

## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

### Rajoitetun kantaman ja pitkän kantaman luotien kehitys ja stabiliteettitarkastelut

**Prof. Olli Saarela, Aalto-yliopisto, Sovellettu mekaniikka  
(Ma. Prof. Erkki Soinne, Aalto-yliopisto, Sovellettu mekaniikka)  
Timo Sailaranta, Aalto-yliopisto, Sovellettu mekaniikka  
Arttu Laaksonen, Aalto-yliopisto, Sovellettu mekaniikka  
Lauri Vesaoja, Aalto-yliopisto, Sovellettu mekaniikka  
Niina Jantti, Aalto-yliopisto, Sovellettu mekaniikka  
(Juha Karstunen, Aalto-yliopisto, Sovellettu mekaniikka)  
Tuotekehityspaallikko Pekka Lintula, Nammo Lapua Oy**

#### Tiivistelmä / Abstract

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kahta erityiskäyttöön tarkoitettua luotityyppiä. Tarkasteltavista luodeista toinen on nk. rajoitetun kantaman luoti, jonka lento pyritään pysäyttämään hallitusti jonkin halutun matkan jälkeen. Mikäli kyseessä on harjoitusluoti, sen on lento-ominaisuuksiltaan vastattava riittävän hyvin todellista luotia jollekin halutulle etäisyydelle ennen lennon pysähtymistä. Luoti voitaneen pysäyttää usealla eri tavalla, ja tässä työssä tehtävää lähestytään aerodynamiikan keinoin.

Toinen tarkasteltu luotityyppi on pitkän kantaman luoti. Tässä tapauksessa erityisen ongelmallinen on nk. transsooninen nopeusalue, jolloin tavanomaisesti muotoillun luodin lentoon alkaa vaikuttaa kyseisen nopeusalueen virtauksen erityispiirteet. Ongelmia pyritään välttämään mm. muokkaamalla hieman tyypillisesti kartiomaista peräosaa. Lisäksi esitetään mahdollisuus vaikuttaa luodin lento-ominaisuuksiin hitausmomenttien kautta sekä painopisteen paikan sijoituksella.

Molemmissa tapauksissa sopivaa luotikonstruktiota etsitään pääasiassa numeerisen laskennan avulla. Tutkimusryhmän käytössä on lisäksi ollut eräitä koeammuntojen tuloksia.

Työn ensimmäisessä vaiheessa 2010 selvitettiin jo käytössä olevia teknisiä ratkaisuja, ja arvioitiin niiden toimivuutta. Lisäksi luotiin numeeriseen laskentaan perustuvat valmiudet uusien vastaavantyyppisten luotien suunnitteluun.

Tutkimuksen toisessa vaiheessa vuoden 2011 aikana menetelmiä sovellettiin eräiden käytössä olevien luotien ja niiden modifikaatioiden analyysiin, sekä selvitettiin erään suunnitteilla olevan rajoitetun kantaman luodin epästabiliteettimekanismeja.

#### 1. Johdanto / Introduction

Kivääricaliiperisten projektiilien kantaman hallittuun säätelyyn on kasvava tarve sekä Puolustusvoimilla että siviilipuolella. Tarvealueita ovat mm. Puolustusvoimien harjoituspatruunat, tarkkuuspatruunat sekä tietyt metsästyspatruunat. On tärkeää, että luoti on erittäin tarkka haluttuun käyttöetäisyyteen asti, mutta putoaa sen jälkeen nopeasti maahan.

Rauhaan pakottamis- ja sotilasoperaatioissa on kasvava tarve erittäin pitkän matkan tarkoille ampumatarvikkeille (sniper-käyttö). Syynä on uhkakuvien muuttuminen perinteisestä sodankäynnistä ns. asymmetriseksi sodaksi. Vihollinen toimii tuhotöiden, väijytysten ym. aseellisen häirinnän avulla. Miestappioiden minimoimiseksi vastustaja on saatava neutraloitua kaukaa, sivullisille vaaraa aiheuttamatta. Ampumamatkat tarve näissä tilanteissa on liian suuri perinteisille kivääricaliiperin projekteille.

