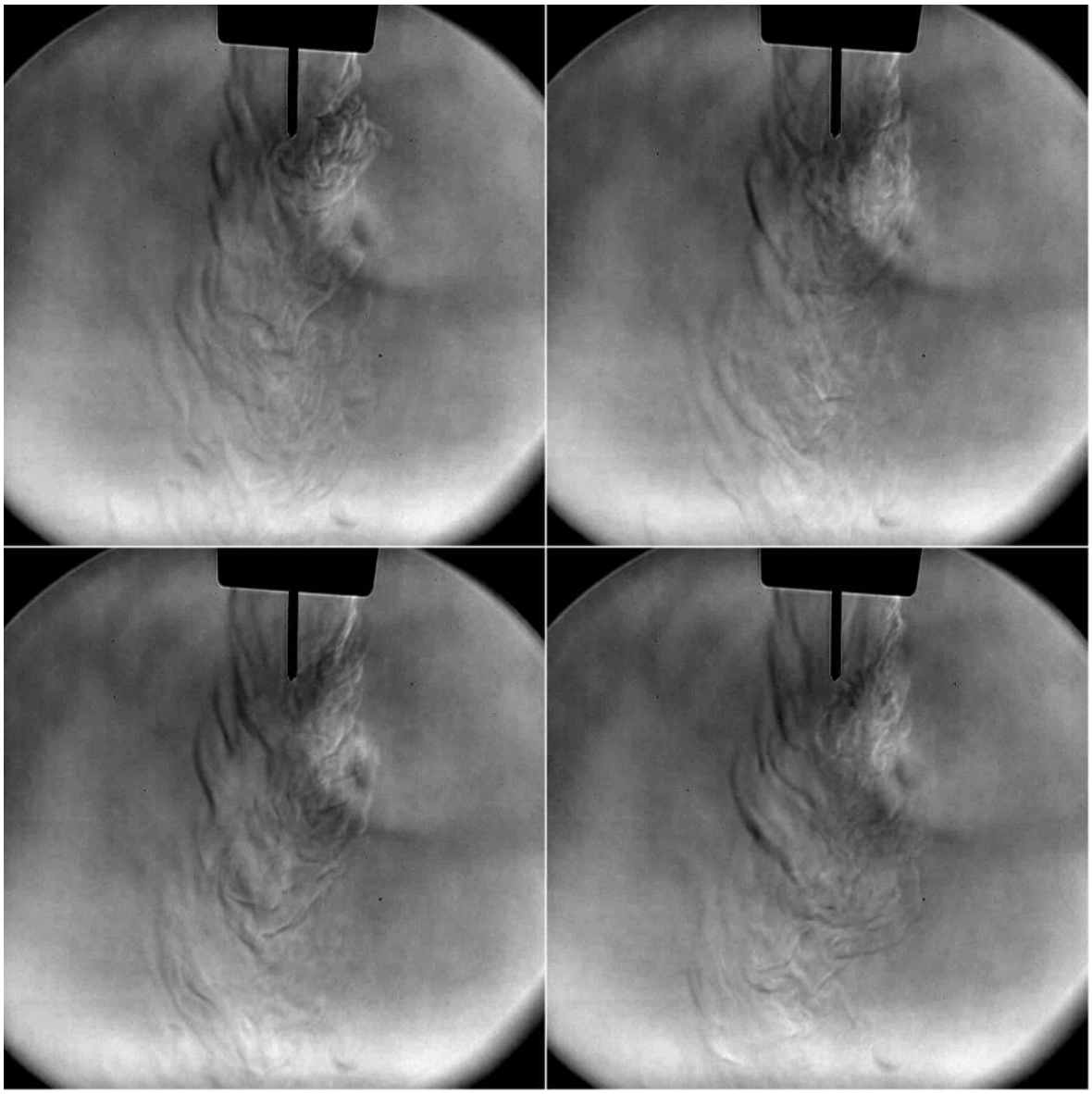
Koe 1.15. Pistooli 10



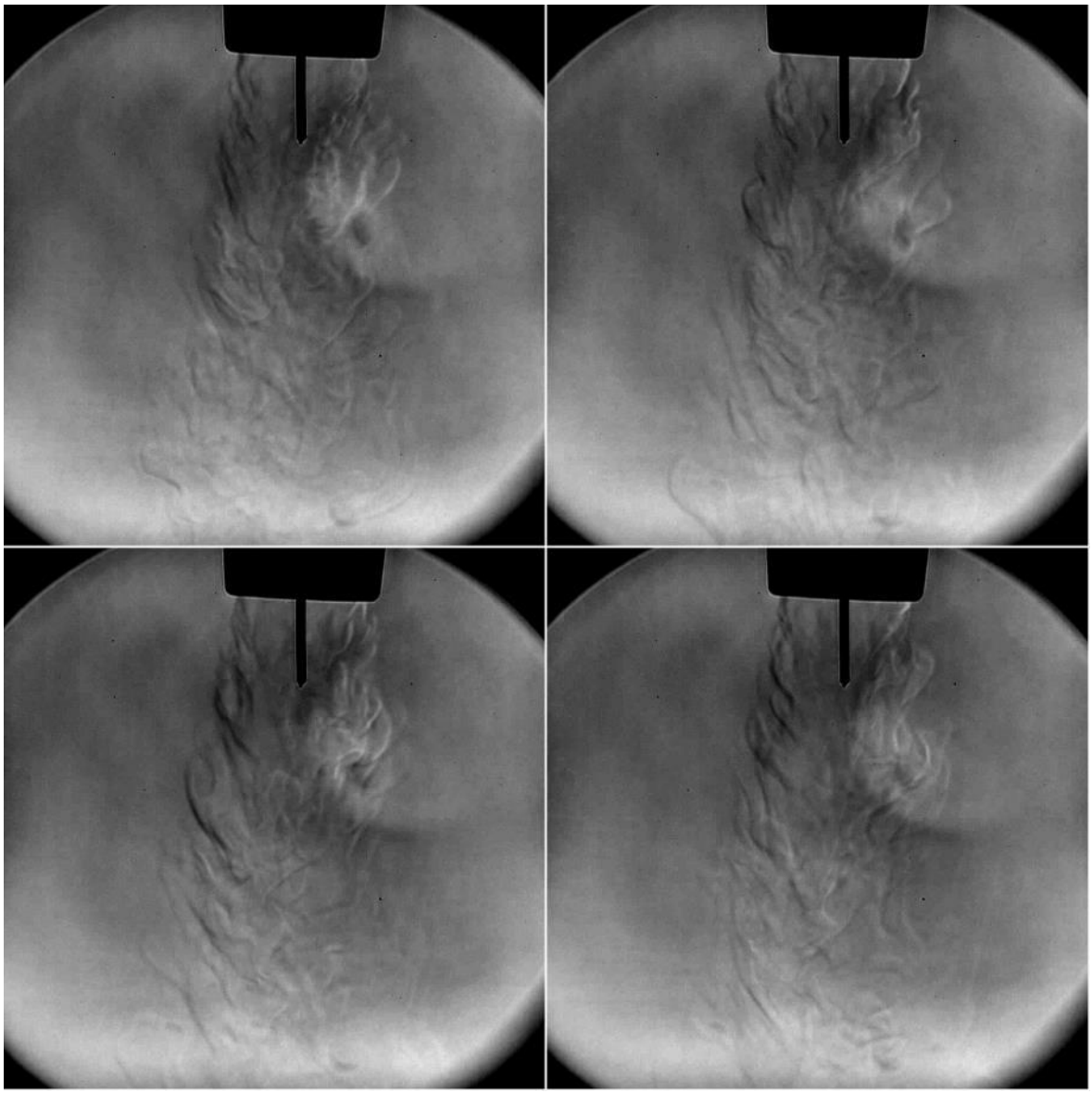
Koe 1.16. Pistooli 9a lisädiffuusorilla, suutin IV



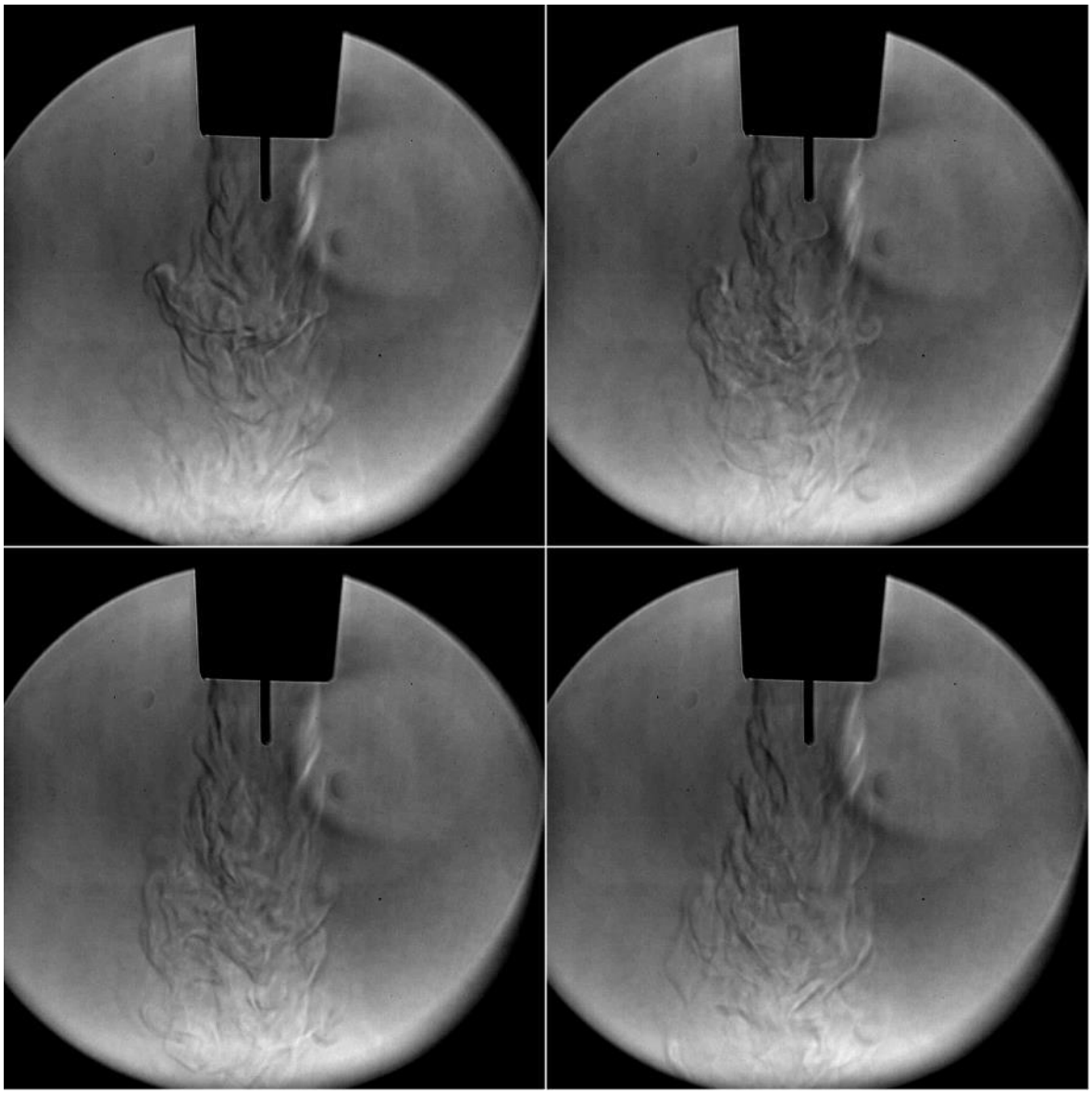
Koe 1.17a. Pistooli 9b lisädiffuusorilla, suutin IV



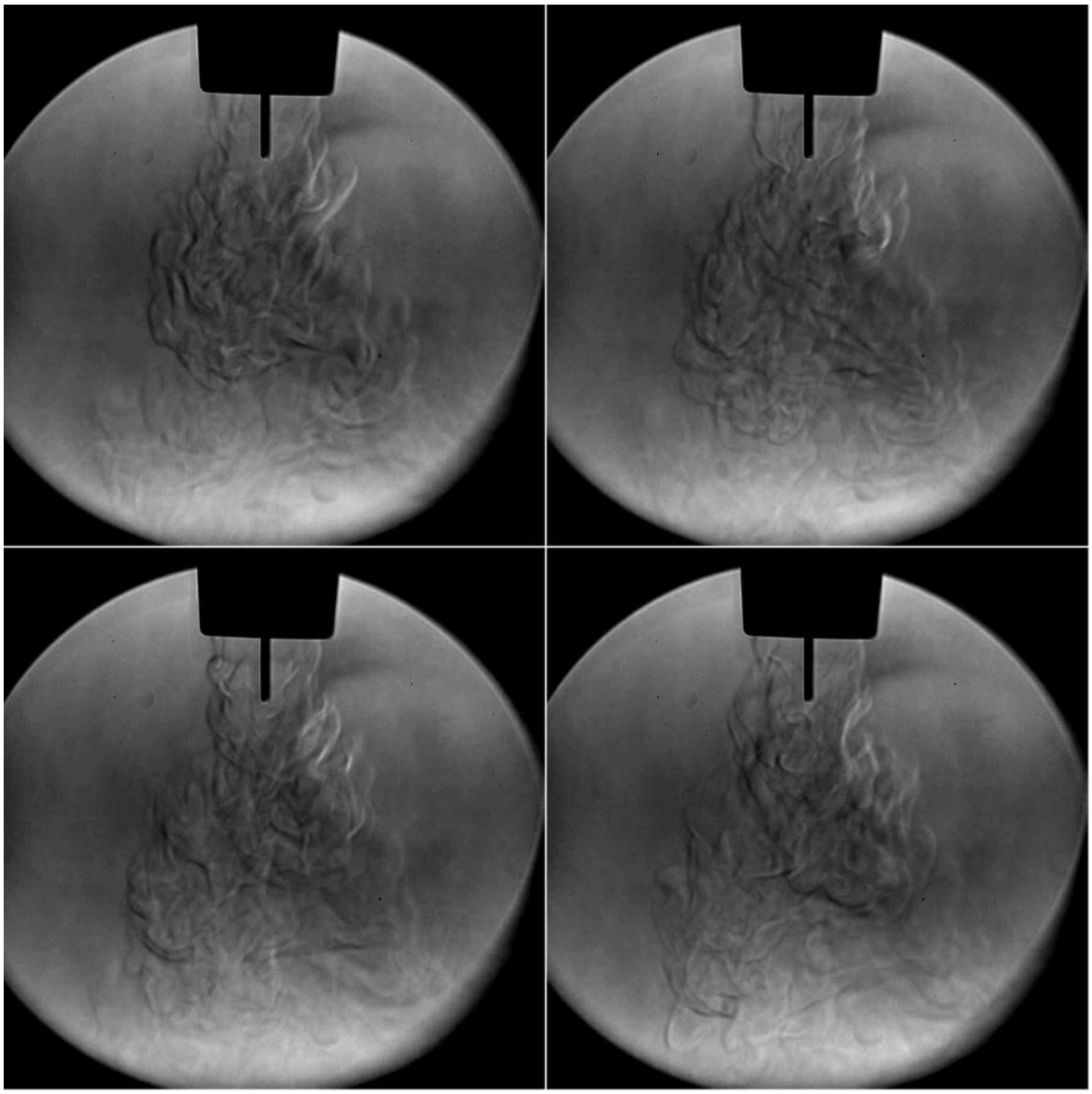
Koe 1.17b. Pistooli 9b lisädiffuusorilla, vuodot teipattu, suutin IV



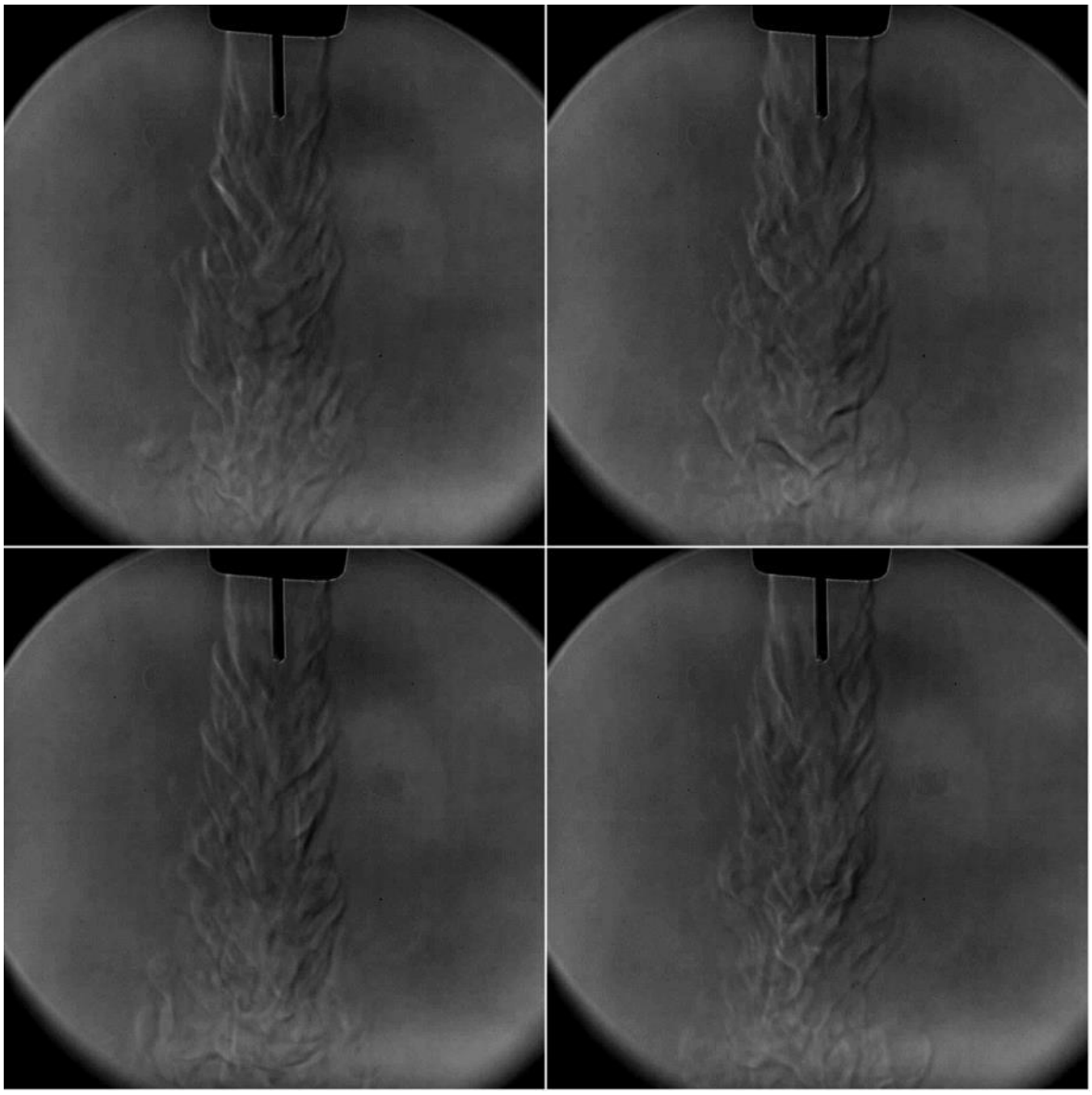
Koe 1.18a. Pistooli 9b, diffuusori 2, kaasusuutin IV



Koe 1.18b. Pistooli 9b, diffuusori 2, kaasusuutin IV, vuodot teipattu

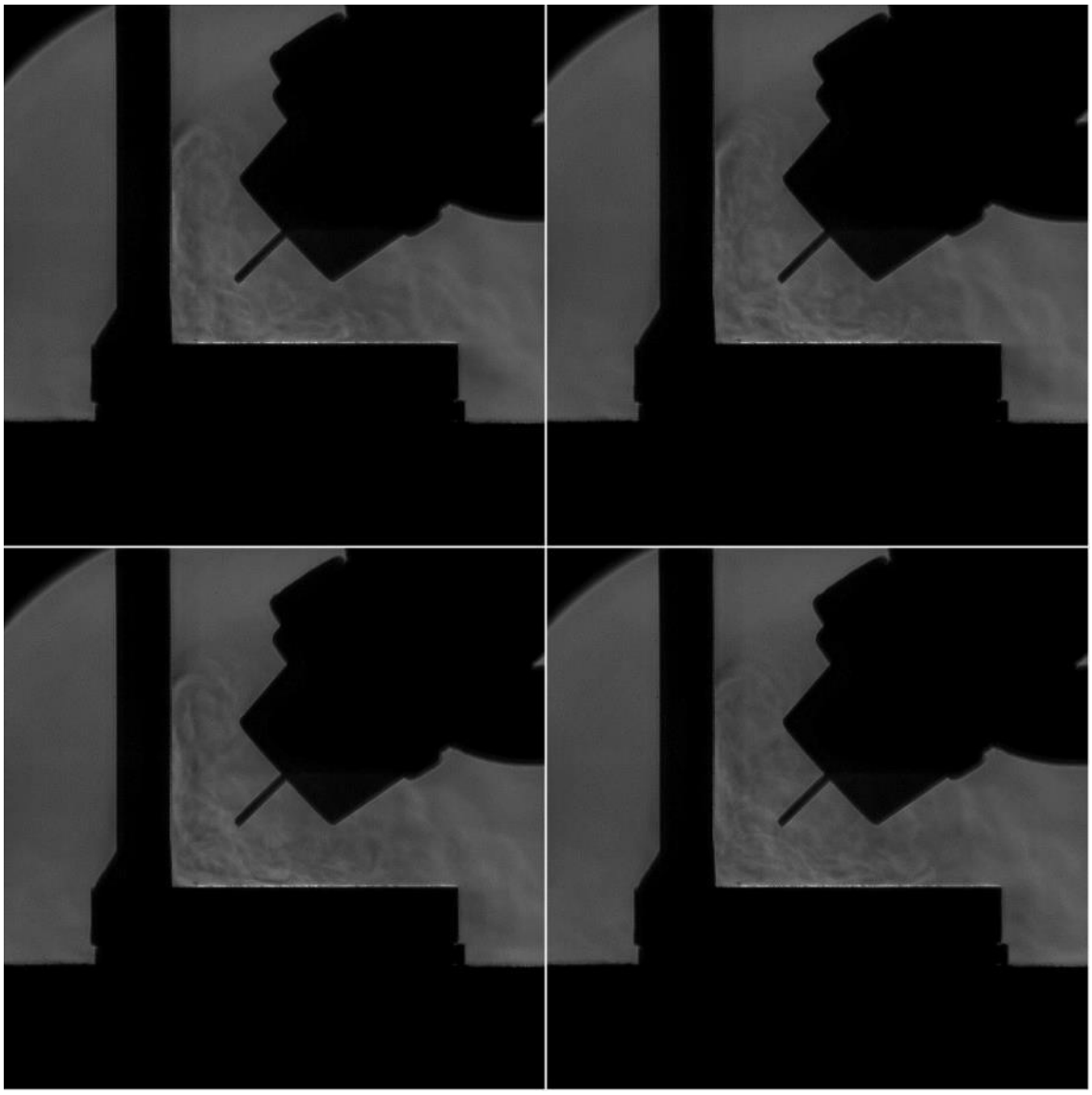


Koe 1.19. Pistooli 10, diffuusori 2

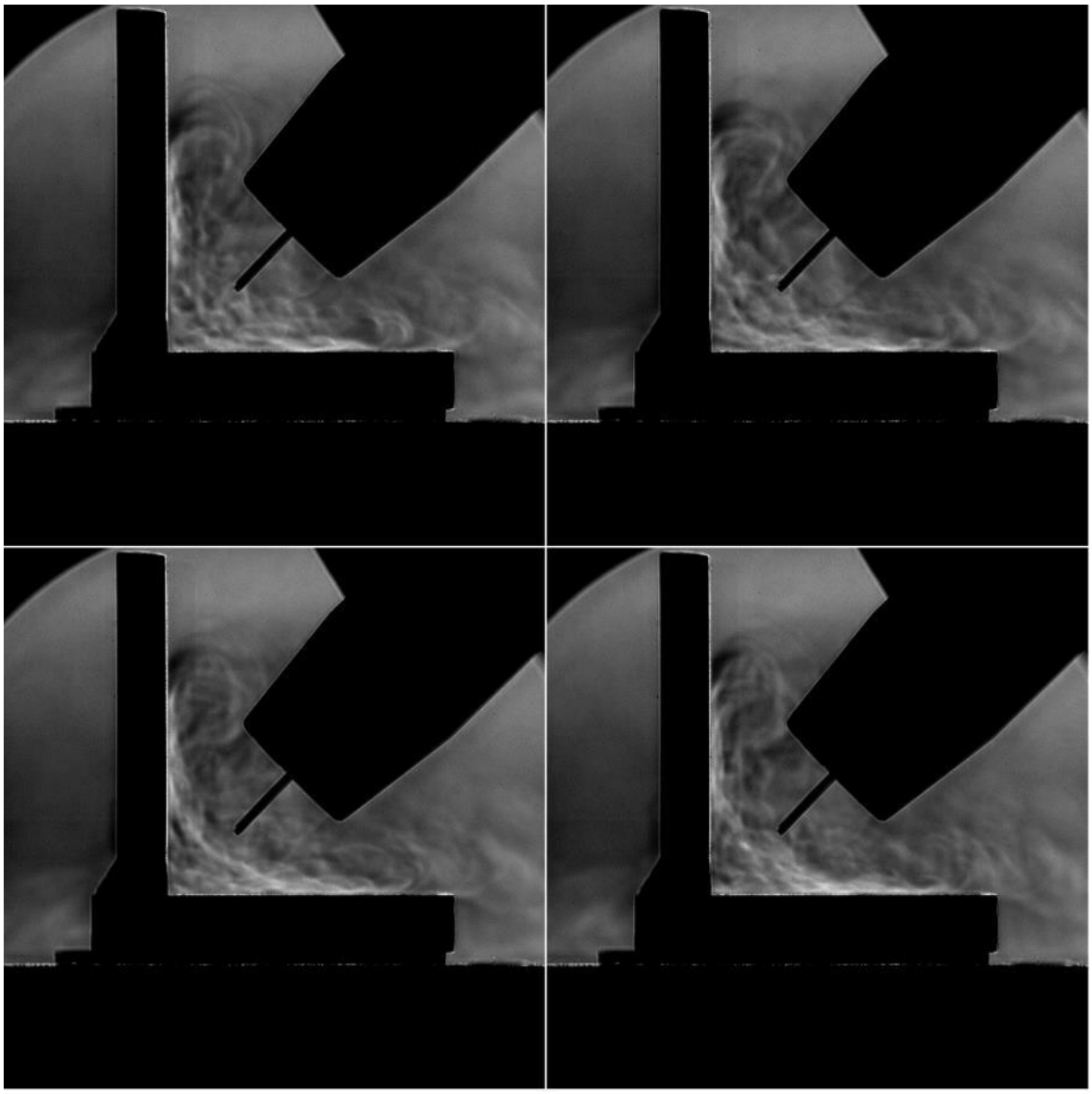


Koesarjan 2 kuvasarjat.