Postiosoite	MATINE Puolustusministeriö PL 31 00131 HELSINKI	Sähköposti	matine@defmin.fi
Käyntiosoite	Eteläinen Makasiinikatu 8 00130 HELSINKI	WWW-sivut	www.defmin.fi/matine
Puhelinvaihe	(09) 16001	Y-tunnus	FI01460105
Pääsihteeri	(09) 160 88310	OVT-tunnus/verkkolaskuosoite	003701460105
		Itellan operaattorivälittäjä-tunnus	003710948874
Suunnittelusihteeri	(09) 160 88314	Verkkolaskuoperaattori	Itella Information Oy
Toimistos sihteeri	050 5555 837	Yhteyshenkilö/Itella	helpdesk@itella.net
Faksi kirjaamo	(09) 160 88244		



Erityisen pitkän kantaman luotien on pystyttävä tarkkuuden säilyttämiseksi lentämään vakaasti vielä transsoonisella alueellakin (300–400 m/s). Nopeusalueen aerodynaamiset erityispiirteet tekevät tehtävästä erittäin haastavan. Vastaavasti rajoitetun kantaman luotien suunnittelulle asettaa suuren haasteen mm. lennon loppuvaiheen uudelleenstabiloitumisen estäminen. Uusien, aiemmista ratkaisuista poikkeavien luotigeometrioiden löytämiseen pyritään korkean teknologian menetelmin. Lähestymistapa on maassamme uusi tällä aihealueella.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma / Research objectives and accomplishment plan

Tutkimuksen tavoite on löytää molemmille kuvatuille luotityypeille alustava tekninen ratkaisu tai ratkaisuja. Samalla tavoitteena on, että yleinen tietämys aihealueen fysiikasta so. aerodynamiikasta ja lennon mekaniikasta maassamme lisääntyy.

Tutkimus toteutetaan vaiheittain alkaen alan kirjallisuuteen perehtymällä. Näiltä osin hankkeessa syntyi vuoden 2010 aikana yksi opinnäytetyö (Diplomityö, Juha Karstunen).

Työn toisessa vaiheessa käytetään numeerisia rata- ja virtauslaskentamenetelmiä toisaalta menetelmien ja toisaalta olemassa olevien luotikonstruktioiden toimivuuden arvioimiseksi. Tätä seuraavassa vaiheessa keskitytään parhaimmiksi osoittautuneisiin menetelmiin ja geometriaratkaisuihin joita edelleen jatkokehitetään tarpeen mukaan. Kaikissa näissä työvaiheissa pyritään kehittämään myös uusia, aiemmista poikkeavia ratkaisutapoja ko. luotityypeiksi. Myös työn tästä vaiheesta syntyi vuoden 2011 aikana opinnäytetyö (Diplomityö, Arttu Laaksonen).

Teoreettista ja laskennallista tutkimusvaihetta seurannee lähitulevaisuudessa kokeellinen vaihe, jossa eräitä luotityyppejä ammutaan Nammon ja mahdollisesti Puolustusvoimien koeammuntaradoilla. Päätös mahdollisista jatkotoimista syntyyneen tämän vaiheen jälkeen.

Työn kaikissa vaiheissa pyritään tukeutumaan Nammon ja Puolustusvoimien asiantuntemukseen alalla.

## 3. Aineisto ja menetelmät / Materials and methods

Tutkimustyö alkoi kirjallisuustutkimuksella (2010) sekä tutustumisella Nammo Lapuan tehtaaseen ja valmistusmenetelmiin. Naista työvaiheista projektin ensimmäinen päätutkija Juha Karstunen laati opinnäytteensä.

Varsinainen numeerinen laskentatyö käynnistyi rajoitetun kantaman luodin osalta laskemalla Nammo Lapua Oy:n kehittämää prototyyppiä. Pitkän kantaman luodin osalta keskityttiin erääseen hyvin tunnettuun (M33) geometriaan, sillä kyseisen luotityypin aerodynaamisia kertoimia on julkisesti saatavilla. Tarkoituksena tässä vaiheessa oli erityisesti testata laskentamenetelmien toimivuutta sekä selvittää jatkokehitystarpeet niiden osalta.