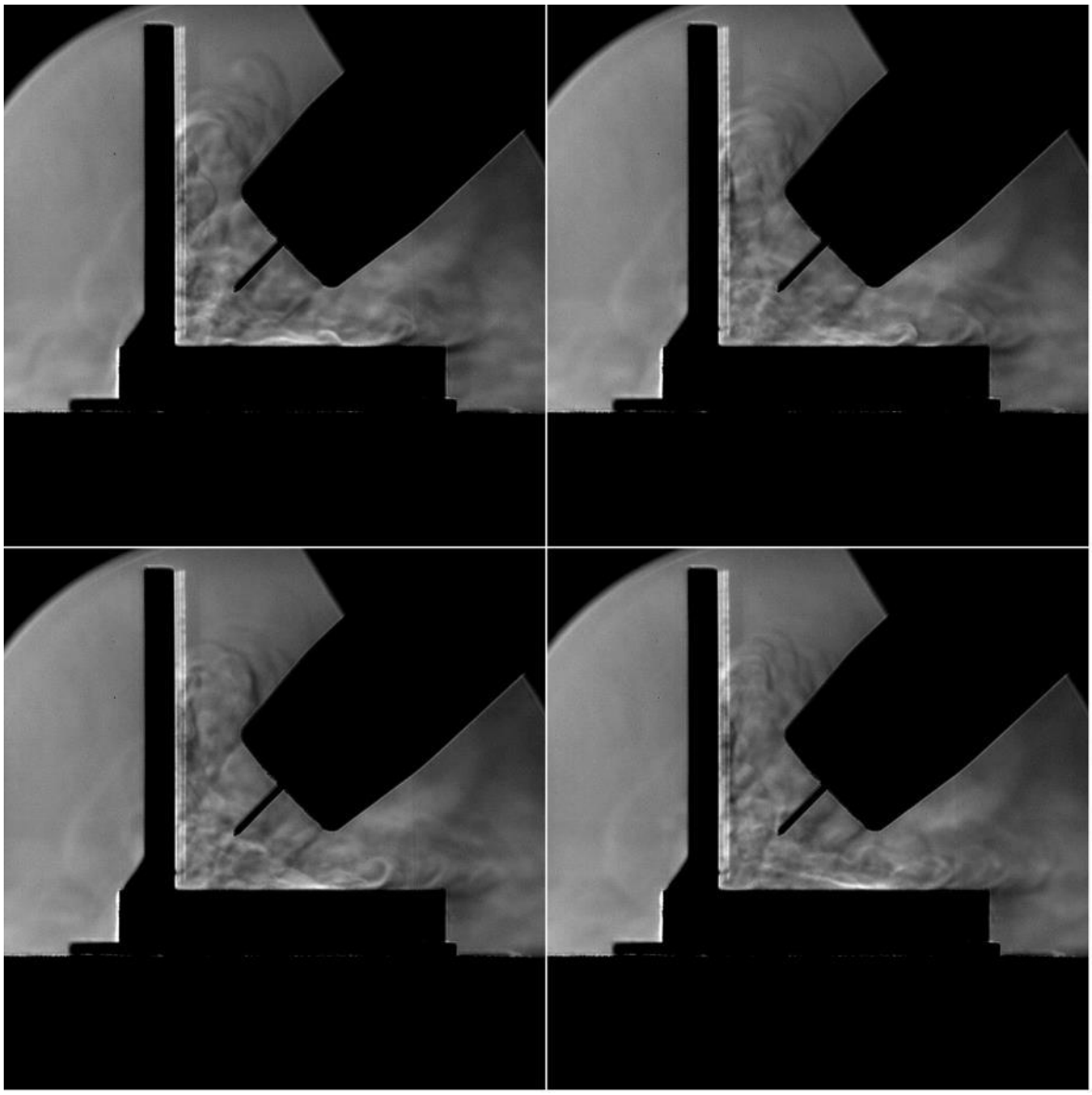
Koe 2.1. Pistooli 1



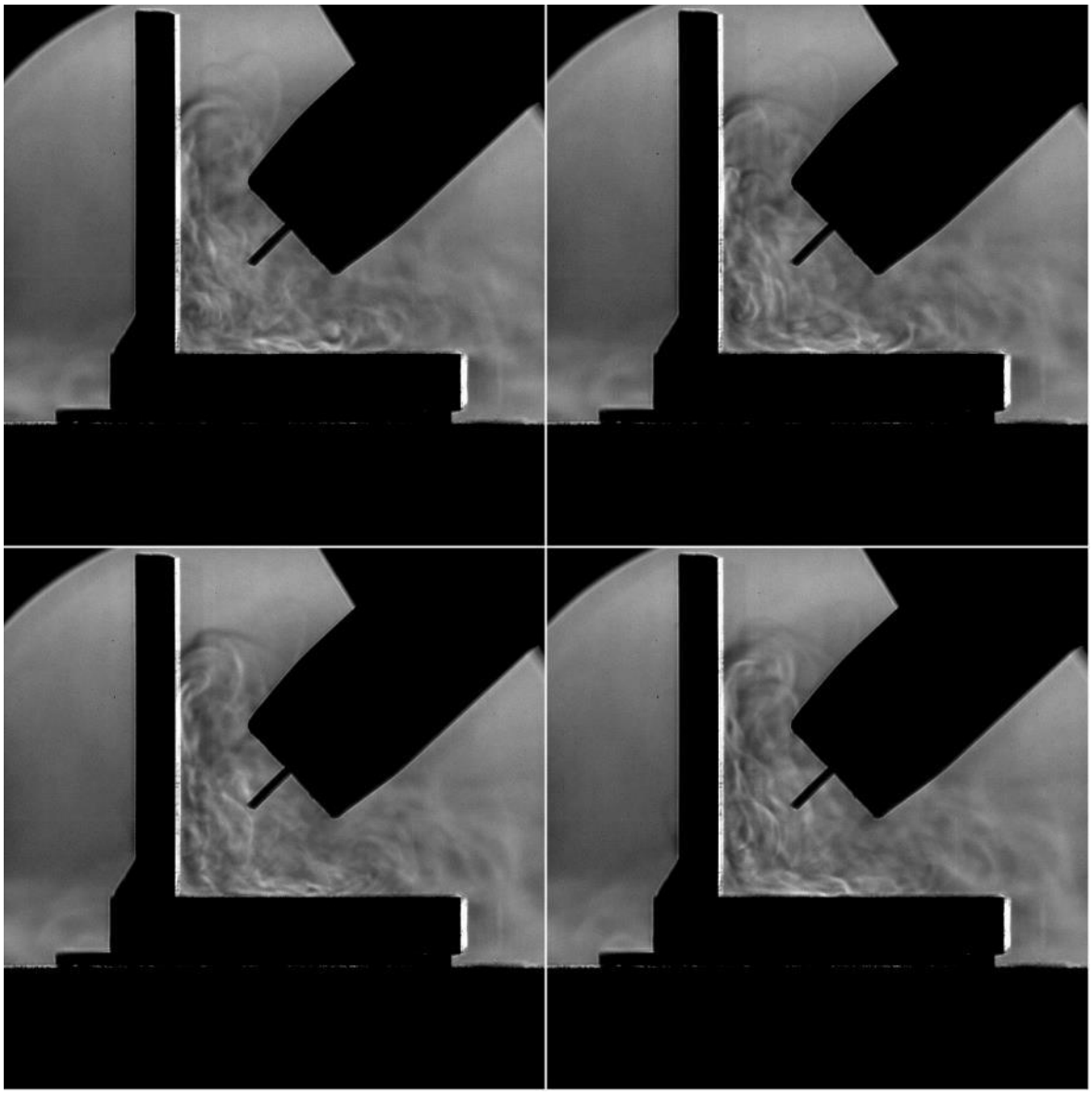
Koe 2.2. Pistooli 2



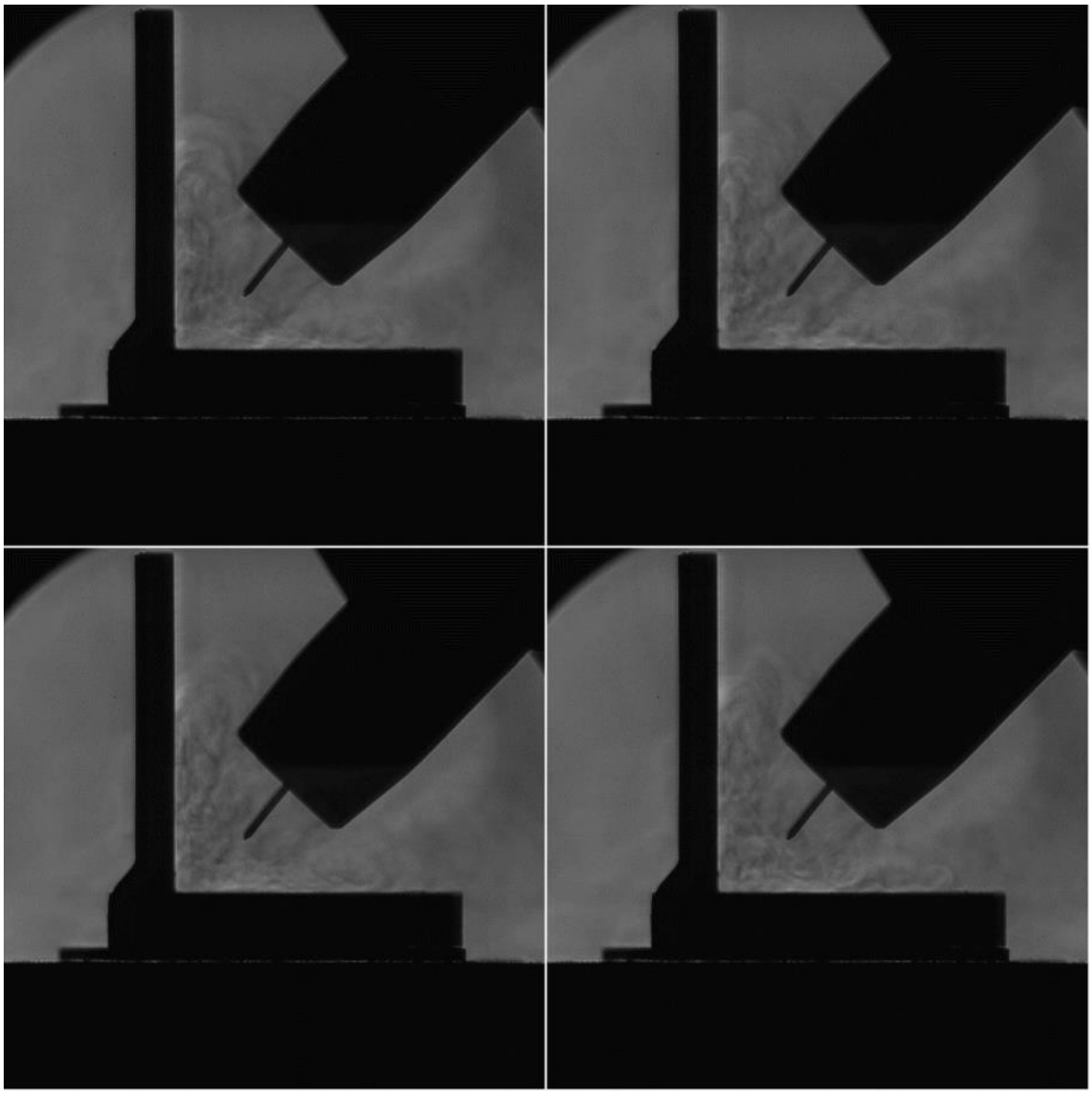
Koe 2.3. Pistooli 3



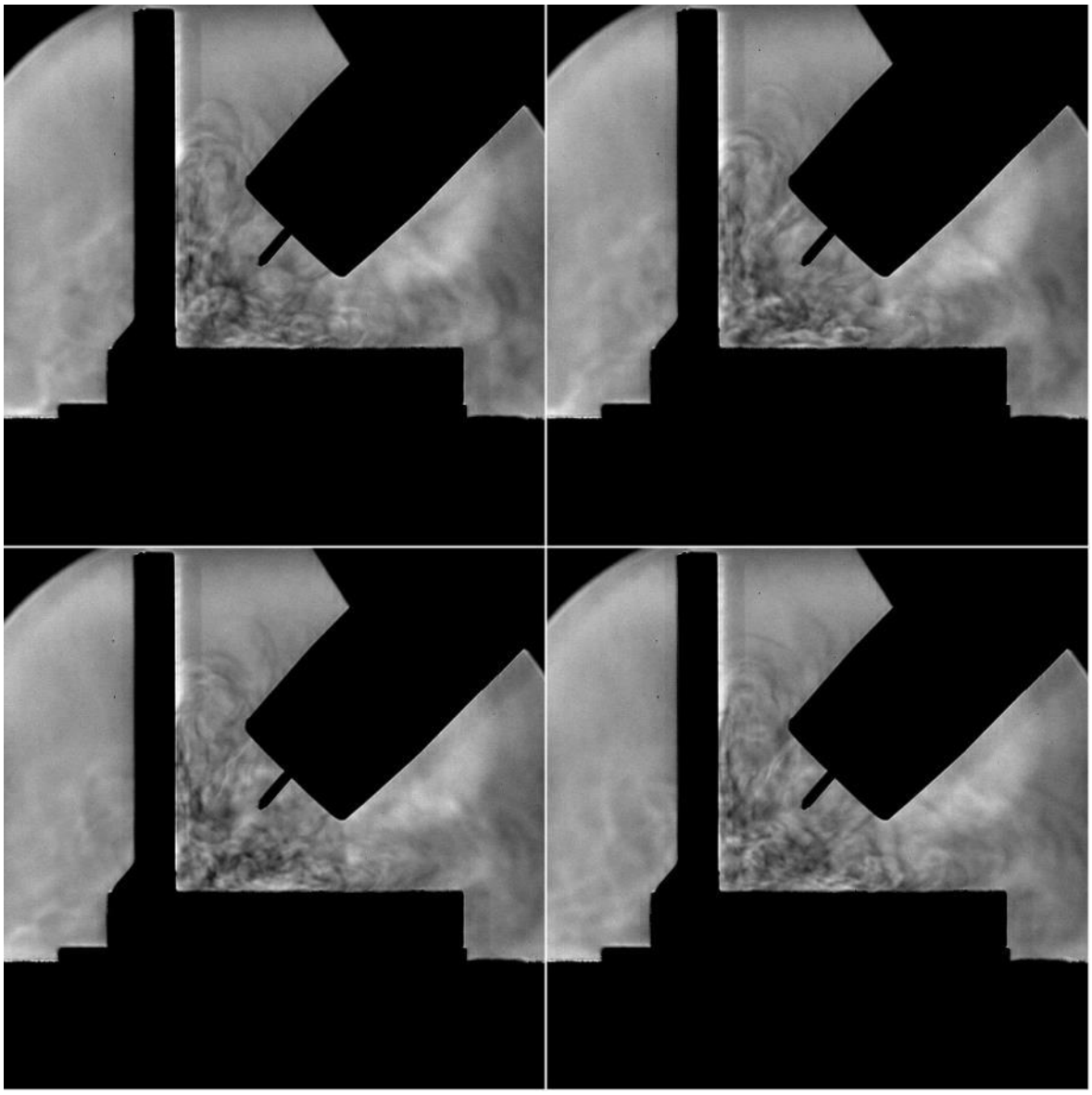
Koe 2.4. Pistooli 4



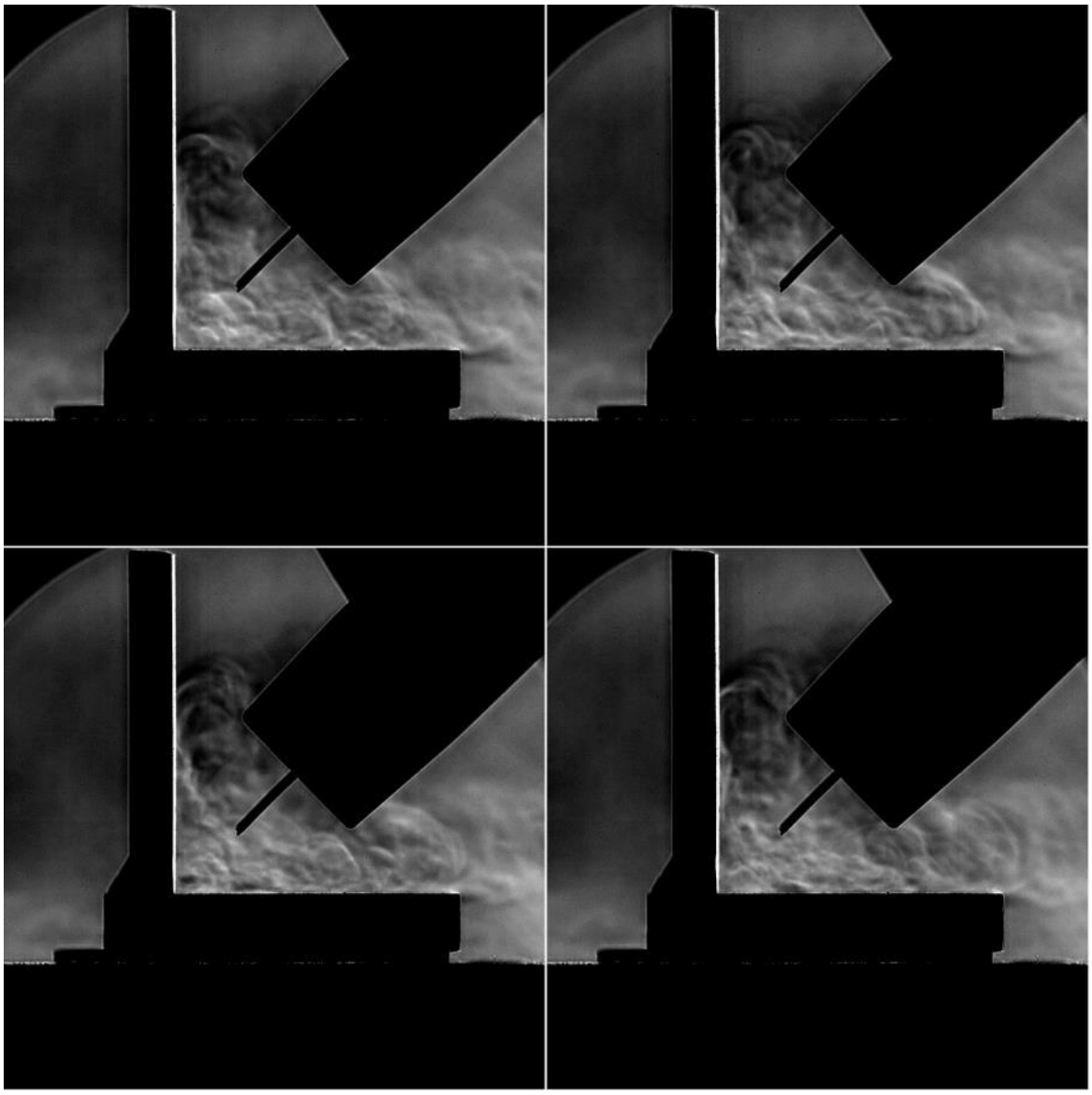
Koe 2.5. Pistooli 5



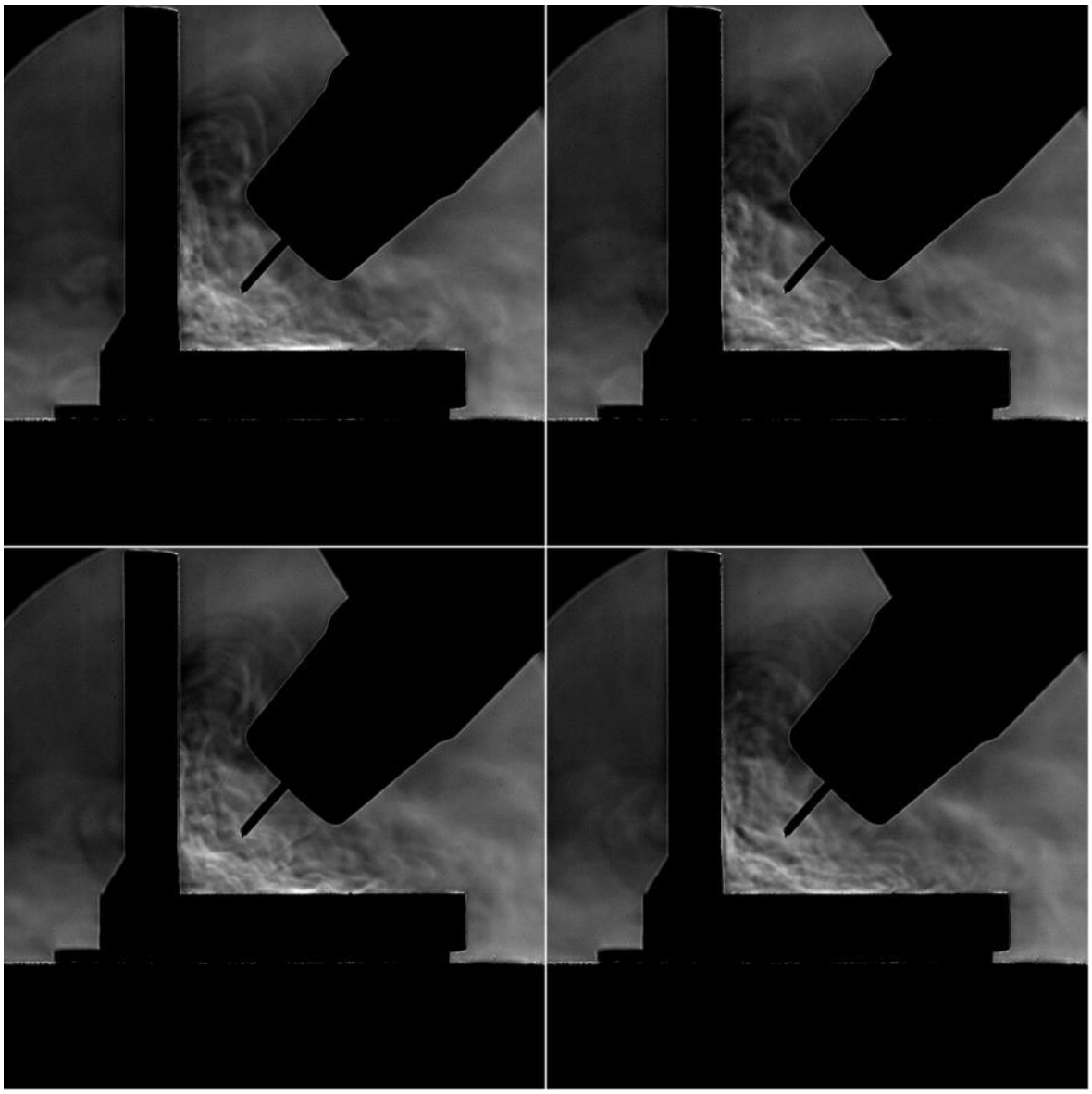
Koe 2.6. Pistooli 6



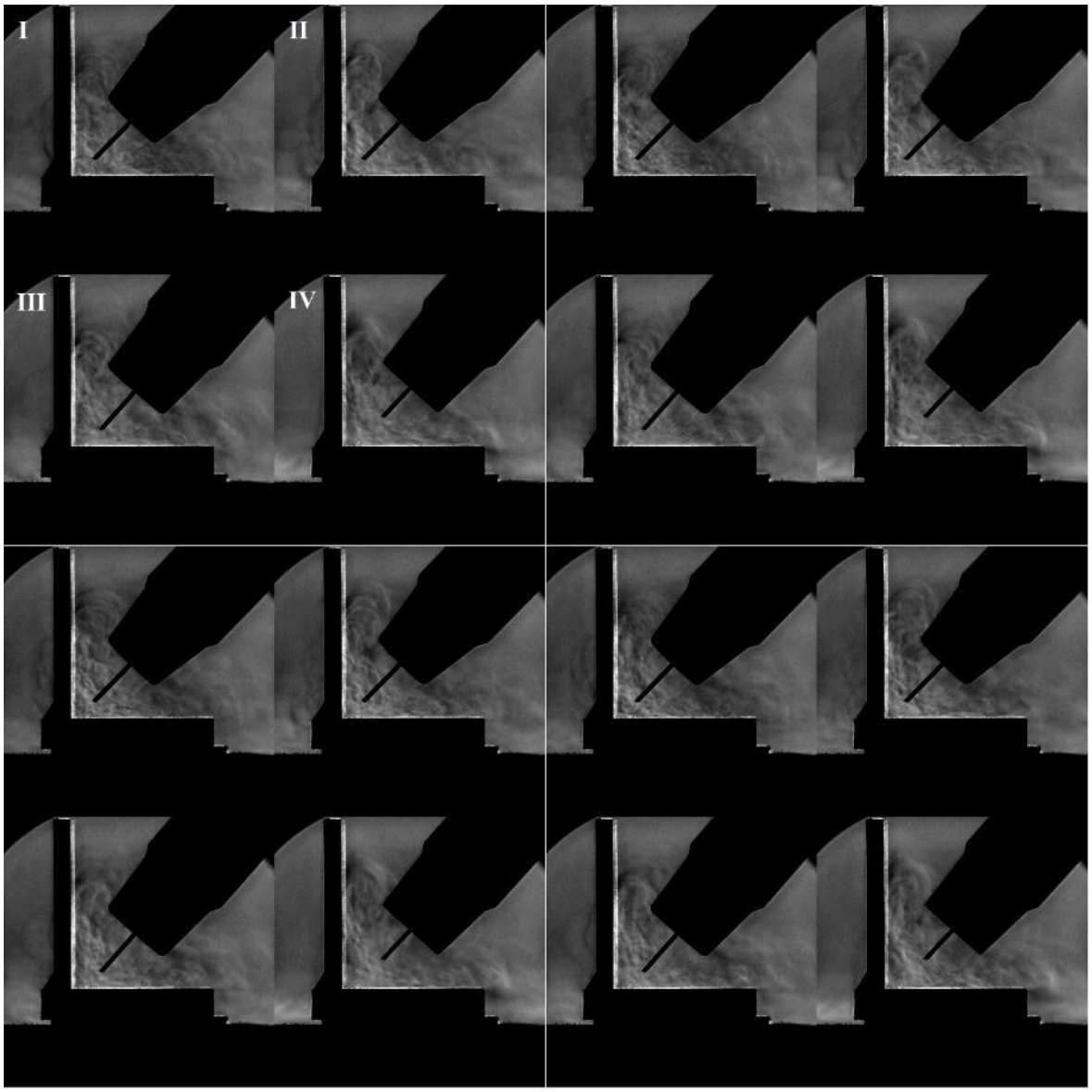
Koe 2.7. Pistooli 7



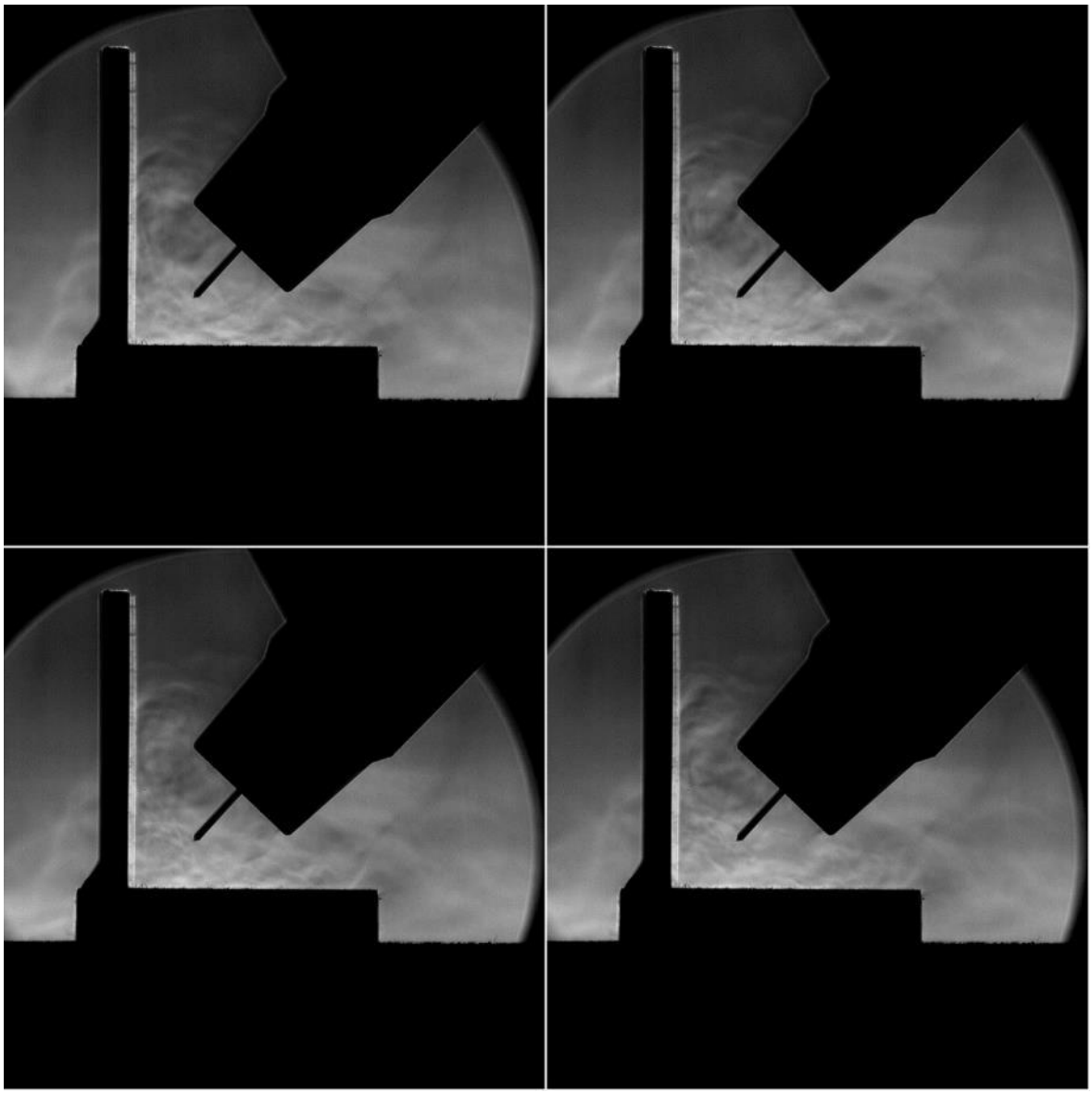
Koe 2.8. Pistooli 8



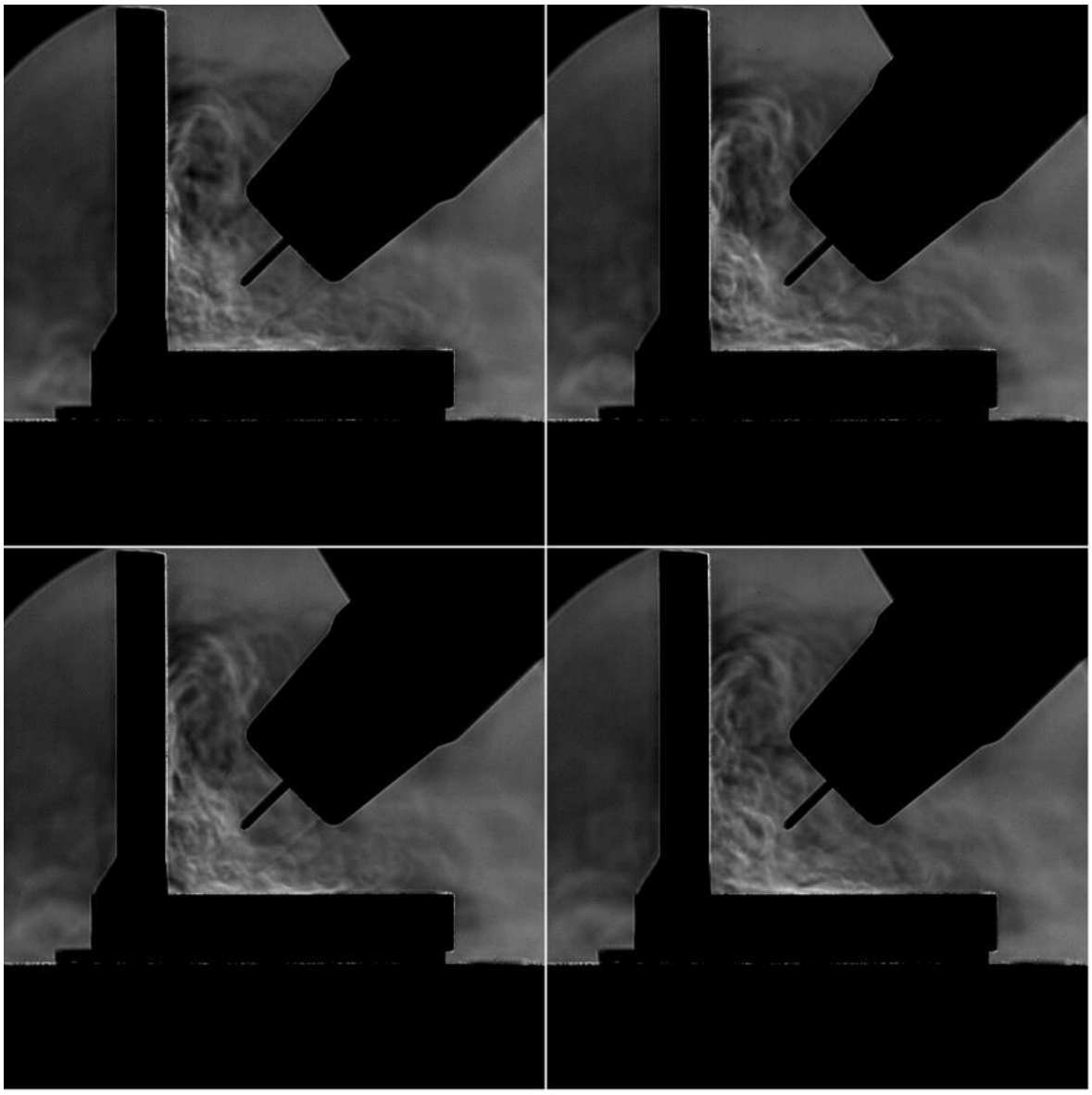
Kokeet 2.9–2.12. pistooli 9a, suuttimet I–IV. Kuvasarjan ensimmäisen ruudun kuviin on merkitty suuttimen numero.



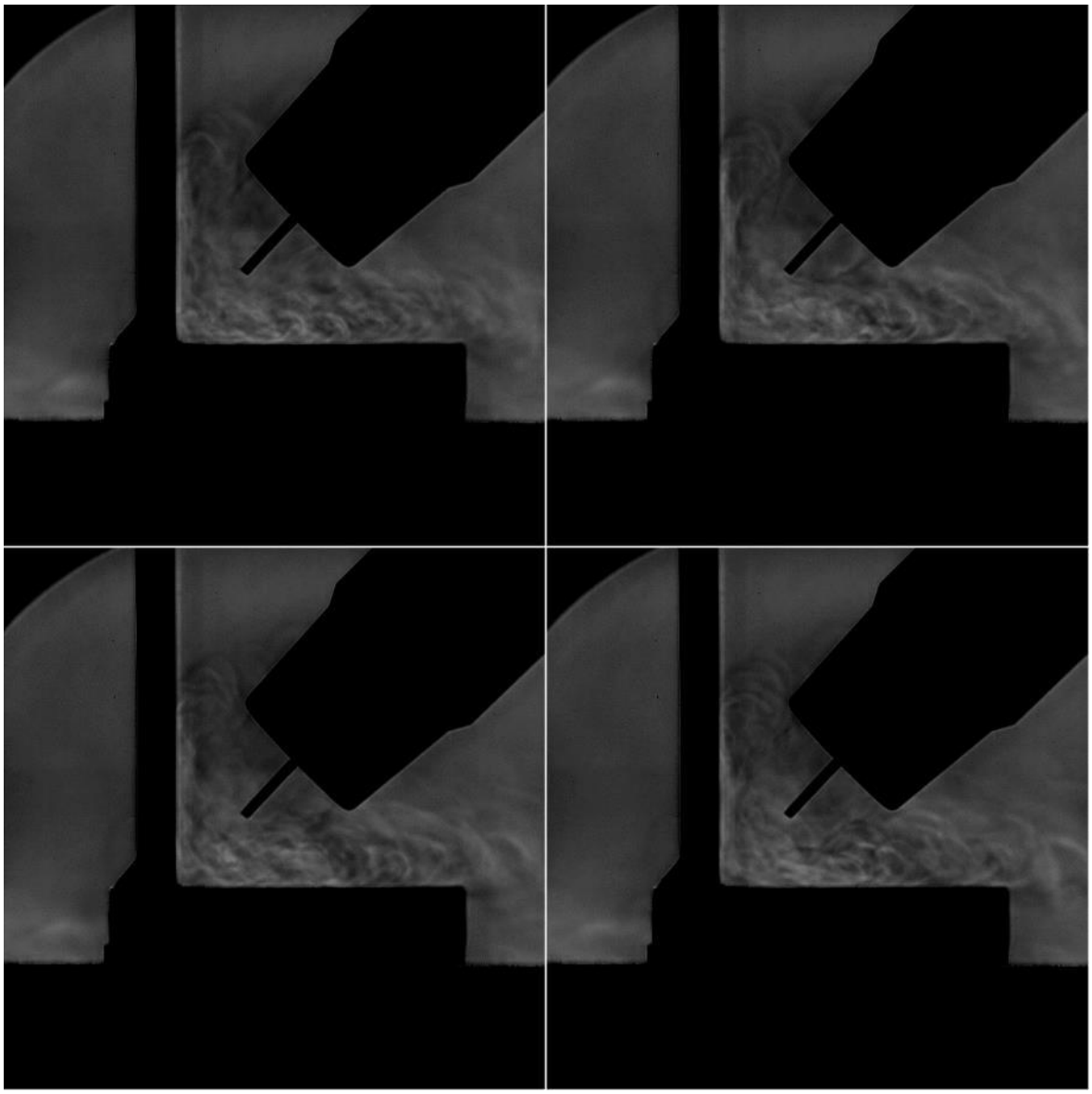
Koe 2.13. Pistooli 9b, kaasusuutin IV



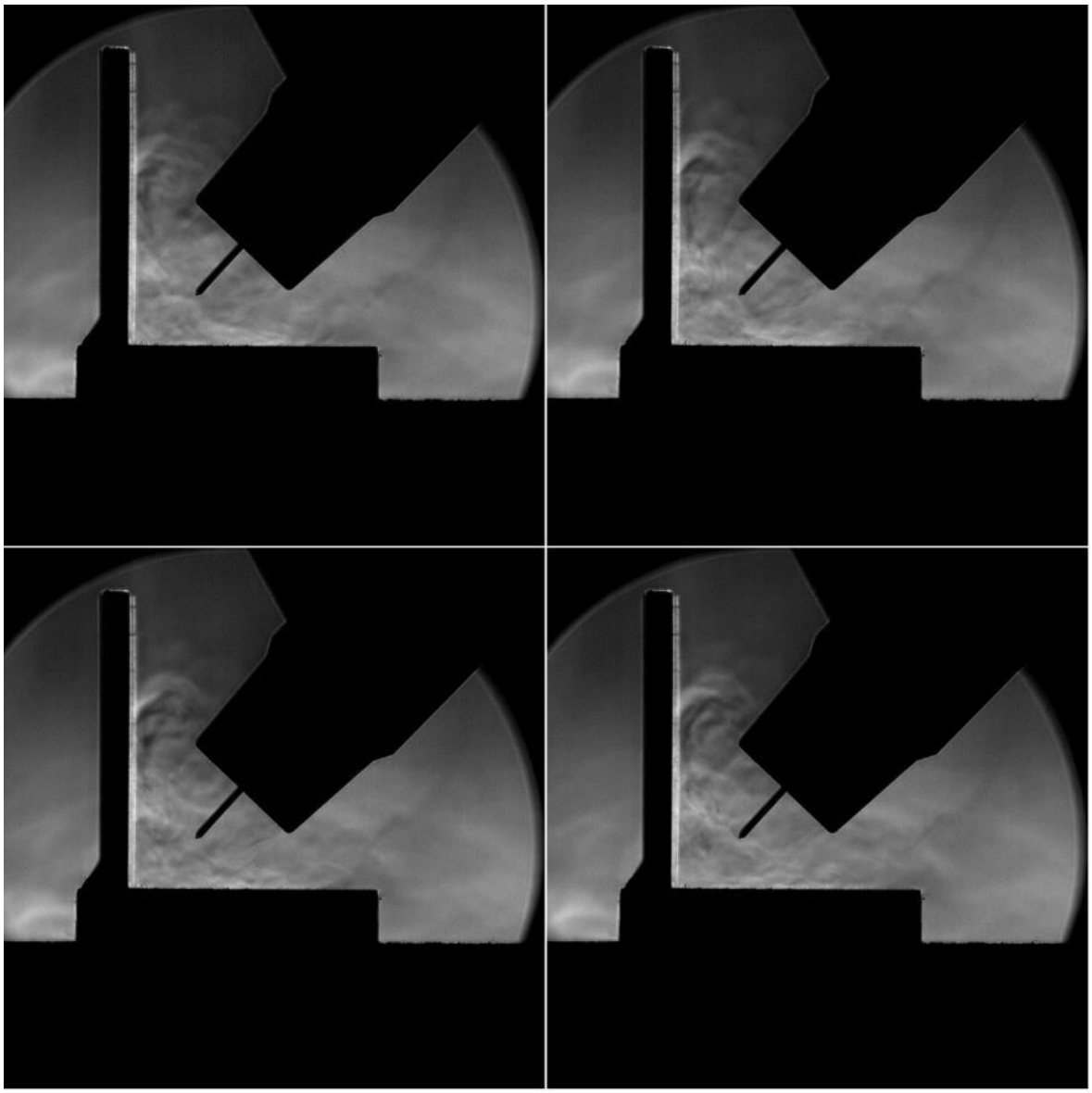
Koe 2.14. Pistooli 10



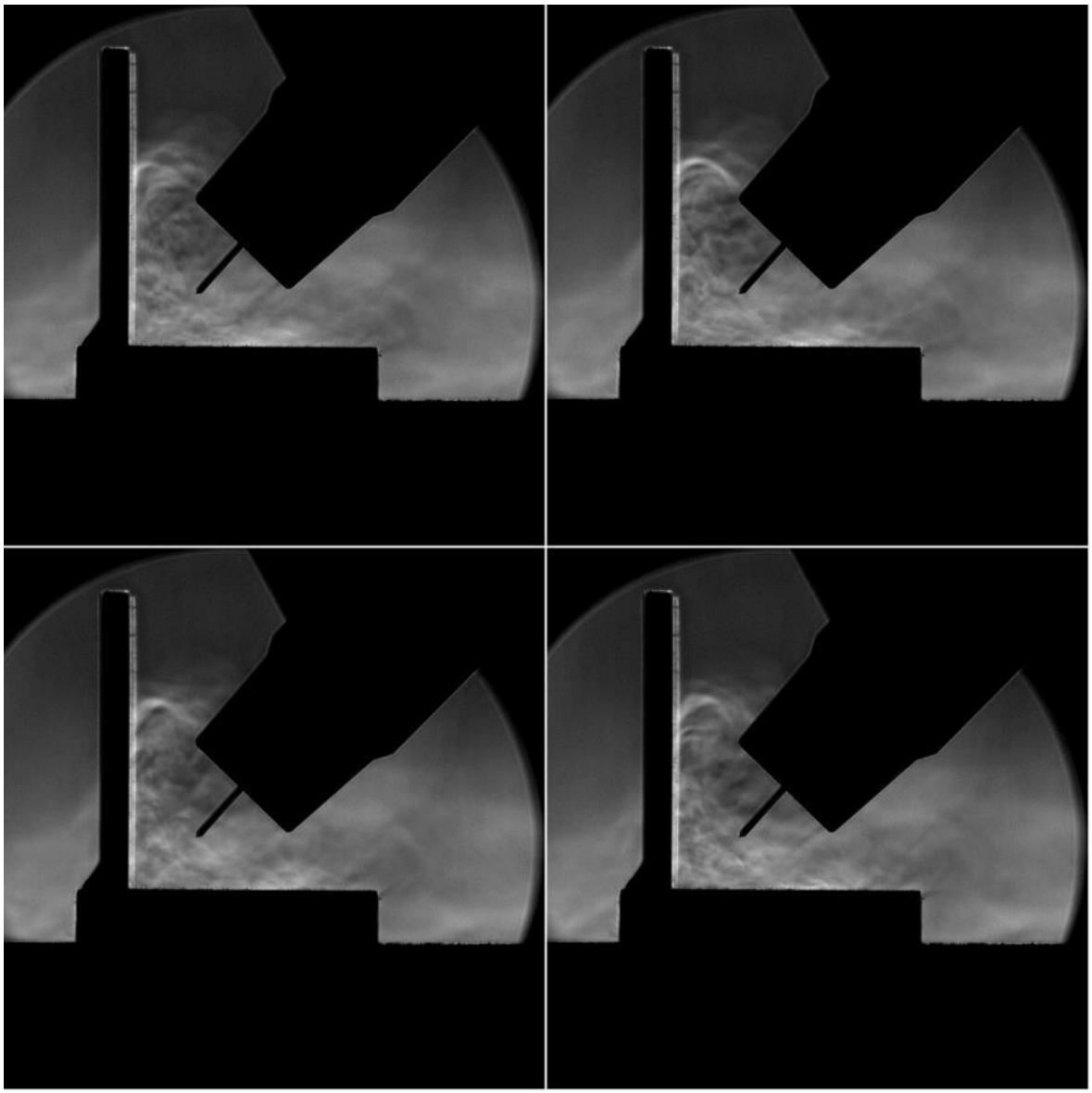
Koe 2.15. Pistooli 9a lisädiffuusorilla, kaasusuutin IV



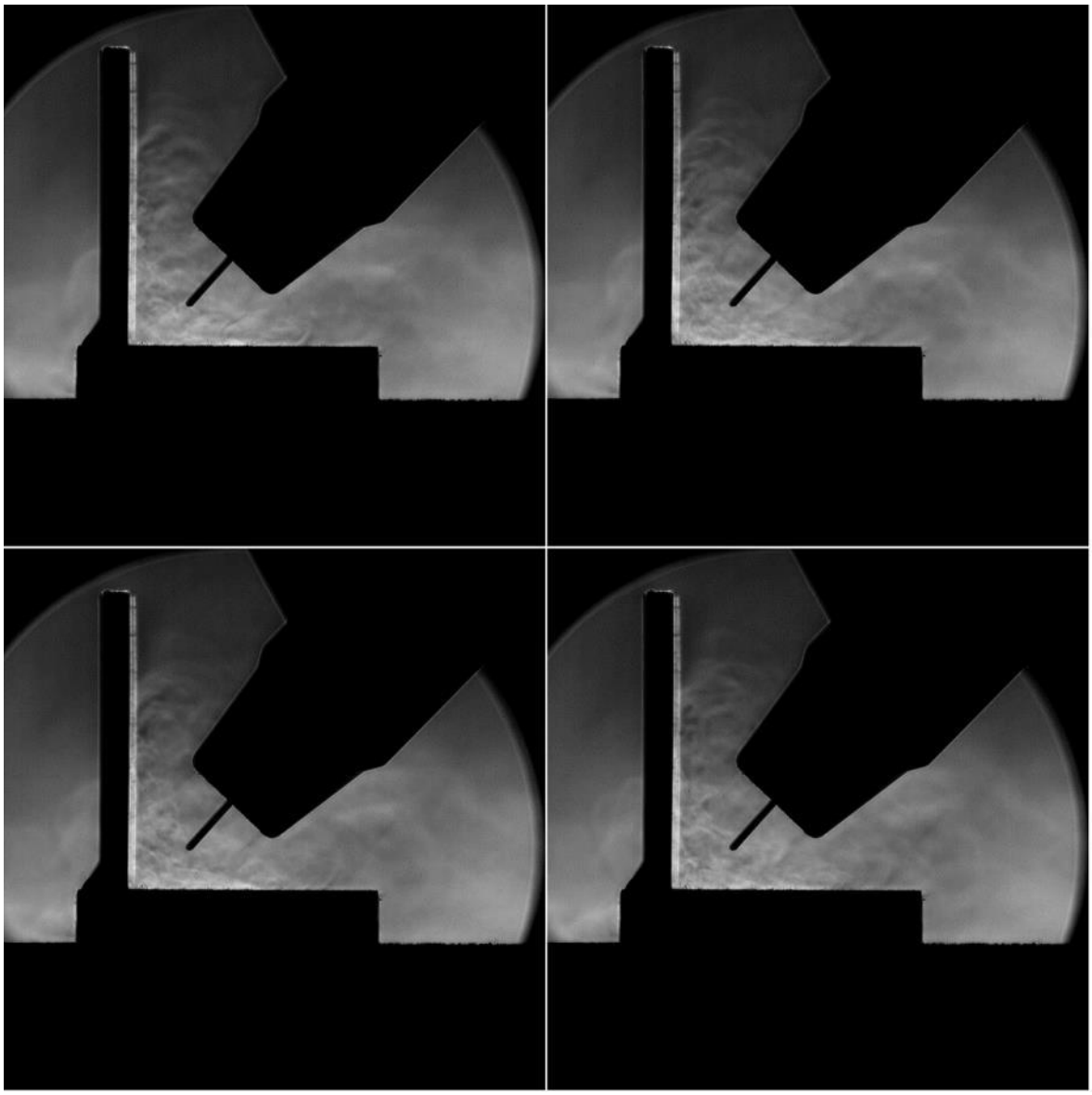
Koe 2.16. Pistooli 9b lisädiffuusorilla, kaasusuutin IV



Koe 2.17. Pistooli 9b, diffuusori 2, kaasusuutin IV

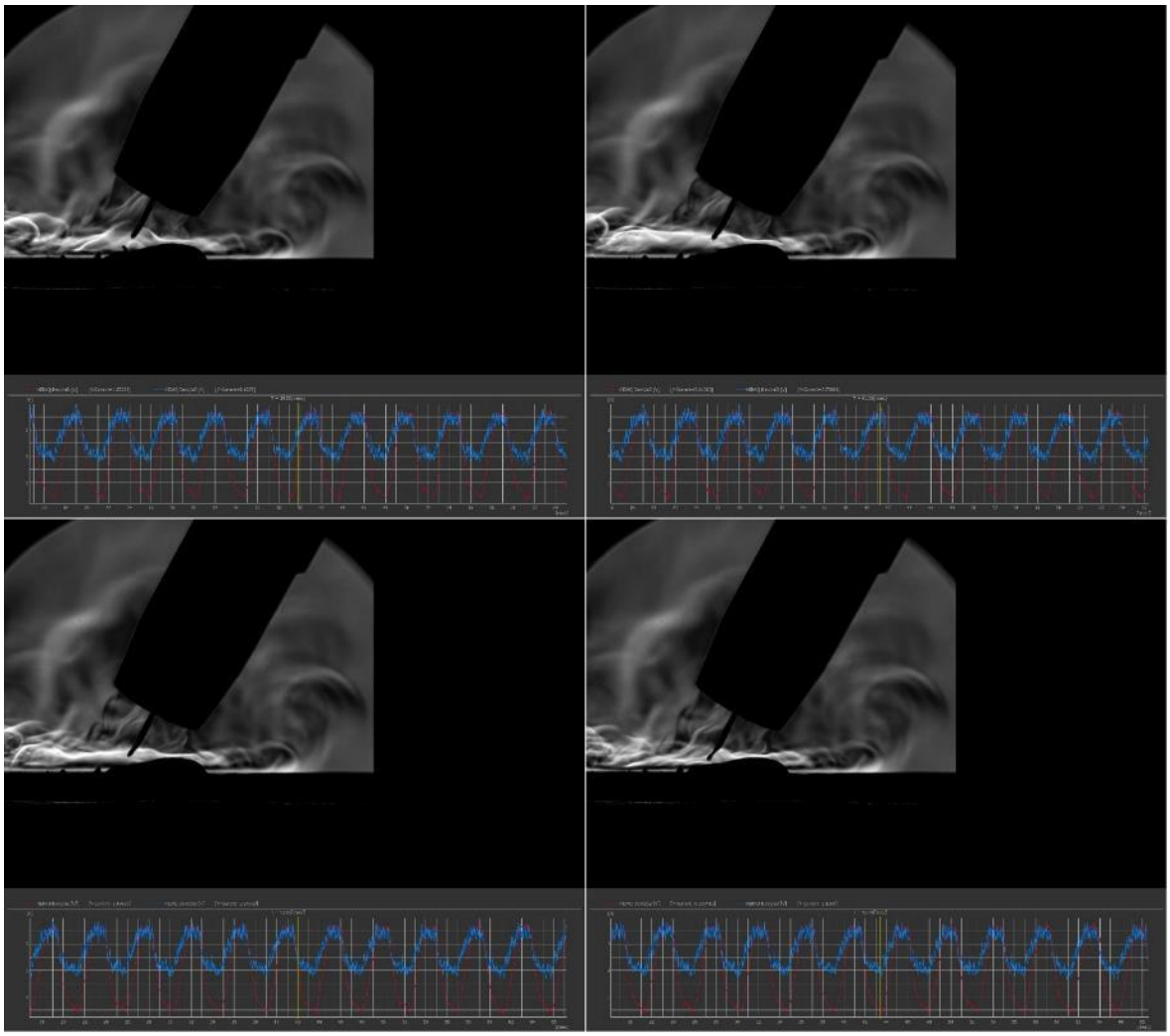


Koe 2.18. Pistooli 10, diffuusori 2

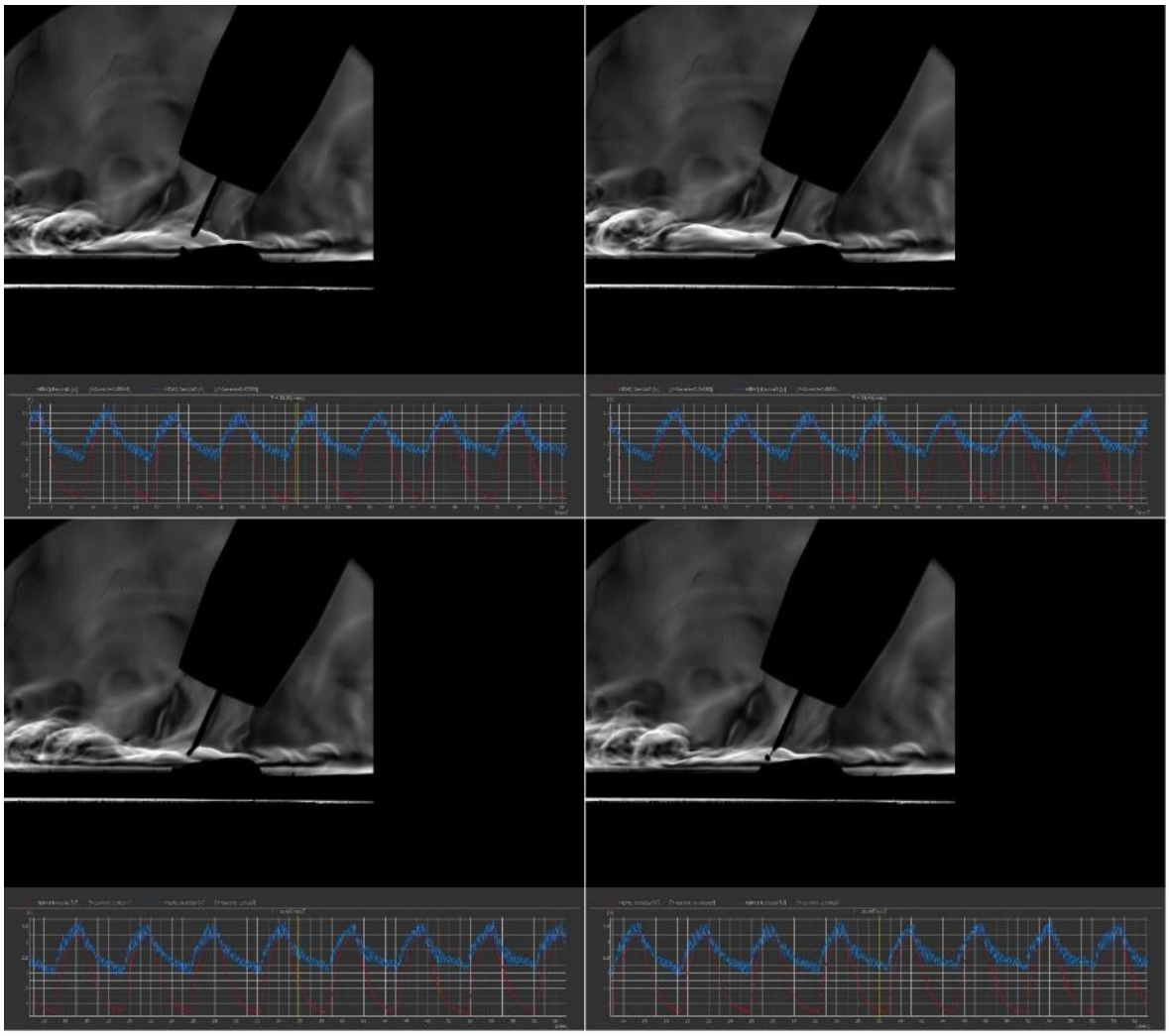


Koesarjan 3 kuvasarjat.