Virtauslaskentaan käytettiin Finflo-ohjelmaa, jonka kehitys aloitettiin TKK:n Aerodynamiikan laboratoriossa 1980-luvun lopulla (tutkimusyksikkö nykyisin osana Sovelletun mekaniikan laitosta). Tätä Navier-Stokes -yhtälöitä ratkaisevaa ohjelmaa on kehitetty ja käytetty vuosien varrella hyvin monenlaisten virtauksien laskentaan, mutta se on laadittu erityisesti tässäkin tutkimuksessa käsiteltävän suurnopeusaerodynamiikan tarpeisiin. Ohjelma on sittemmin otettu käyttöön myös Aalto-yliopiston ulkopuolella, ja sen kehityksestä ja kaupallisesta levityksestä vastaa 1990-luvulla perustettu Finflo Oy.

Virtauslaskennan tulosten tarkistamiseksi vastaavia laskuja tehtiin myös erällä kaupallisella virtauslaskentaohjelmalla. Kaupallista ohjelmaa käytettiin erityisesti rajoitetun kantaman luotia tarkasteltaessa. Vuoden 2011 loppupuolella siirryttiin tältä osin nk. RANS-laskennasta Des-laskentaan.

Ratalaskentaa tehtiin Aalto-yliopistossa laaditulla kuuden vapausasteen mallilla. Menetelmä on periaatteessa tarkka tämäntyyppiselle jäykälle kappaleelle. Itse laskentaohjelmaa on käytetty ja testattu monissa sovellutuksissa viimeisen 15 vuoden aikana.

## 4. Tulokset ja pohdinta / Results and discussion

Tutkimuksessa tähän asti saavutetut päätulokset ovat seuraavat:

Molemmilla käytetyillä virtauslaskentaohjelmistoilla on saatu järkeviä ja yhtäpitäviä tuloksia ole-massaolevien luotien aerodynamiikan laskennassa. Tämä on oleellista, jotta laskennallisiin tuloksiin voidaan tutkimuksen edetessä luottaa.

Aalto-yliopistolla laadittua virtauslaskentamenetelmää on kehitetty eteenpäin, ja lähitulevaisuudessa pystytään tekemään yhdistettyjä virtauslaskenta-ratalaskenta -simulaatioita luodeille. Kytkeyty laskenta perustuu Aerodynamiikan laboratoriossa kehitettyihin Finflo- ja HutFiy2-ohjelmiin. Tämän-kaltainen laskenta vaatii erittäin paljon tietokonekapasiteettia, mutta toisaalta mahdollistaa fyysi-kaalisesti realistisemmän laskennan transsoonisen nopeusalueen ongelmien ratkaisussa.

Kaupallisen virtauslaskentaohjelman tarjoamia mahdollisuuksia/piirteitä selvitettiin aktiivisesti työn edetessä, ja laskennassa voitiin siirtyä paremmin todellisuutta vastaavaan laskentaan erityisesti ei-pyörähdysymmetristen luotien Magnus-ilmion osalta (DES). Molemmille luotityypeille on löydetty lupaavia ratkaisumalleja ja Nammon ideoiman rajoitetun kantaman luodin laskennallinen tarkastelu päästiin aloittamaan vuoden 2010 loppupuolella. Työtä jatkettiin vuoden 2011 aikana, ja vuoden loppuun mennessä oletetaan

Des-laskennan edenneen niin, että riittävän tarkka luodin aerodynaaminen malli voidaan laatia tarkennettuja ratalaskuja varten.