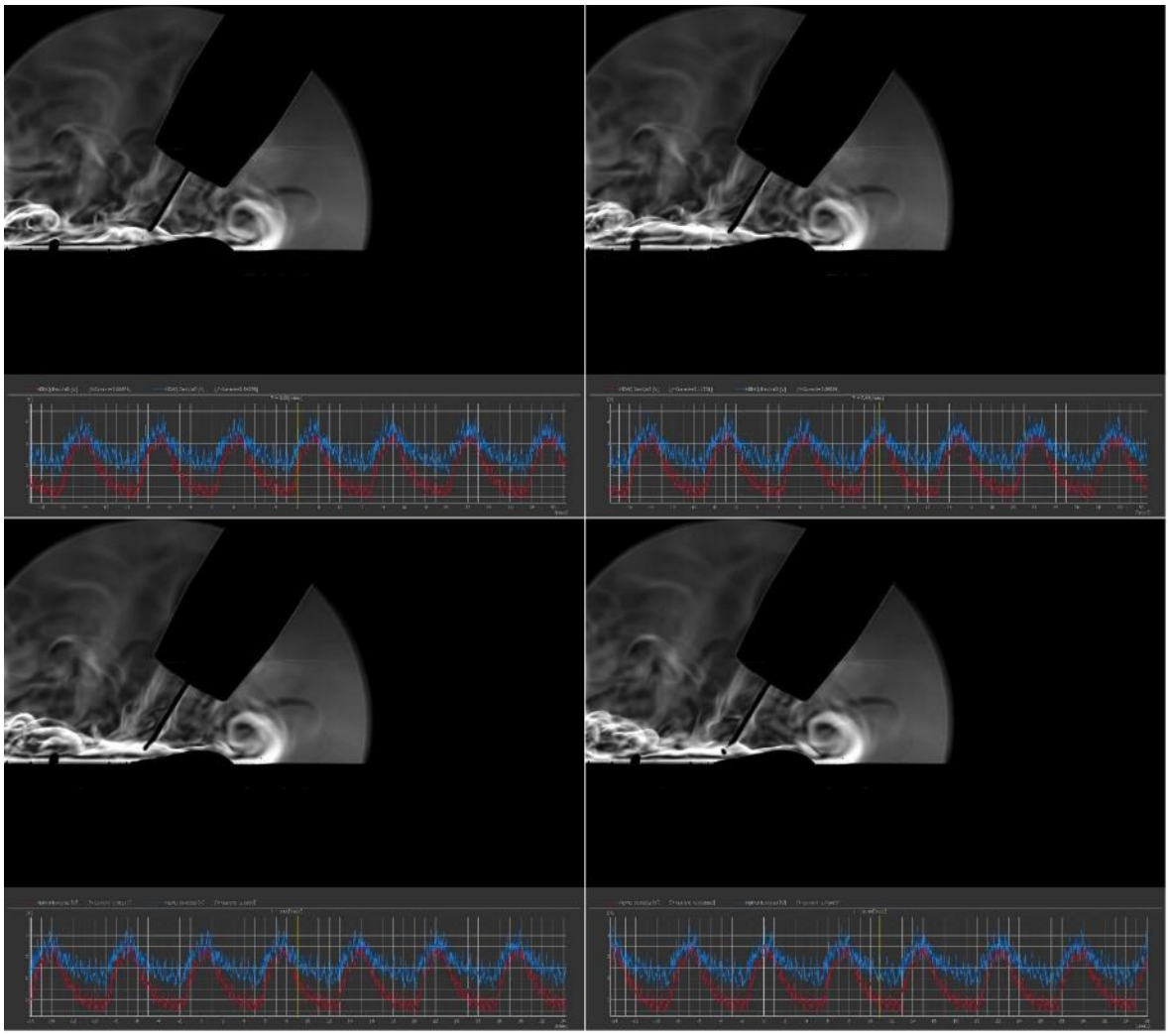
Koe 3.1. Pistooli 1



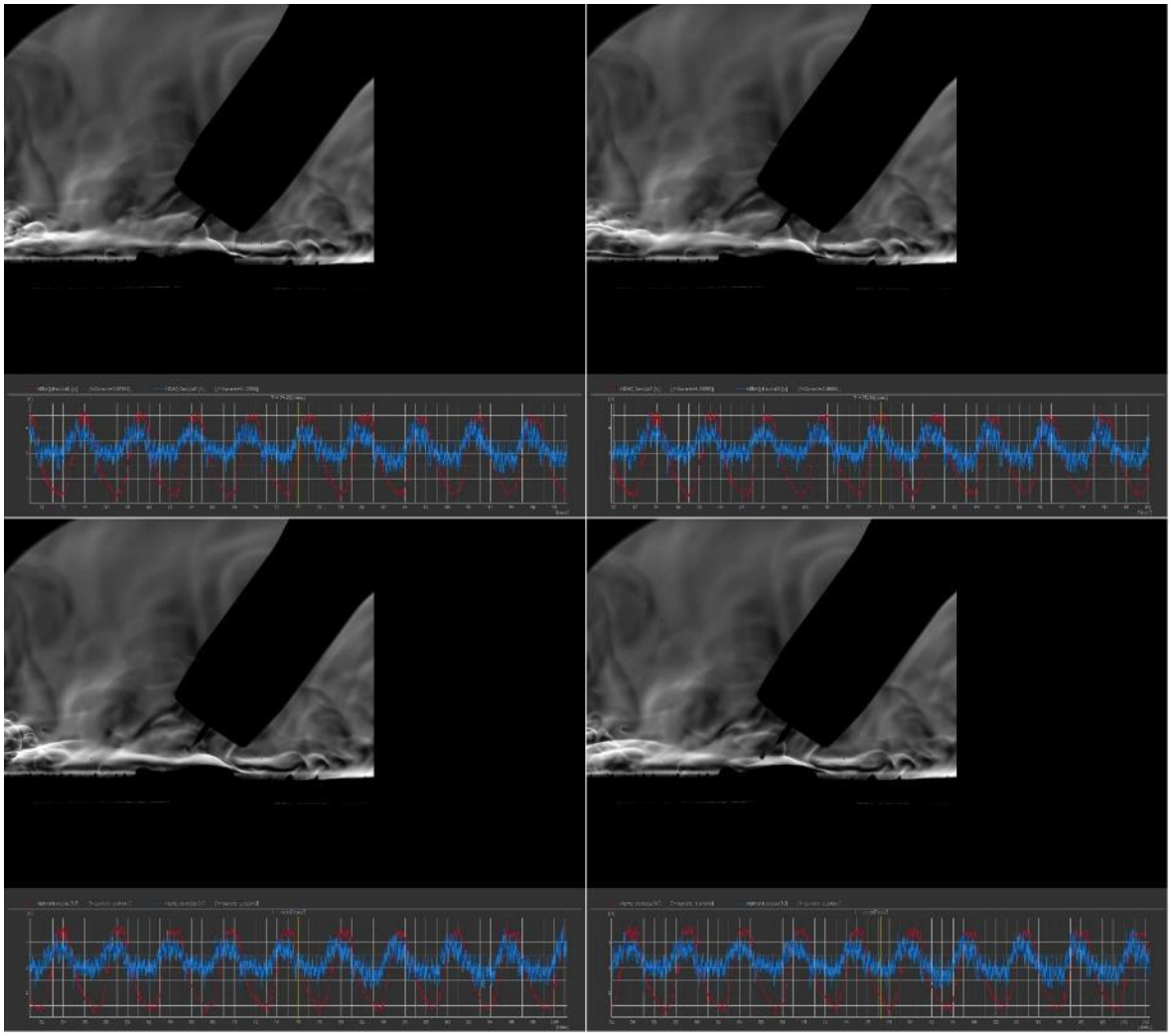
Koe 3.2. Pistooli 2



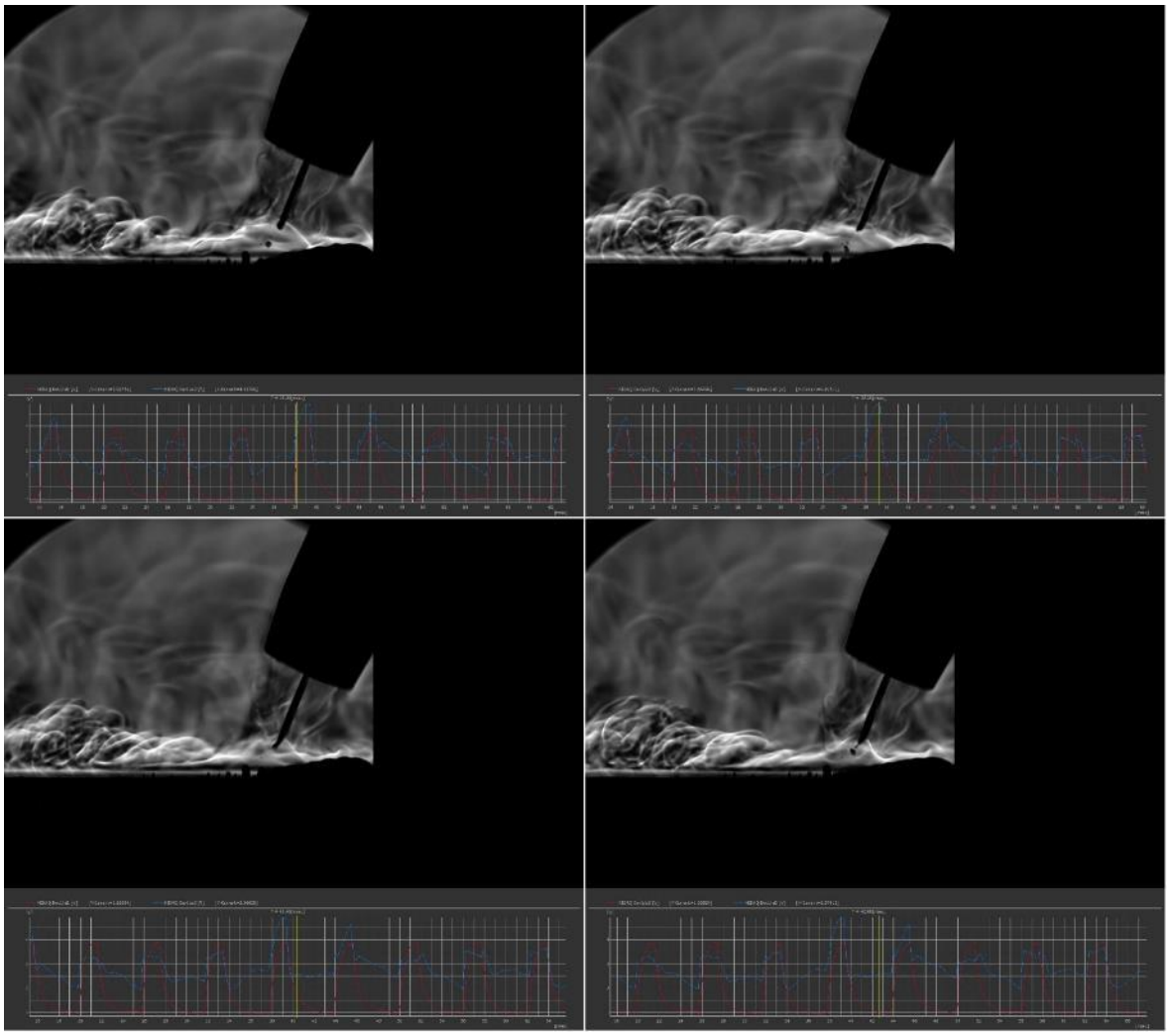
Koe 3.3. Pistooli 3



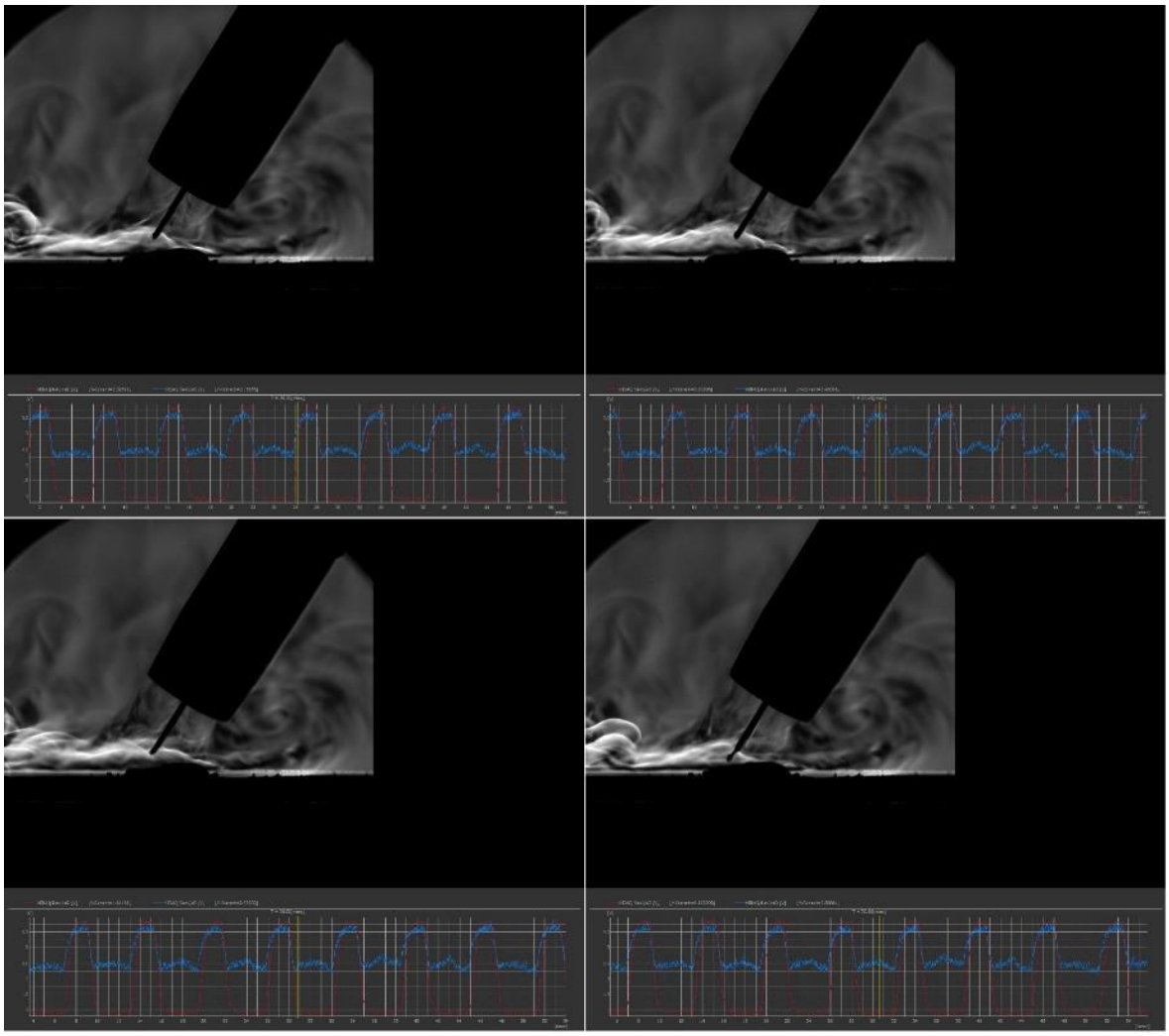
Koe 3.4. Pistooli 4



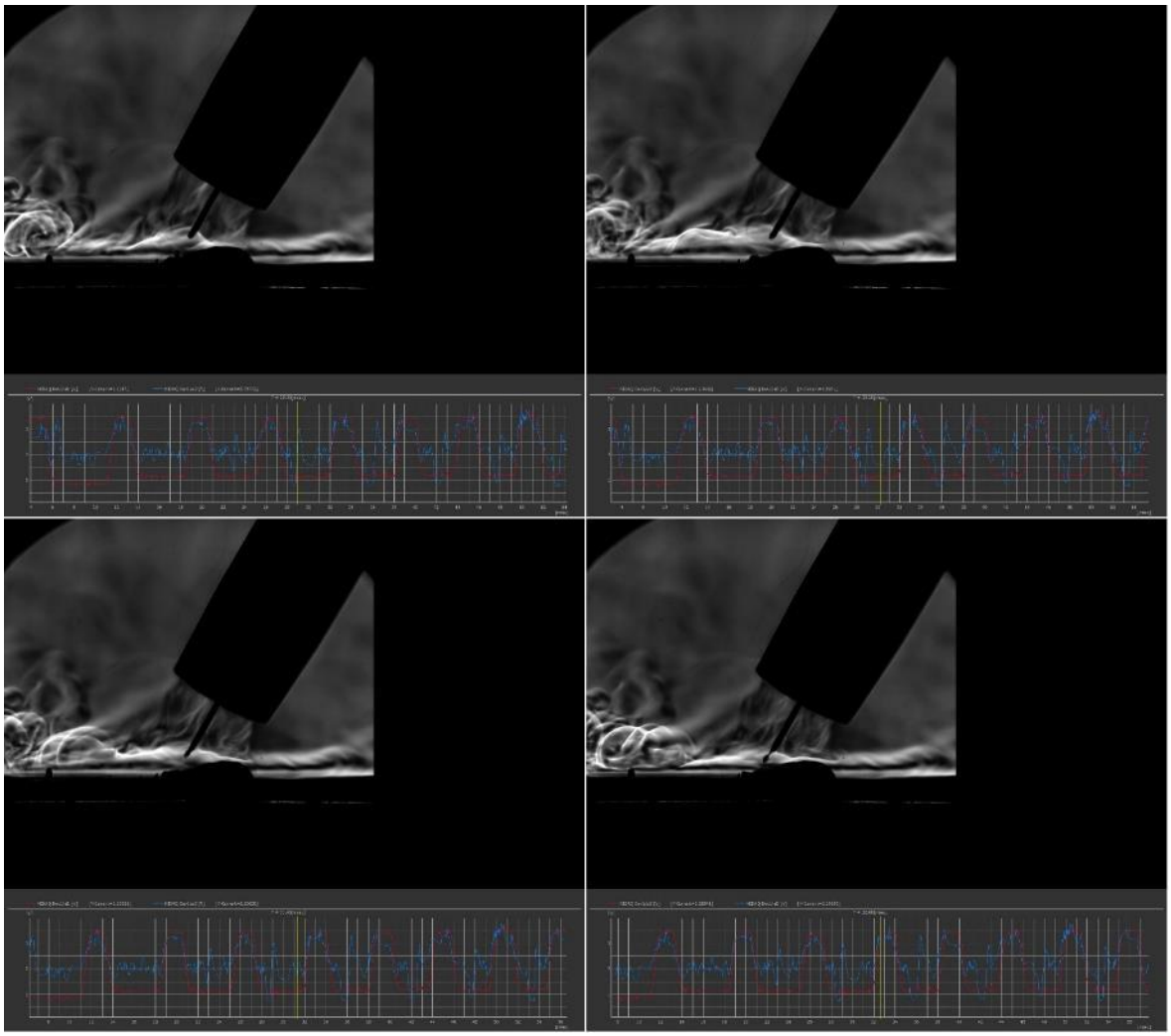
Koe 3.5. Pistooli 5



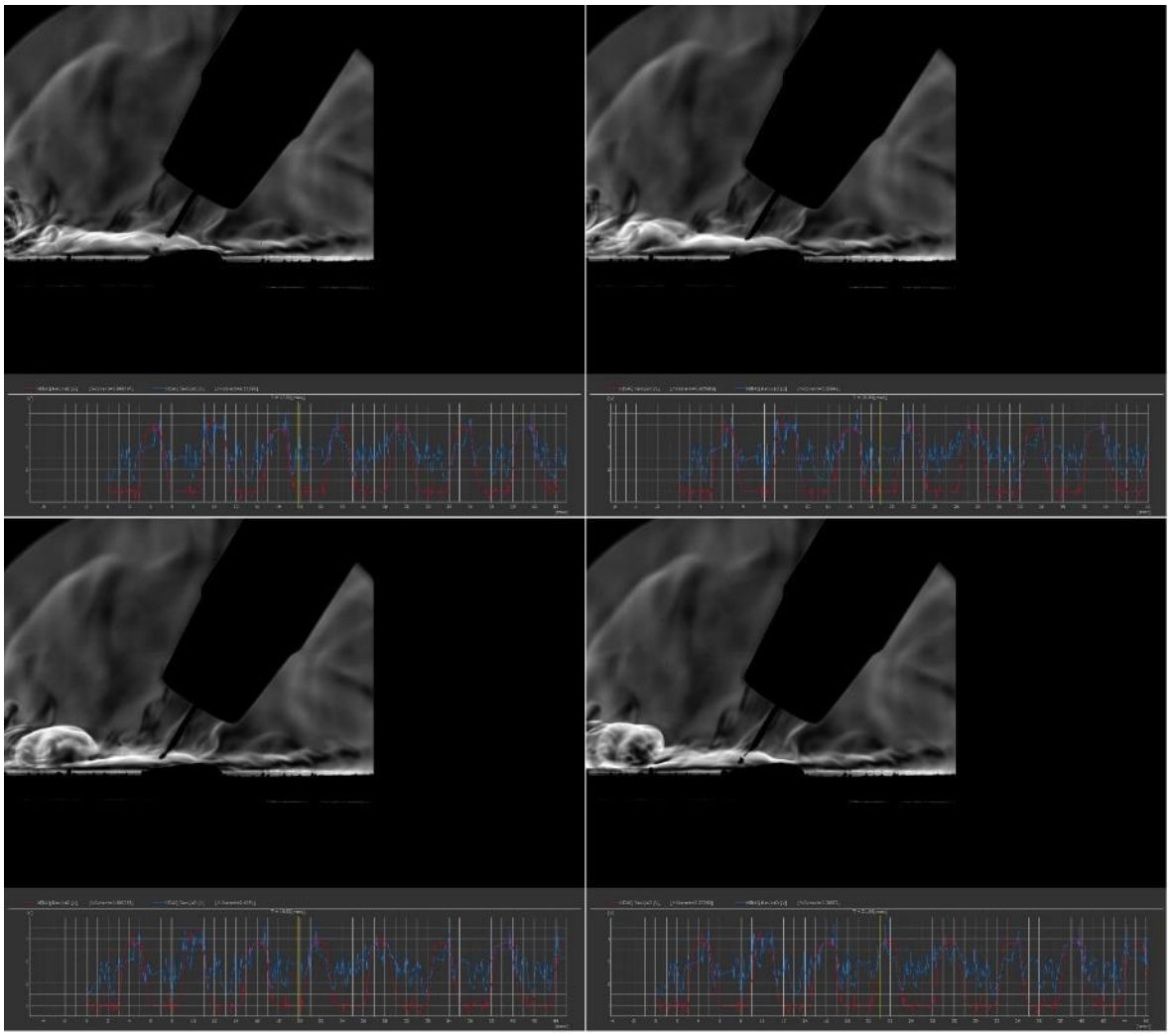
Koe 3.6. Pistooli 6



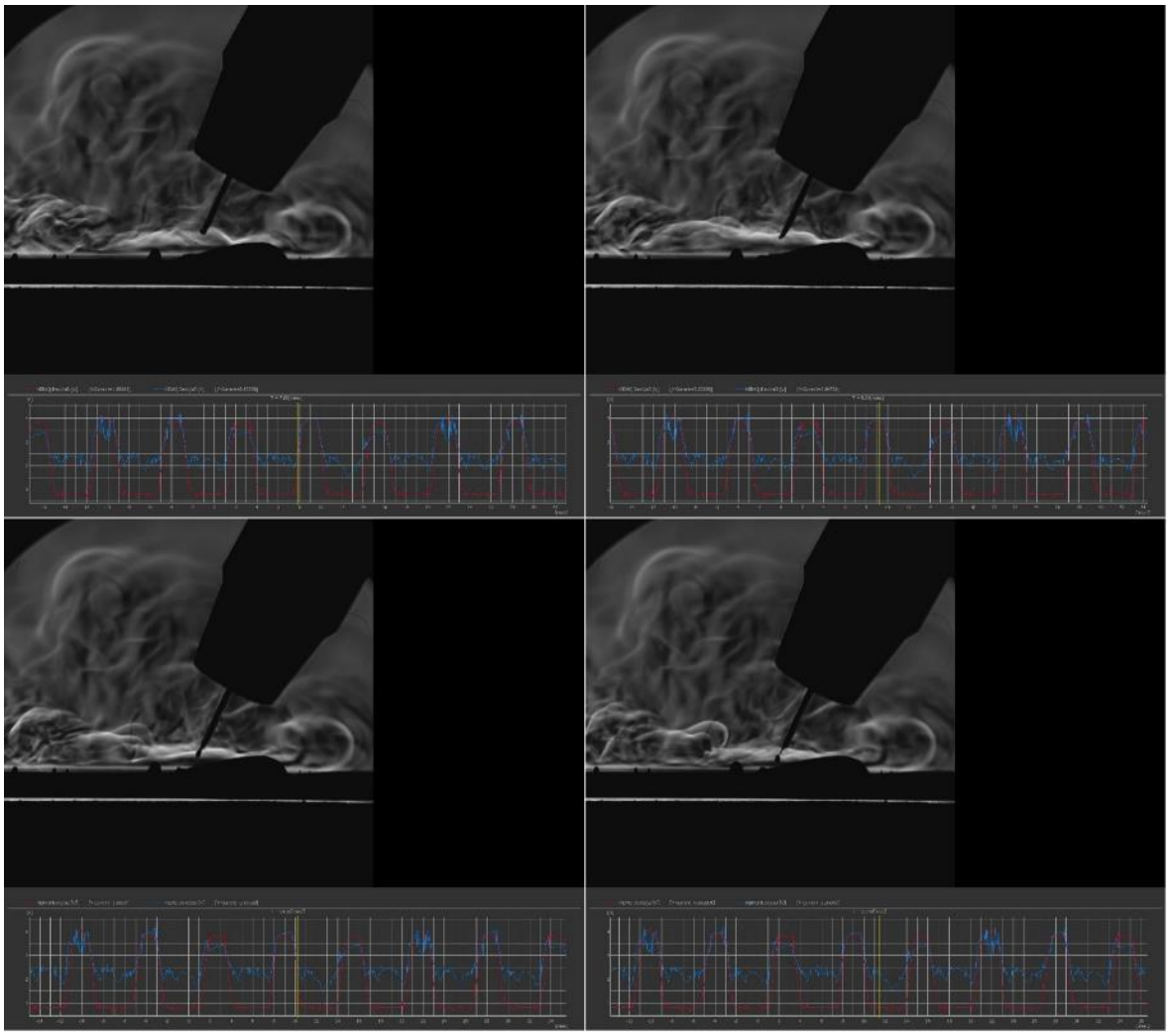
Koe 3.7. Pistooli 7. Hitsausvirran ja jännitteen mittauslaitteiston toimintahäiriön vuoksi virta- ja jännitekäyrät eivät ole oikeassa tahdissa kuvien kanssa.



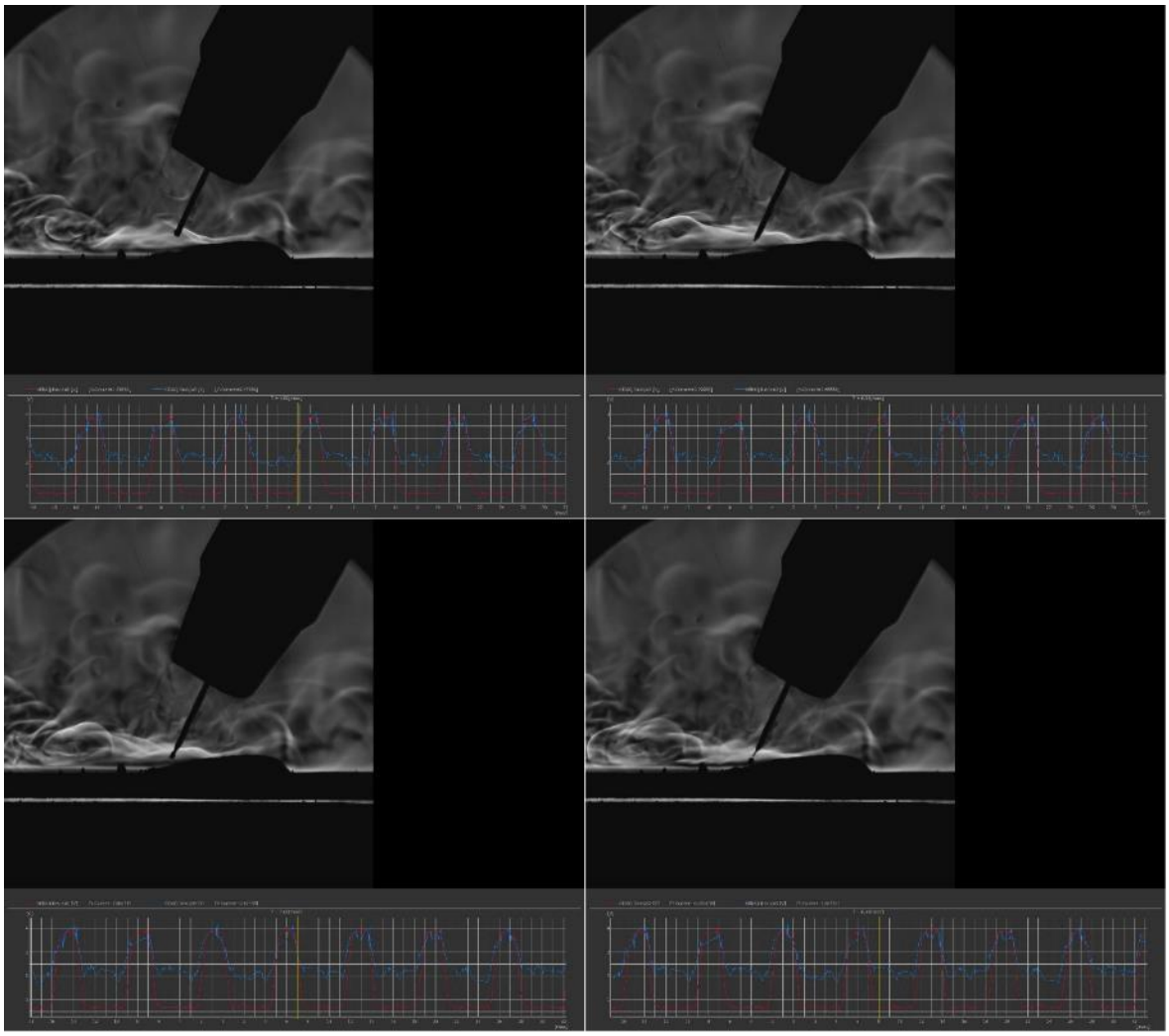
Koe 3.8. Pistooli 8. Hitsausvirran ja jännitteen mittauslaitteiston toimintahäiriön vuoksi virta- ja jännitekäyrät eivät ole oikeassa tahdissa kuvien kanssa.



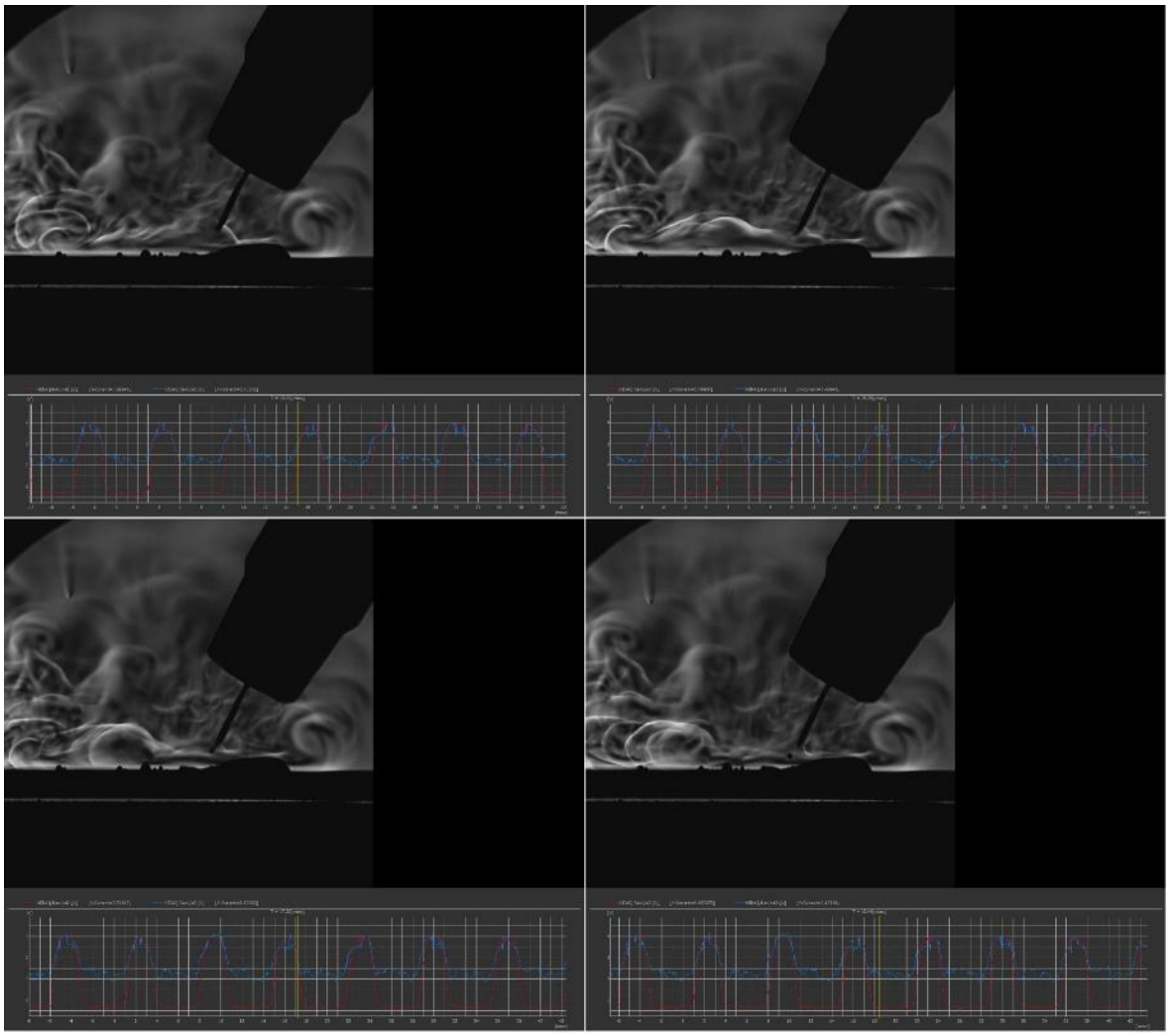
Koe 3.9. Pistooli 9a, suutin I



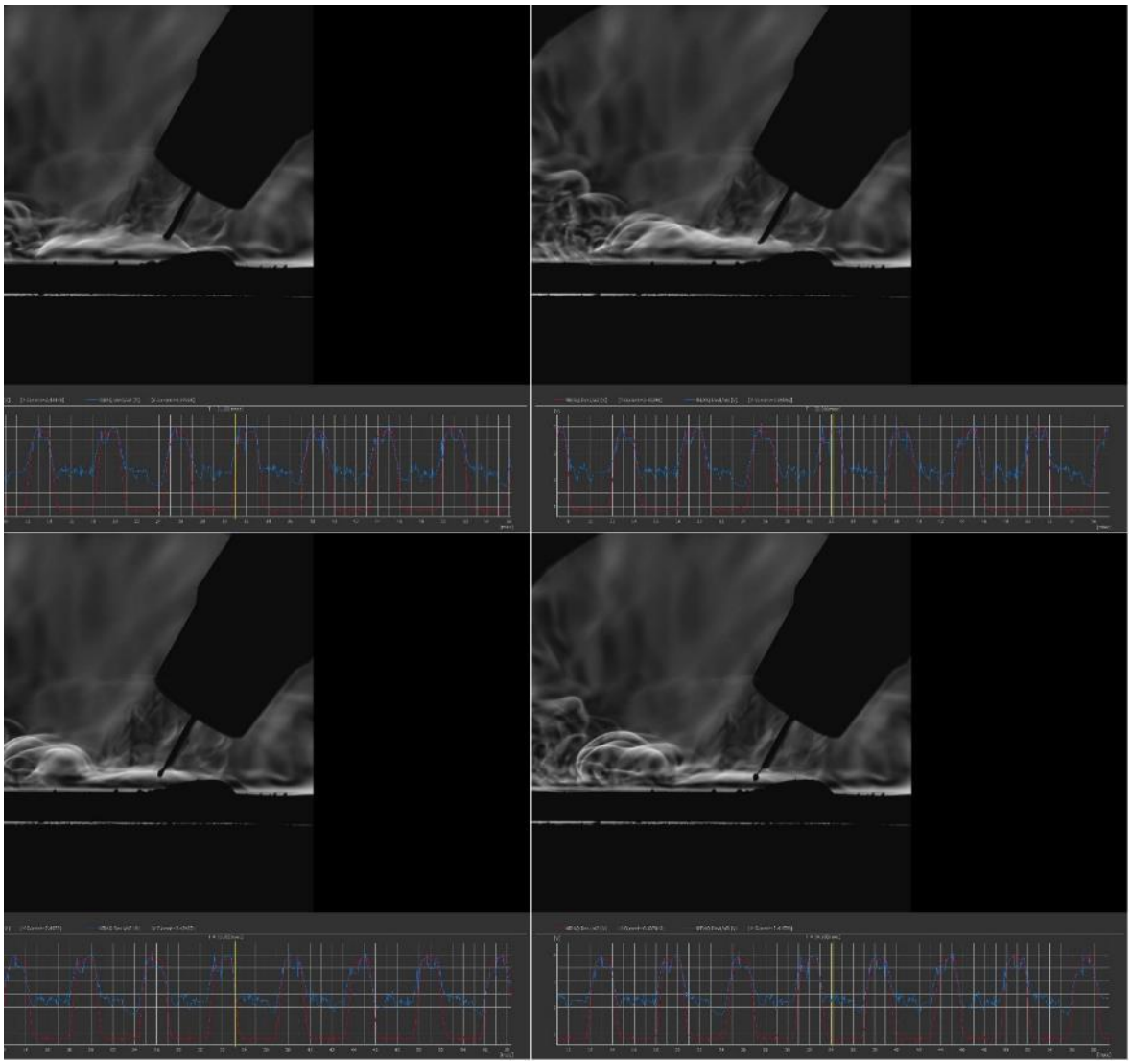
Koe 3.10. Pistooli 9a, suutin II



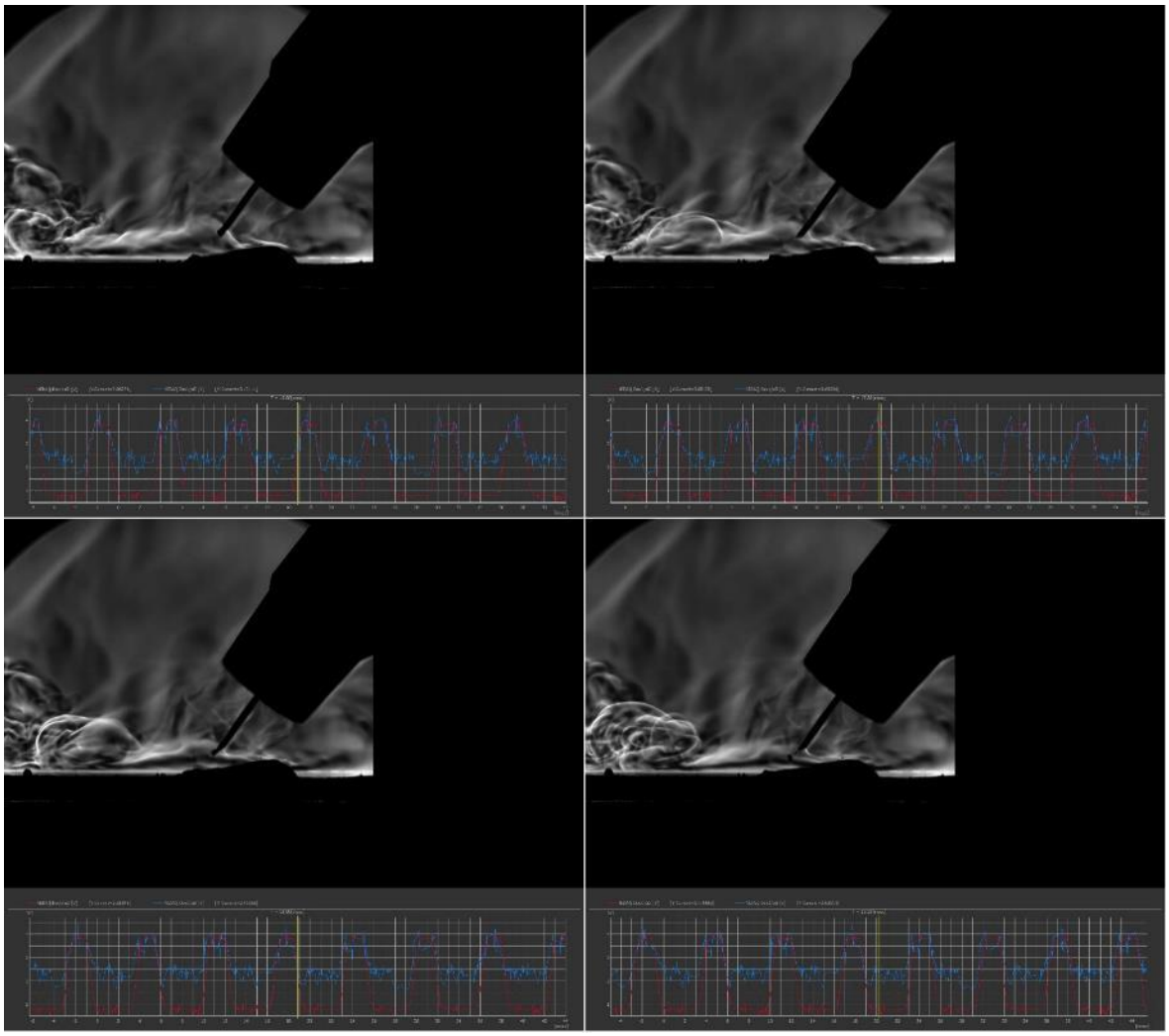
Koe 3.11. Pistooli 9a, suutin III



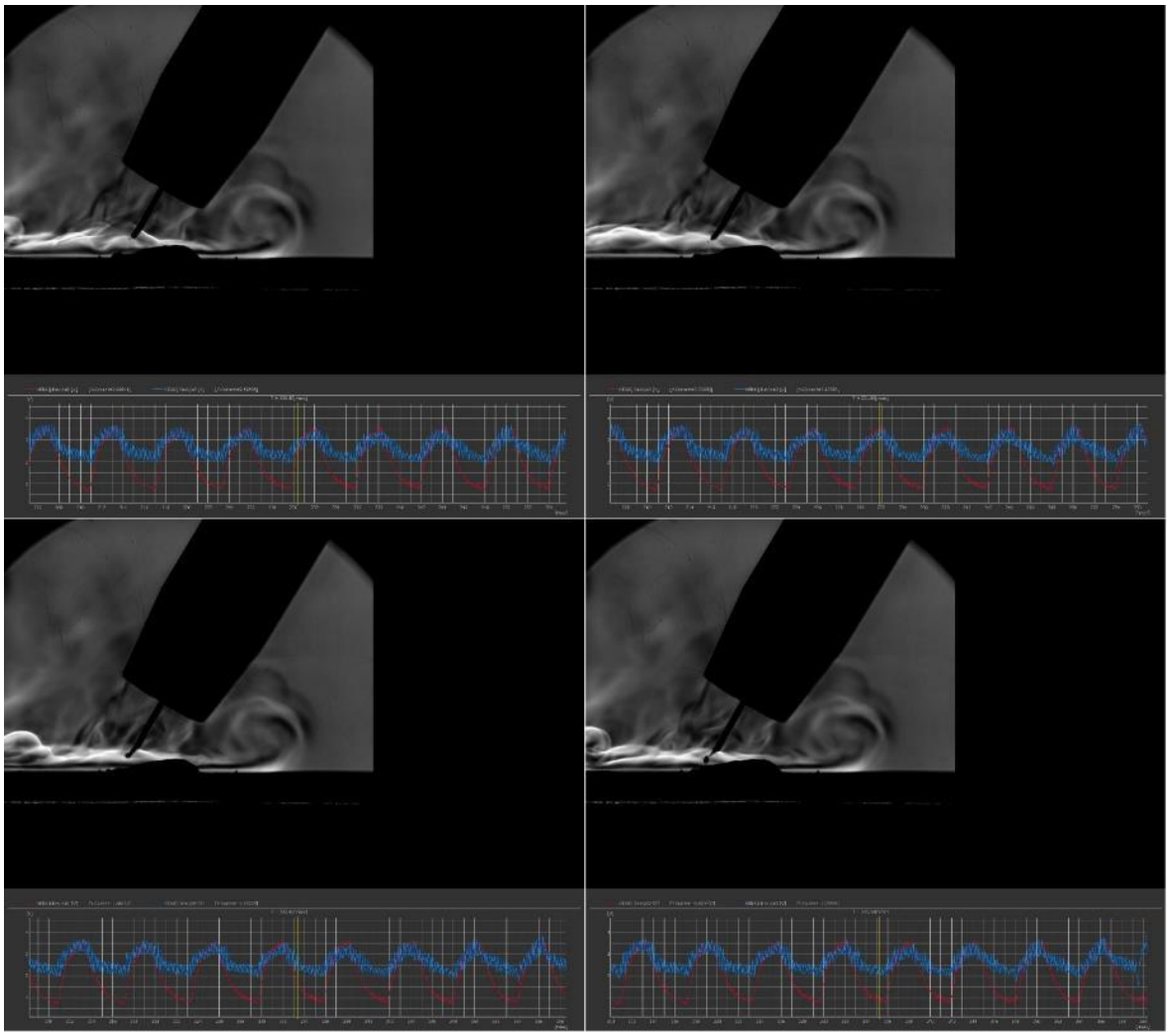
Koe 3.12. Pistooli 9a, suutin IV



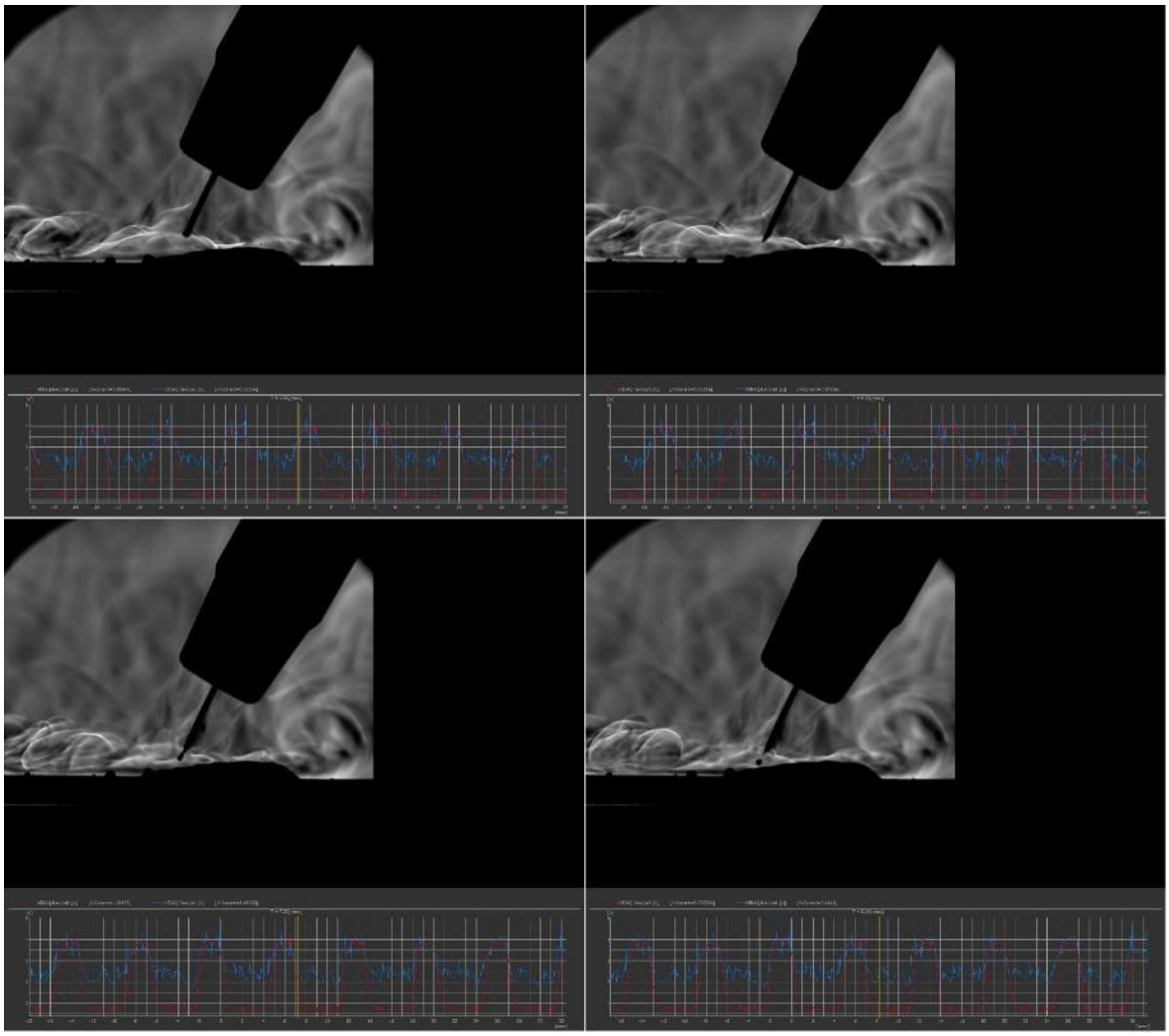
Koe 3.13. Pistooli 9b, kaasusuutin IV



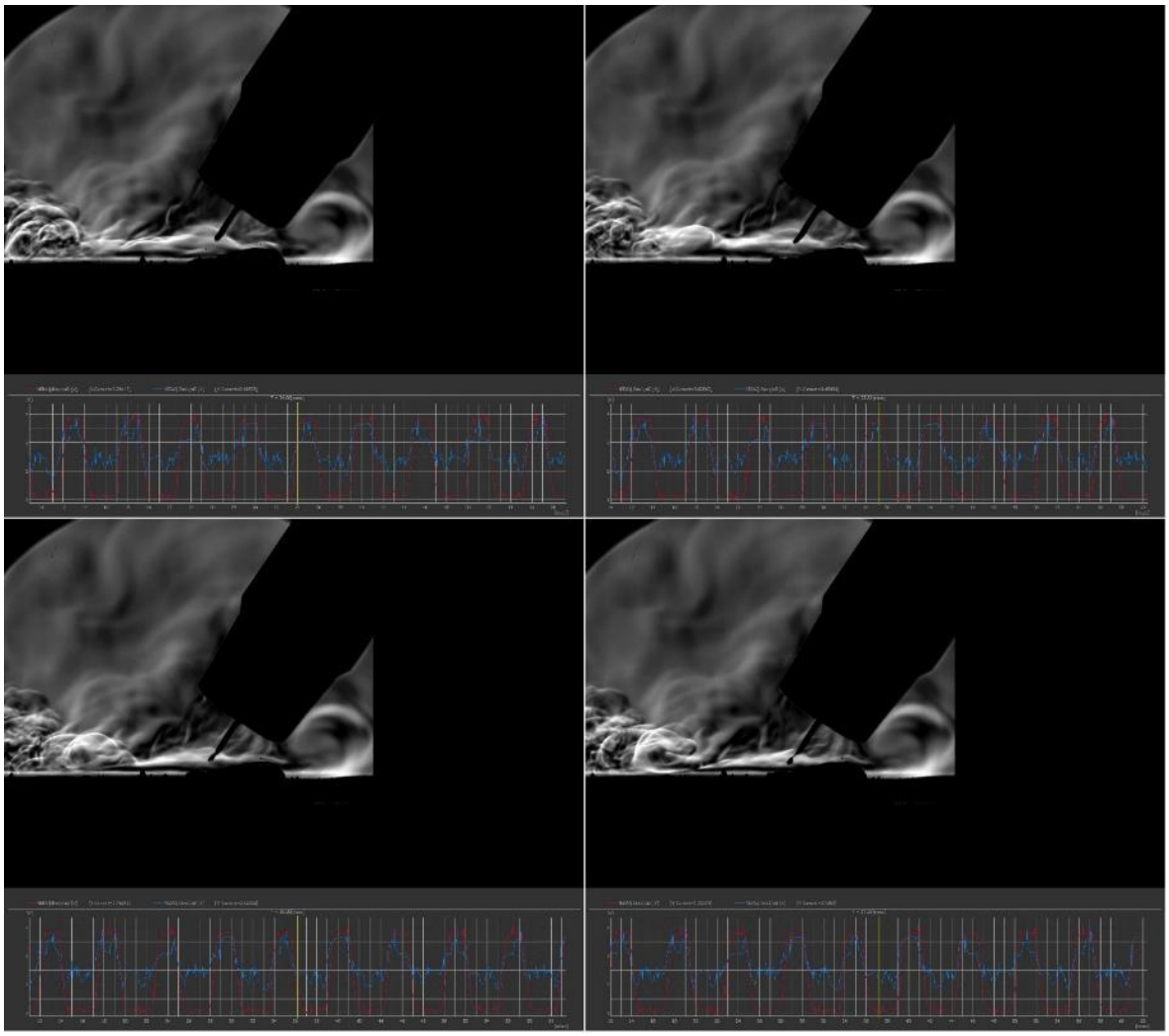
Koe 3.14. Pistooli 2 ilman lisädiffuusoria