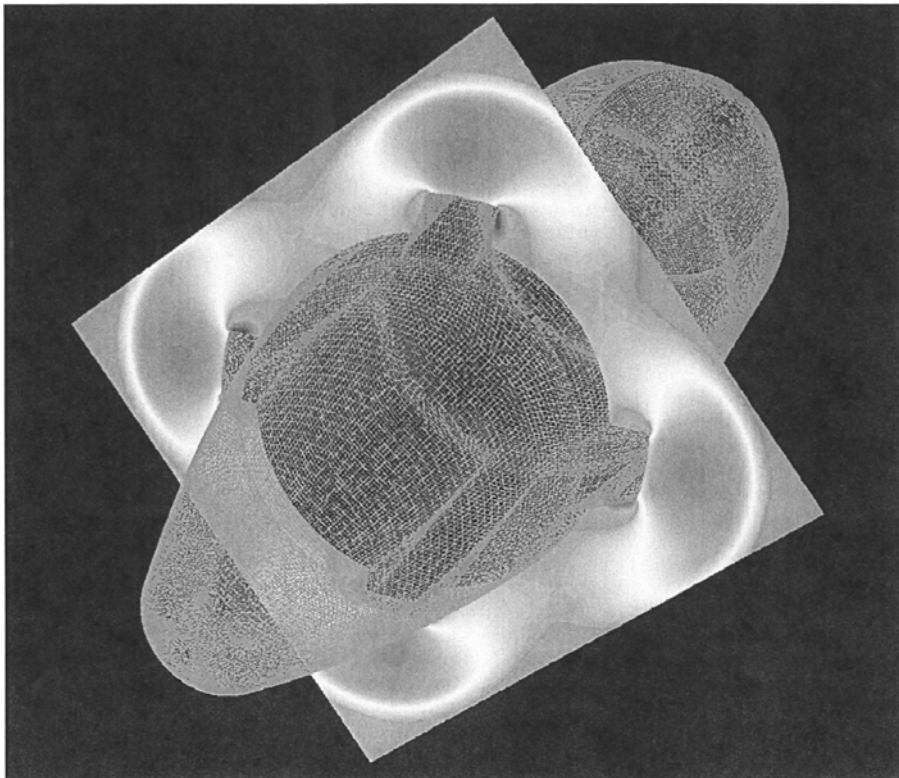
Erityisen pitkän kantaman luodin erään (Nammon) perusgeometriian laskenta aloitettiin myös vuoden 2010 loppupuolella. Samalla työtä jatkettiin vuoden 2011 aikana myös M33- luodin osalta. Laskuissa pystyttiin toistamaan julkaistuja vertailutapauksia mm. transsooniselta nopeusalueelta. Tämän kirjoitushetkellä ei ole päästy aloittamaan kokonaan uuden tyyppisten geometrioiden laskentaa (porraspera, ontelopera etc.), mutta olemassa olevien geometrioiden modifikaatioita on tarkasteltu Des-laskennalla. Tulosten perusteella jo pienillä luodin ulkomuodon muutoksilla voidaan parantaa stabiliteettia transsoonisella alueella.

Talla hetkellä näyttäisi kuitenkin edelleen siltä, että luodin sisäisten massojen uudelleenryhmittelyllä voitaisiin pitkän kantaman luodin tapauksessa helpoiten saavuttaa transsoonisella alueella tarvittava lisästabiliteetti.

Luodin ytimen modifikaatiolla ja/tai materiaalin vaihdolla saadaan painopiste siirrettyä taaksepäin ja poikittainen hitausmomentti pieneksi. Talloin pitkän kantaman luotien transsoonisen alueen häiriömomenteja saadaan pienennettyä, sillä momentin vipuvarsi lyhenee painopisteen siirrolla (jos häiriöt vaikuttavat perän alueella). Painopisteen siirron vaikutukset gyroskooppiin stabiliteettiin jäävät vahaisiksi pienemmän poikittaisen hitaus- momentin myötä. Näin erityisesti raskaamman ydinmateriaalin tapauksessa, jolloin massa saadaan keskitettyä pienemmälle alueelle.

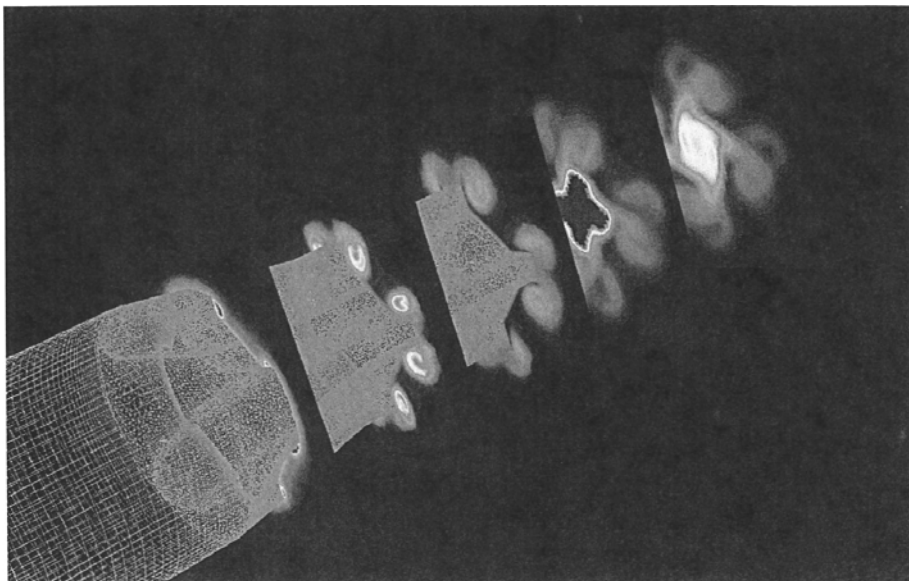
Mahdollisesti massasuureiden sopivalla valinnalla pitkän kantaman luodin vaste sivutuuli- puuskaan saadaan säädettyä sellaiseksi, että luoti "korjaa" puuskan sivuunvievän vaikutuksen. Aihealuetta ei ehditty tämän hankkeen aikana tutkia.

Kuvassa **1** on esitetty erään tarkastellun rajoitetun kantaman luodin geometria (pintahila) se- ka painekerroinjakauma pyörimistä jarruttavien siipien kohdalla. Kyseinen modifikaatio (pyörimistä jarruttavat siivet edessä) ei osoittautunut erityisen tehokkaaksi epästabiloinnin mekanismiksi.



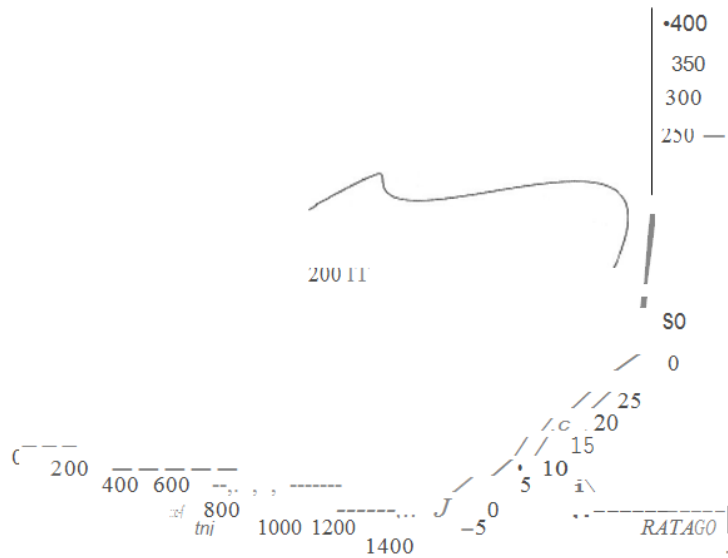
**Kuva 1.** Painekeinojakauma luodin etupinnalla olevien siipien kohdalta Machin luvulla 1.7 ja kohtauskulmalla 0 astetta.

Kuvassa 2 on esitetty erään tarkastellun rajoitetun kantaman luodin geometria (pintahila) sekä turbulenssin kineettinen energia pyörimistä jarruttavien takasiipien kohdalla. Pitkät takasiivet destabiloivat luodin lennon nopeasti.