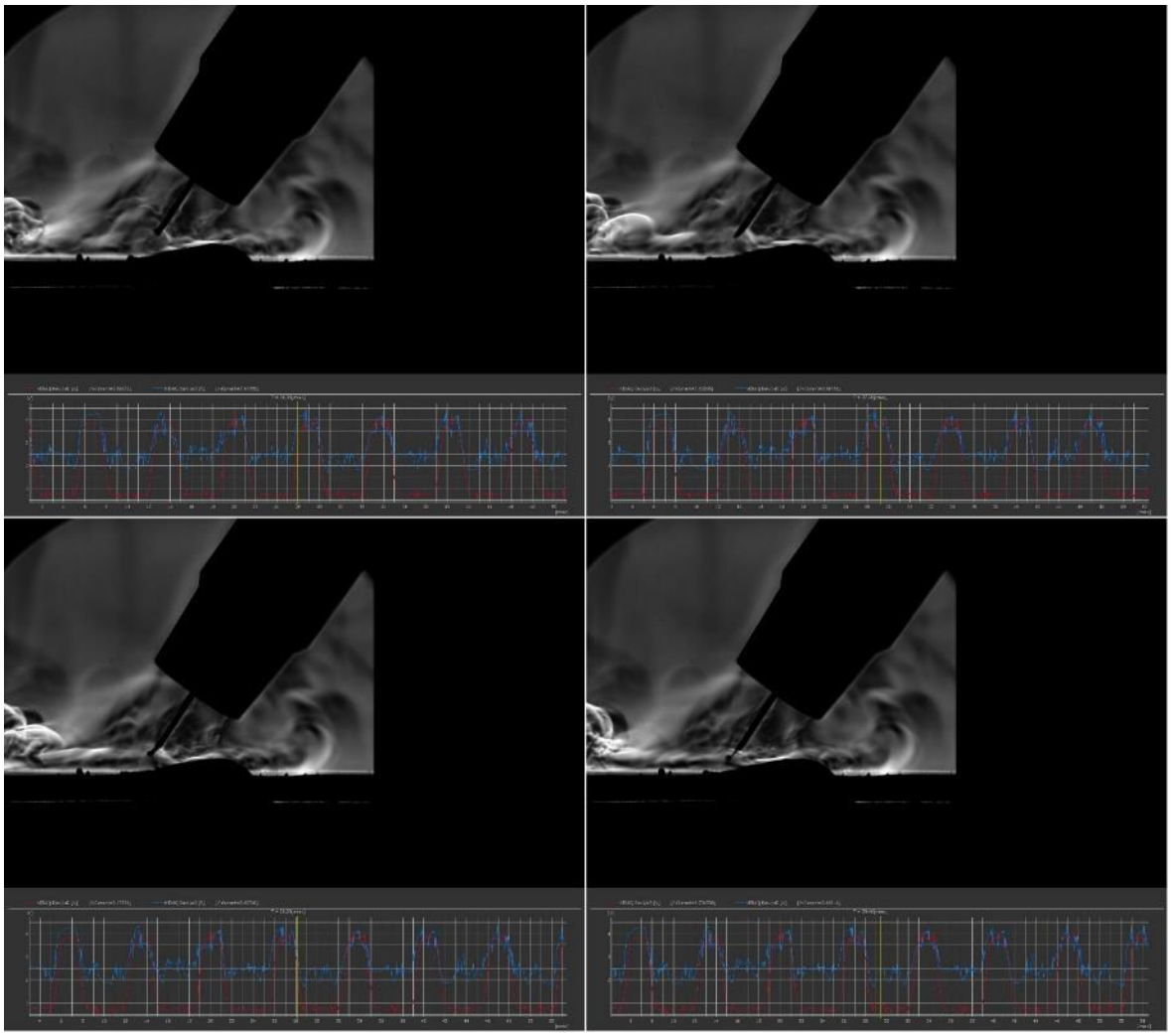
Koe 3.15. Pistooli 10



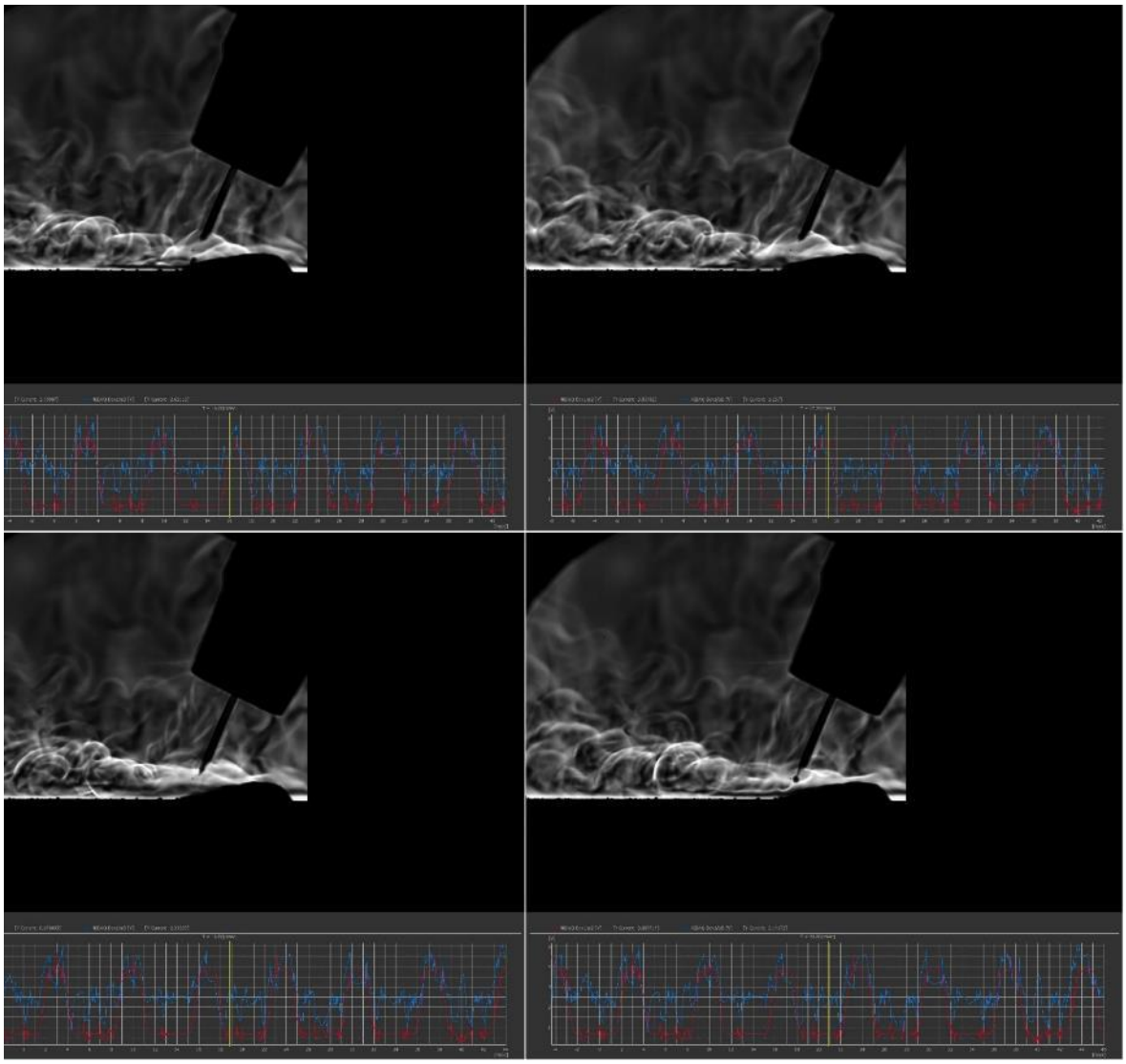
Koe 3.16. Pistooli 9a lisädiffuusorilla, kaasusuutin IV



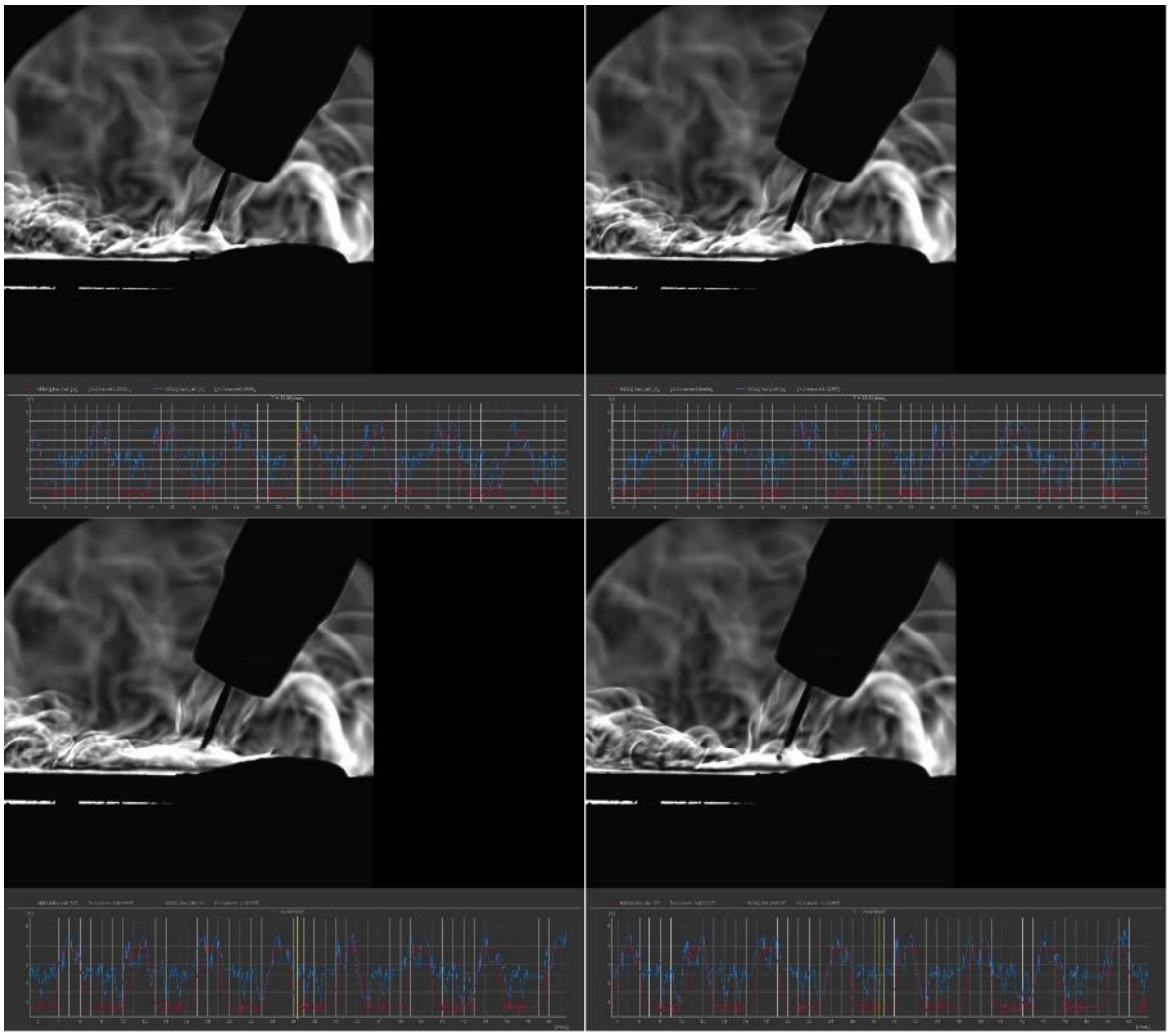
Koe 3.17. Pistooli 9b lisädiffuusorilla, suutin IV



Koe 3.18. Pistooli 9b, diffuusori 2, suutin IV



Koe 3.19. Pistooli 10, diffuusori 2

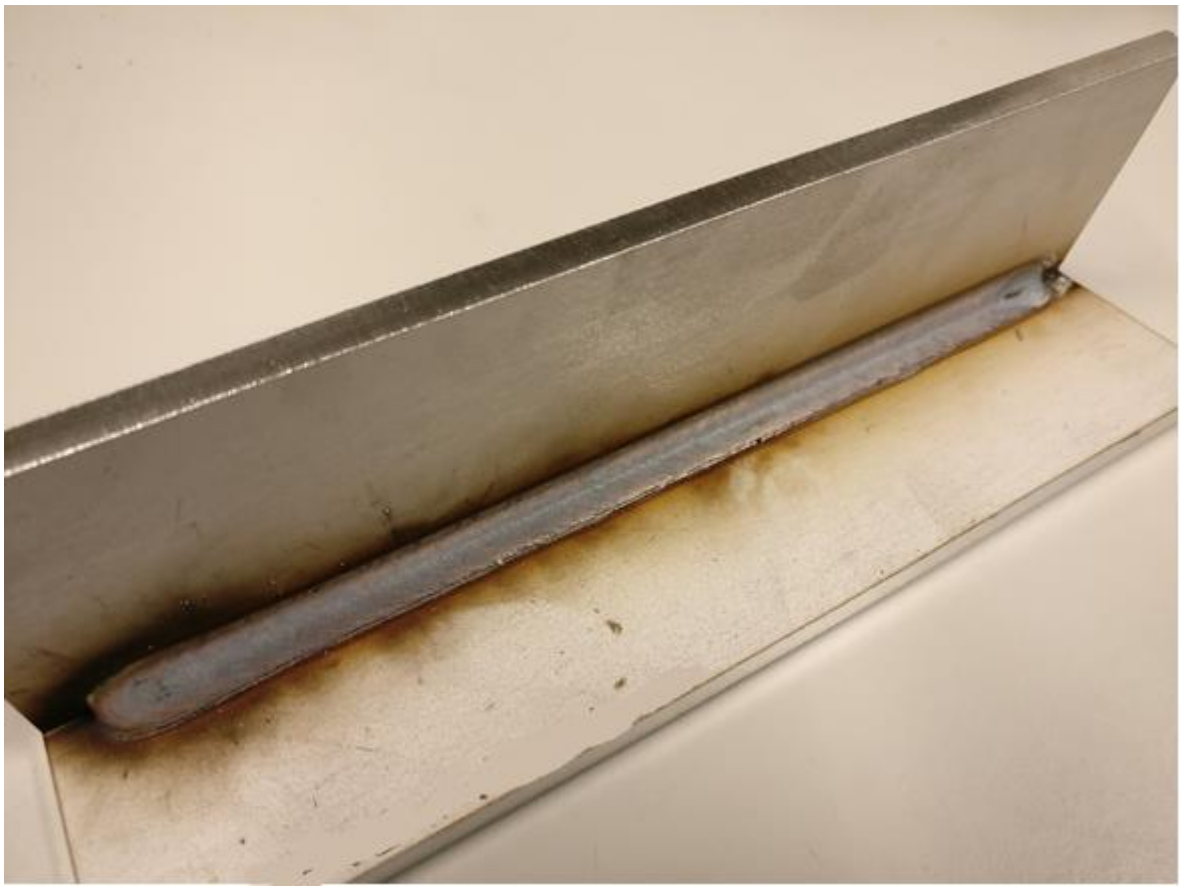


Valokuvat koesarjan 4 koekappaleista.