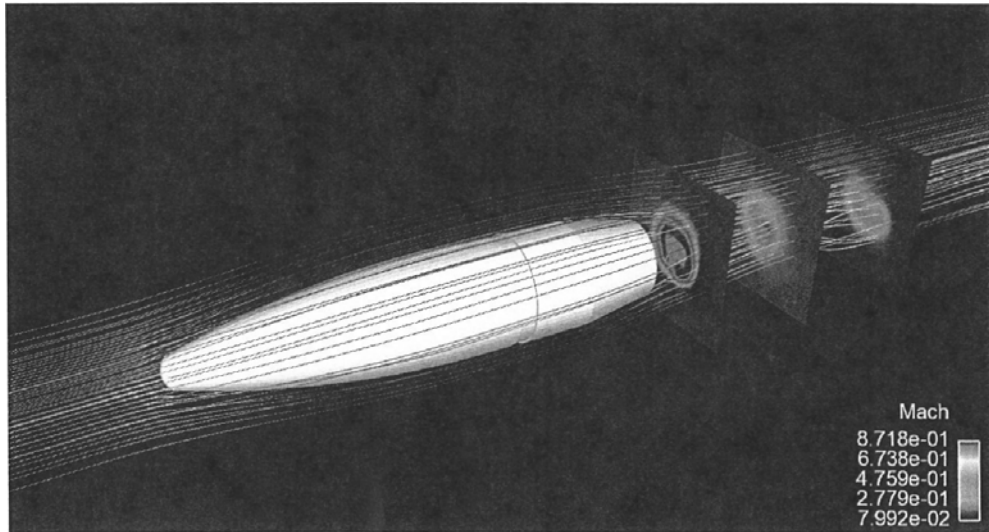
**Kuva 2.** Luodin takaosassa sijaitsevista siivistä aiheutuvat pyörteet Machin luvulla 1.7 ja kohtauskulmalla 0 astetta.

Kuvassa 3 on esitetty vielä erään tarkastellun harjoitusluotigeometrian simuloitu (6-dof) lentorata. Luoti kaatui simulaatioissa nopeasti n. Machin luvulla 0.7 ja putosi maahan loppunopeudella n. 30 m/s lähes pystysuorasti.



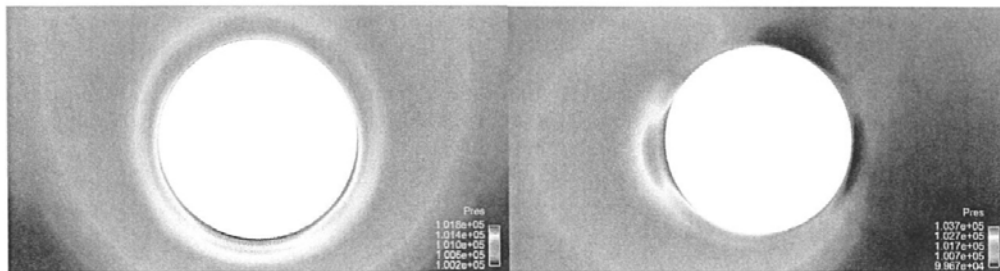
**Kuva 3.** Erään tarkastellun harjoitusluotigeometrian simuloitu (6-dof) lentorata. Kuvassa luoti on lentänyt vasemmalta oikealle. Kuvaan valittu mittakaava liioittelee sivusiirtymän (y) suuruutta.

Kuvassa 4 on esitetty M33-luodin geometria sekä Machin luvun jakautuma virtaviivoilla ja epäsymmetrisessä vanavedessä DES-menetelmällä laskettuna. Ajasta riippuvalla DES- laskennalla saadaan mallinnettua vanaveden pyörteet huomattavasti keskiarvotettua RANS- laskentaa tarkemmin. Vanaveden pyörteiden mallinnuksella on merkitystä, koska ne vaikuttavat tiivistysaaltojen ja rajakerroksen ohella luodin peräkartion painekenttään.



**Kuva 4.** 0.50 M33-luodille laskettu Machin luvun hetkellinen jakauma virtaviivoilla ja epäsymmetrisessä vanavedessä (DES, kohtauskulma 2 astetta, kallistuskulmanopeus 4768,5 rad/s ja tulovirtauksen Machin luku 0,85).

Kuvassa 5 on esitetty luodin takaosan poikkileikkauksen painejakauma RANS ja DES-menetelmällä laskettuna.

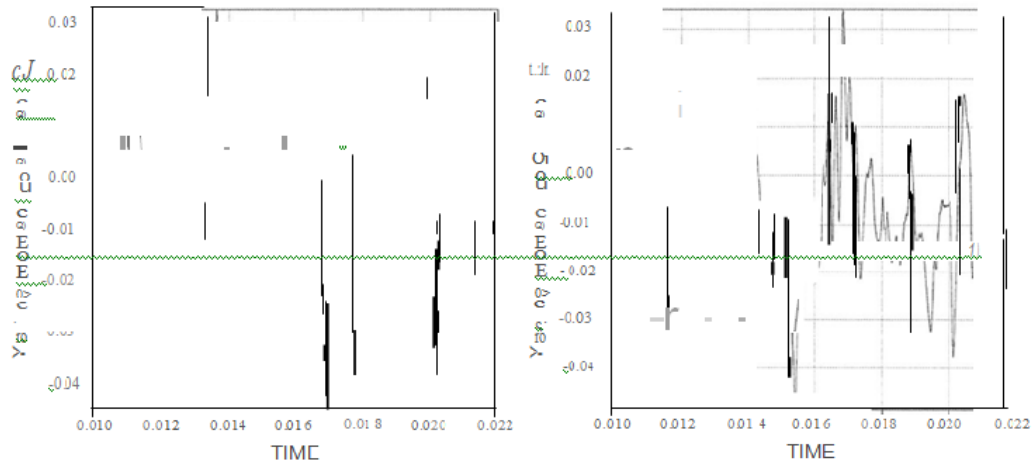


**Kuva 5.** Painejakauma poikkileikkauksessa 0,2 mm luodin takareunasta kärkeä kohti RANS- (vasen, keskiarvo) ja DES-menetelmällä (oikea, hetkellinen) laskettuna. 0.50cal M33-luoti, kohtauskulma 2 astetta, kallistuskulmanopeus 4768,5 rad/s, tulovirtauksen Machin luku 0,85.

Fysikaalisesti realistisemmalla DES -laskennalla saadaan pystytasossa vaikuttavan kohtauskulman ja pyörimisen tuloksena huomattavan epäsymmetrinen painejakauma poikkittais-suunnassa (Magnus-ilmiö).

Kuvassa 6 on esitetty DES-menetelmällä laskettu M33-luodin suuntamomenttikerroin ajan funktiona Machin luvulla 0,98. Vasemmanpuoleinen kuvaaja esittää laskentatulosta alkuperäisellä luotigeometrialla. Oikeanpuoleisen kuvaajan tulos on laskettu geometrialla, jossa erona alkuperäiseen M33-luotiin on ainoastaan takareunan 0,2 mm pyöritys. Alkuperäisessä M33:ssa takareuna on suora. Kuvaajista näkyy, että suoraan Magnusmomenttikerroimeen verrannollinen suuntamomenttikerroin heilahtelee ajan funktiona huomattavasti molemmissa tapauksissa. Heilahtelu tapahtuu kuitenkin hyvällä tarkkuudella tietyn keskiarvon ympärillä, koska 0,022 s aikana luoti on ehtinyt pyörähtää jo 19 kertaa pituusakselinsa ympäri. Heilahtelevan suuntamomentin keskiarvoja tarkasteltaessa havaitaan, että takareunastaan pyöristetyn luodin suuntamomentti heilahtelee itseisarvoltaan suuremman kertoimen ympärillä kuin alkuperäisen luodin suuntamomentti. Laskentatulosten perusteella siis hyvin pienikin luodin peräkartion yksityiskohta voi vaikuttaa selvästi Magnusmomenttiin transsoonisella alueella pienellä kohtauskulmalla. Suoran takareunan edullisuus Magnusmomentin kannalta perustuu siihen, että virtaus irtoaa saannon mukaisemmin teravasta kuin pyöristetystä kulmasta. Talloin tyypillisesti myös paine-

jakauman epäsymmetrisyys peräkartion takaosassa heikkenee.



**Kuva 6.** Alkuperäisen (vasen) ja takareunaltaan 0,2 mm pyöristetyn (oikea) M33-luodin suuntamomenttikerroin ajan funktiona (DES, kohtauskulma 2 astetta, kallistuskulmanopeus 5499,2 rad/s ja tulovirtauksen Machin luku 0,98).

## 5. Loppupäätelmät / Conclusions

Tutkimus on edennyt suunnitelmien mukaan, vaikka aikataulusta jäätii hieman jälkeen työn ensimmäisessä vaiheessa. Tämä johtuu erityisesti sekä päätutkijan että tutkimuksen johtajan vaihtumisesta tutkimushankkeen ensimmäisessä vaiheessa 2010. Uusien tutkijoiden palkkaamisen jälkeen ensimmäisten luotigeometrioiden laskennallinen tarkastelu pääsi alkamaan vasta vuoden 2010 lopulla. Laskennan verifiointi/kehitystyö jatkui kesään 2011 asti, ja on edelleen osin meneillään.