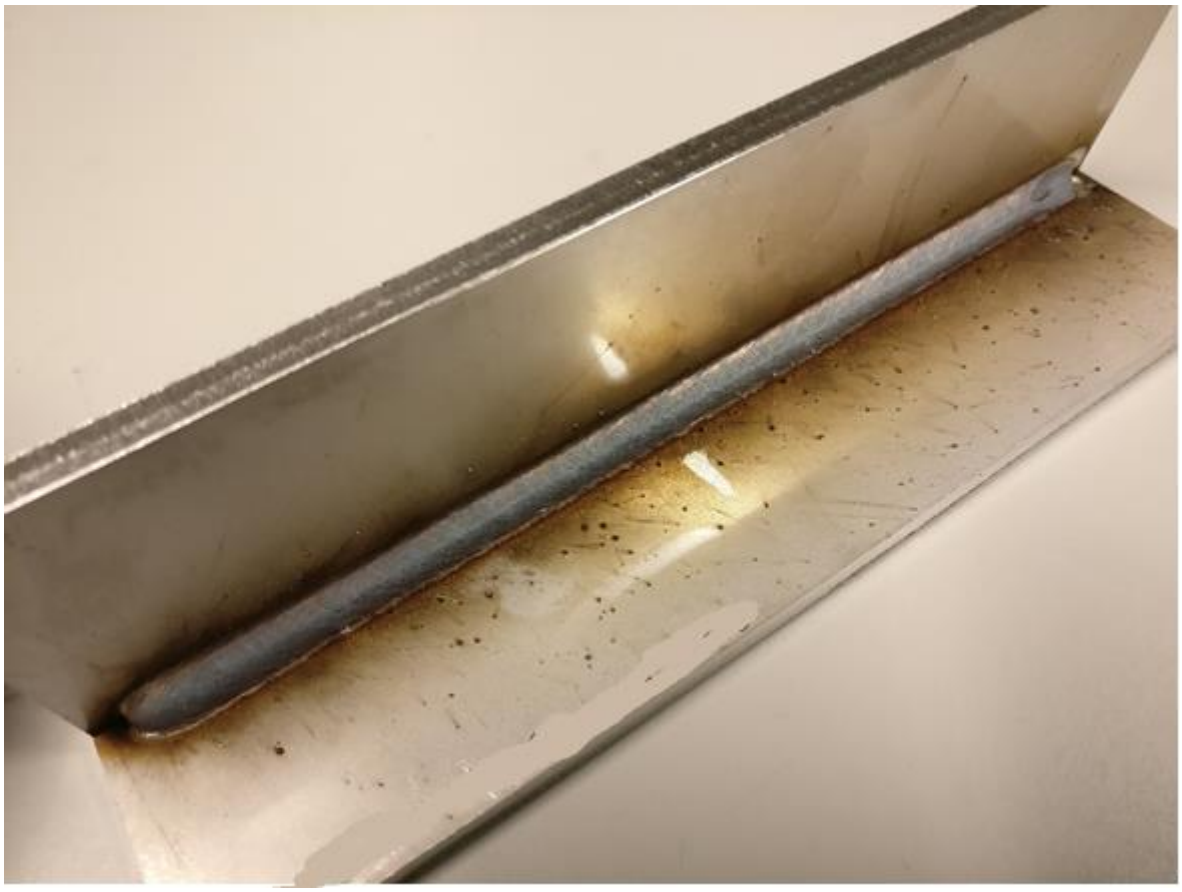
Koe 4.1. Pistooli 1

Koe 4.2. Pistooli 2

Koe 4.3. Pistooli 3

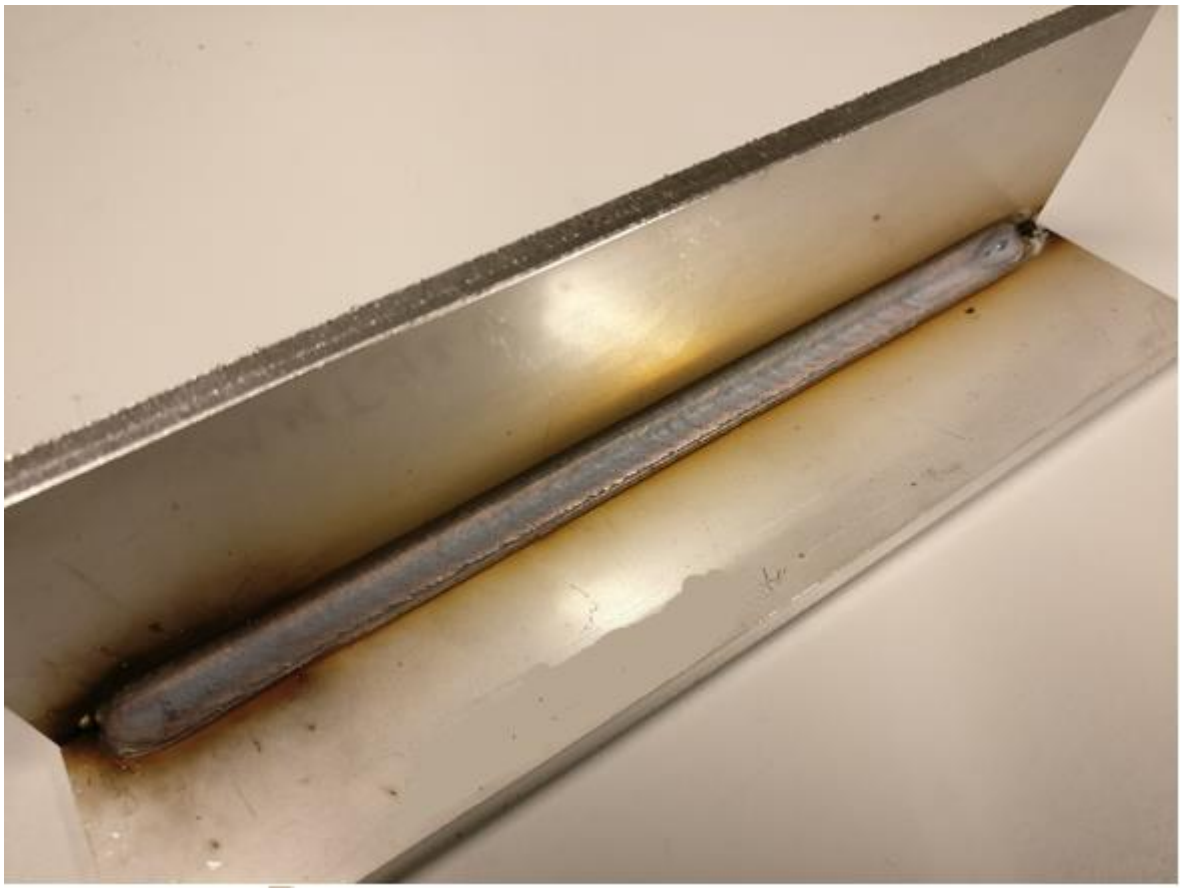


Koe 4.4. Pistooli 4

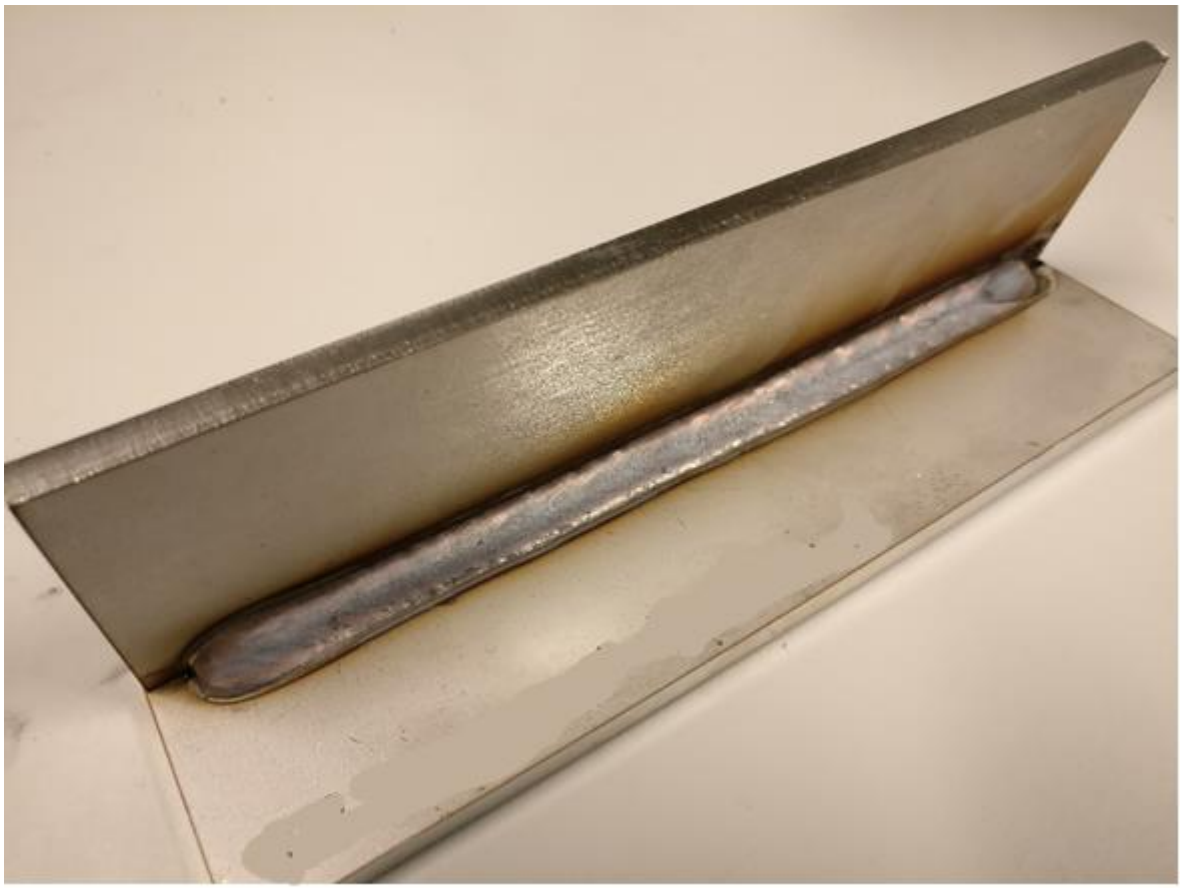


Koe 4.5. Pistooli 5

Koe 4.6. Pistooli 6



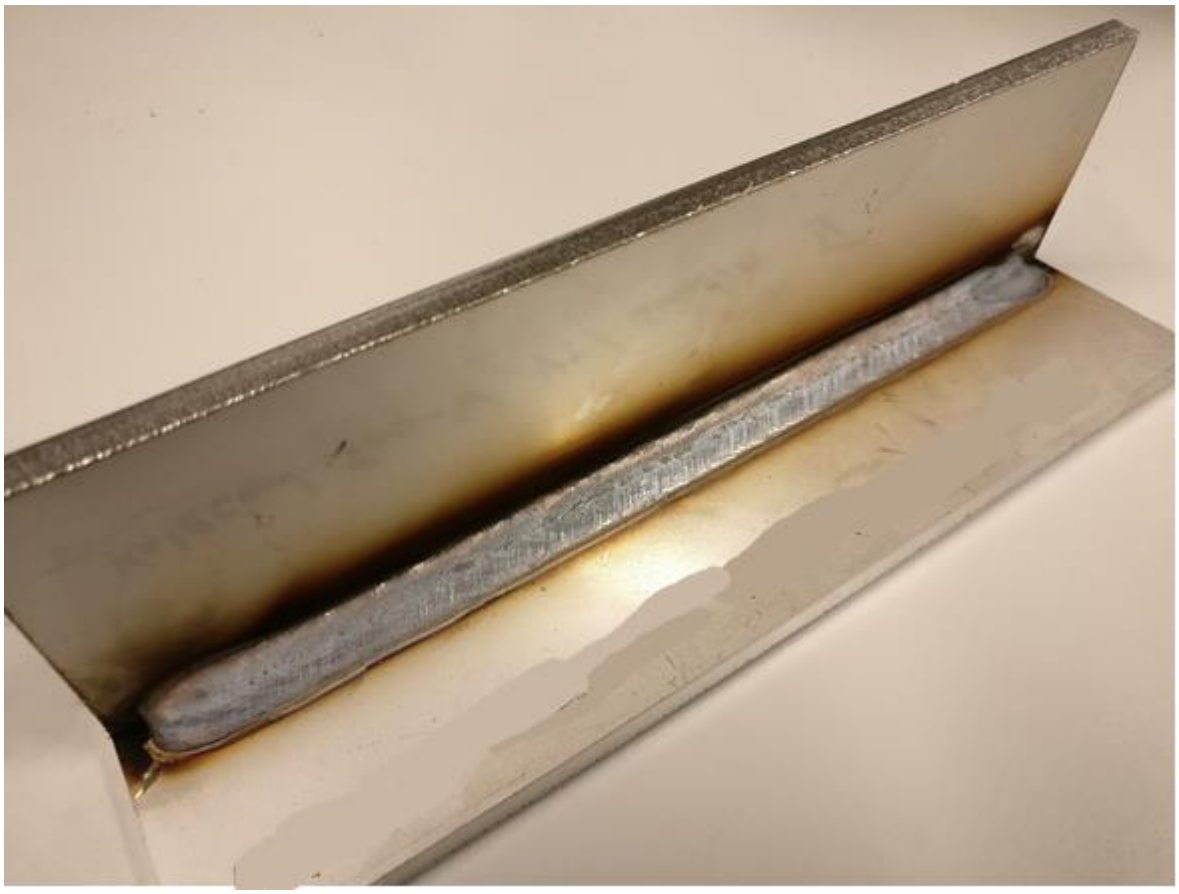
Koe 4.7. Pistooli 7



Koe 4.8. Pistooli 8

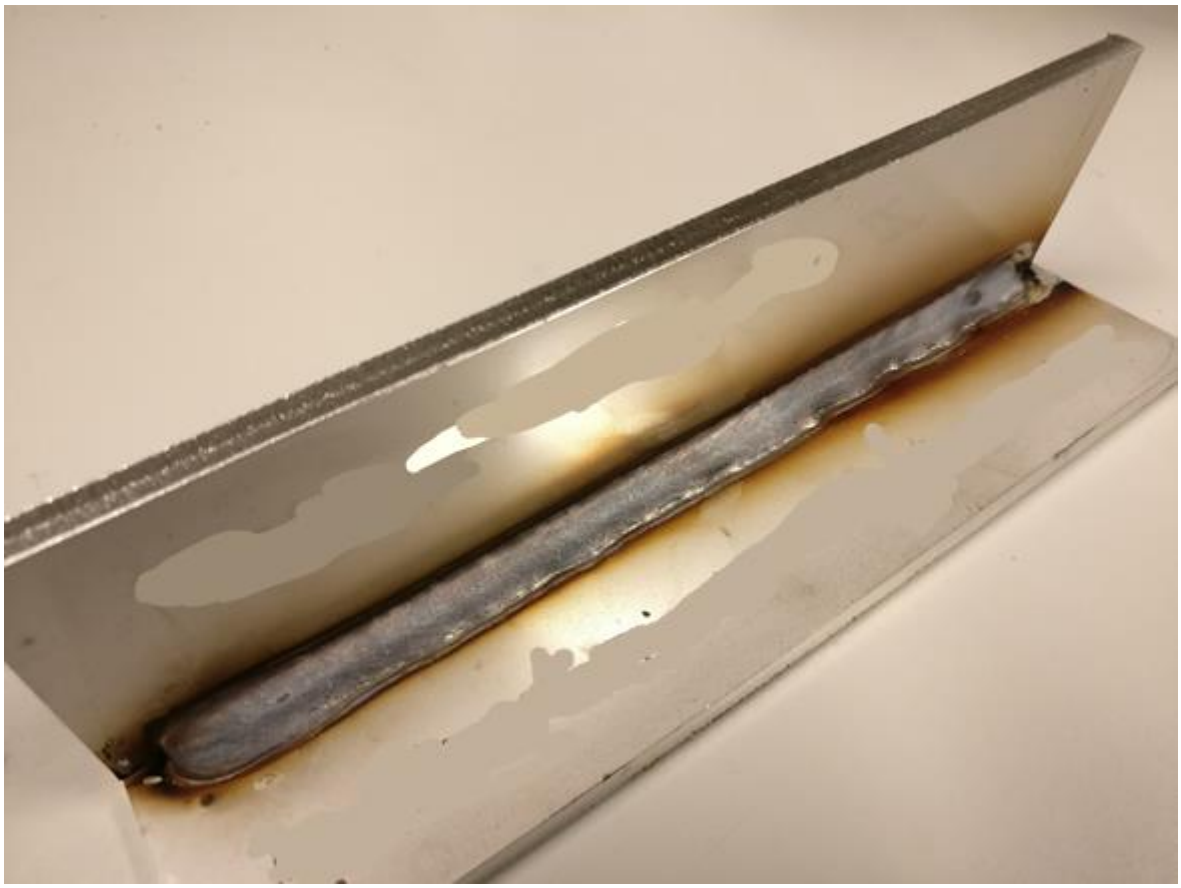
Koe 4.9. Pistooli 9a, suutin I

Koe 4.10. Pistooli 9a, suutin II



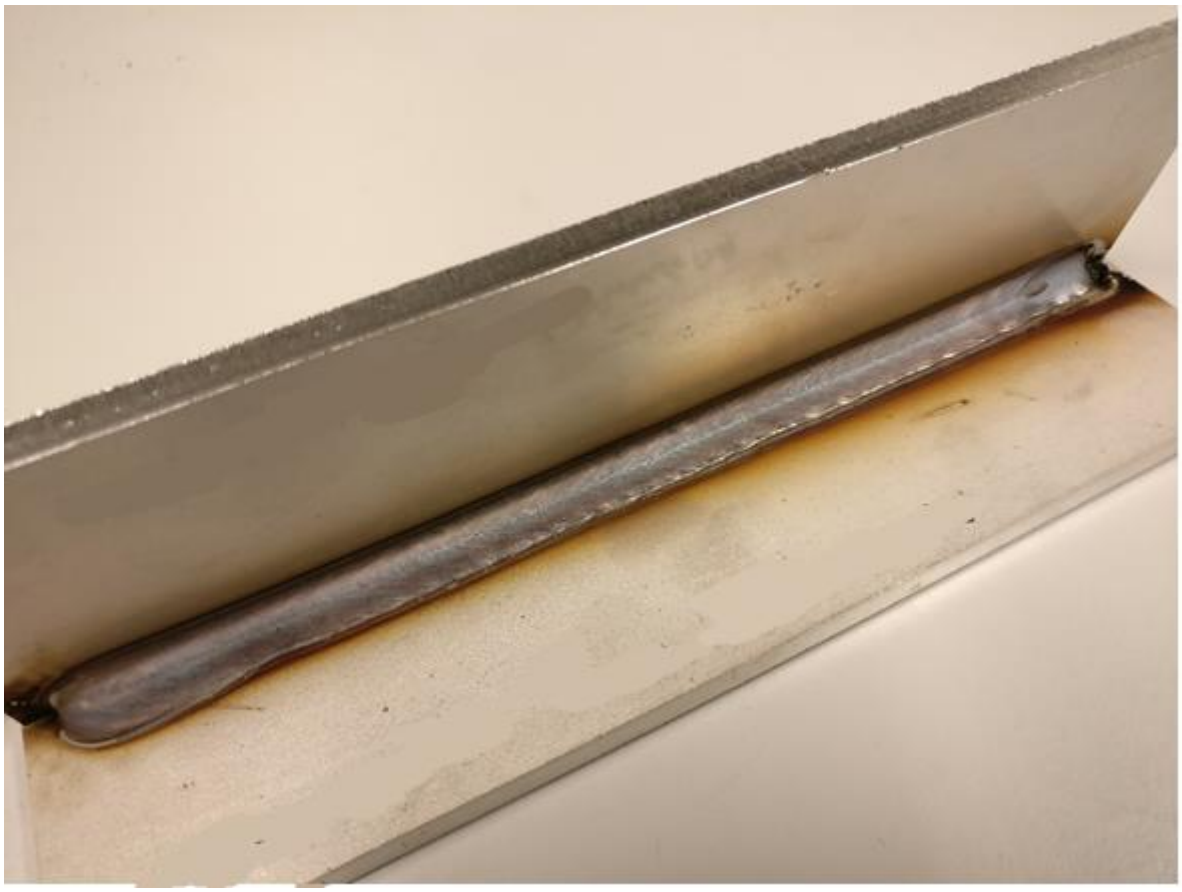
Koe 4.11. Pistooli 9a, suutin III

Koe 4.12. Pistooli 9a, suutin IV



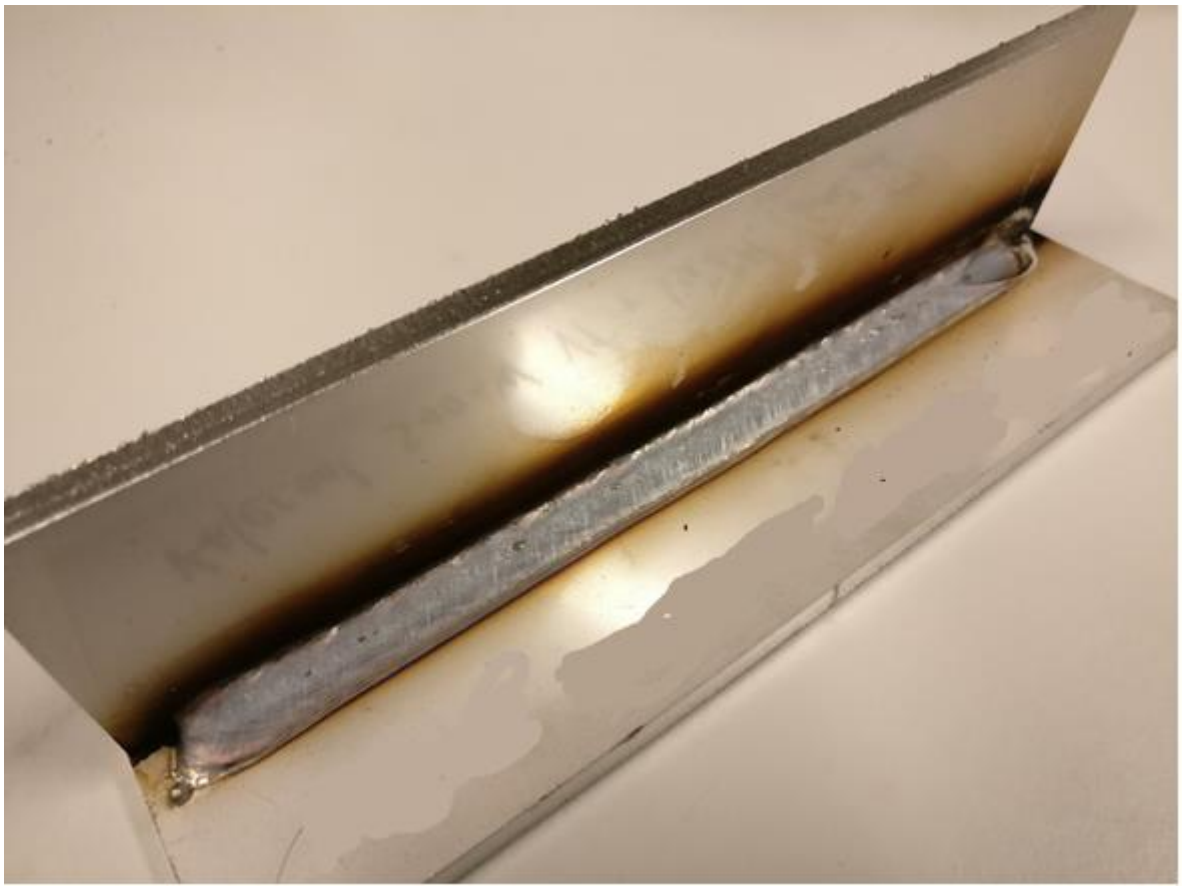
Koe 4.13. Pistooli 9b, suutin IV

Koe 4.14. Pistooli 2 ilman lisädiffuusoria



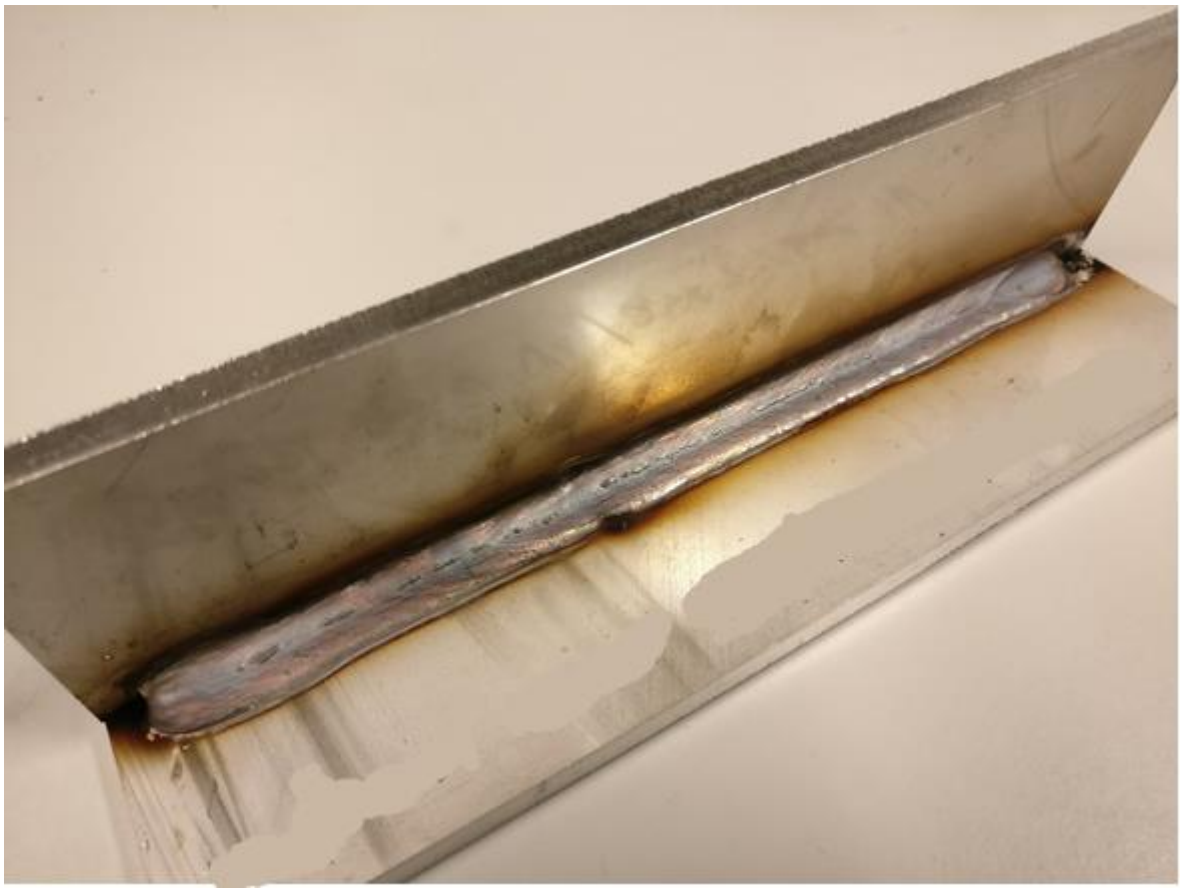
Koe 4.15. Pistooli 10

Koe 4.16. Pistooli 9a lisädiffuusorilla, suutin IV



Koe 4.17. Pistooli 9b lisädiffuusorilla, suutin IV

Koe 4.18. Pistooli 9b, diffuusori 2, suutin IV



Koe 4.19. Pistooli 10, diffuusori 2