Hankkeen teknistieteellisen eteneminen vastaa hyvin pitkälti ennakoitua, myös ongelmiseen ja osin ratkaisuihin. Molempien luotien tapauksessa näyttäisi olevan kysymys samasta virtausilmiöstä, nk. Magnus-ilmiöstä. Pitkän kantaman luodin tapauksessa ko. pyörimisestä aiheutuva kytkeytyminen aiheuttaa epätoivottua luodin heilahtelua transsoonisella alueella. Vastaavasti kyseisen mekanismin avulla saadaan rajoitetun kantaman luoti kaatumaan suurilla alisoonisilla nopeuksilla. Kyse on siis tarkastellun luodin osalta dynaamisesta epästabiiliteetista, ei pyörimisen hidastumisen aiheuttamasta gyroskooppisesta vastaavasta ilmiöstä.

Rajoitetun kantaman luodin tapauksessa on oleellista löytää sopivassa määrin modifioitu esim. perän geometria, jotta toivottu epästabiiliteetti saadaan aikaan suurilla alisoonisilla nopeuksilla. Talloin luoti lentää aluksi halutulla tavalla, ja tämän jälkeen vielä kohtuullisen suurilla nopeuksilla (200–250 m/s) tapahtuva kaatuminen muuttua nopeuden tehokkaasti pyörimiseksi kaikkien akselien ympäri. Talloin nopeus ja kineettinen paine pienenevät jyrkästi eikä luoti todennäköisesti enää stabiloidu dynaamisen vaimennuksen vuoksi.

Pitkän kantaman luodin tapauksessa luodin peräosan muotoilu on tehtävä siten, että virtauskenttä pysyy mahdollisimman symmetrisenä myös transsoonisella alueella. Talloin destabiloiva suuntamomentti (aerodynaaminen kytkentä) saadaan minimoitua. Tämän tutkimuksen puitteissa on tarkasteltu luodin peräosan pienten geometristen muutosten vaikutusta destabiloivaan suuntamomenttiin. Sen sijaan koko peräosan radikaalia uudelleenmuotoilua ei ole vielä tutkittu laskennallisesti. Mikäli tämä osoittautuisi mahdolliseksi tai kustannustehokkaaksi, luodin painopiste pitää pyrkiä sijoittamaan mahdollisimman taakse destabiloivan momentin minimoimiseksi. Valmistusteknisesti tämä saattaisi olla helpoin vaihtoehto.



---

## 6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit / Scientific publishing and other reports produced by the research project

Tutkimuksessa syntyi vuoden 2011 aikana yksi tieteellinen julkaisu. Vuoden 2011 lopun ja/tai mahdollisesti vuoden 2012 alkupuolen aikana on tarkoitus laatia 1-2 artikkelia koskien tehtyä työtä. Julkaisua varten on kuitenkin tehtävä vielä erikseen tarkasteluja geneerisillä luotigeometrioidella, jotta Nammo Oy:n mahdollisia liikesalaisuuksia ei paljasteta tässä yhteydessä.

**Arttu Laaksonen**, CFD study of roll damping of a winged bullet. 24th Nordic Seminar on Computational Mechanics, NSCM-24, Helsinki, Aalto University, 2011.

**Arttu Laaksonen**, Tutkimus luodin pyörimisen vaimenemisesta virtauslaskennan avulla (Diplomityö), Aalto-yliopisto, 2011.

**Arttu Laaksonen**, Rajoitetun kantaman luodin CFD-tarkasteluja. Aalto-yliopisto, 2011 (julkaisematon).

**Lauri Vesaoja**, Pitkän kantaman luodin tutkimus ja kehittäminen numeerisin menetelmin, Aalto-yliopisto, 2011.

**Niina Jantti**, Koeluodin lentoratalaskuja (neljä muistiota), Aalto-yliopisto, 2011 (julkaisematon).