



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tommi Niskakangas

Virtauslaskennan hyödyntäminen pyörimisvakavoitujen kappaleiden tuotekehitystoiminnassa

Opinnäytetyö

Syksy 2023

Insinööri (ylempi AMK), Teknologiaosaamisen johtaminen



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (ylempi AMK), Teknologiaosaamisen johtaminen

Tekijä: Tommi Niskakangas

Työn nimi: Virtauslaskennan hyödyntäminen pyörimisvakavoitujen kappaleiden tuotekehitystoiminnassa

Ohjaaja: Pasi Junell

Vuosi: 2023

Sivumäärä: 60

Liitteiden lukumäärä: -

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin tietokoneavusteisen virtauslaskennan soveltuvuutta pyörimisvakavoitujen kappaleiden tuotekehitystoiminnan nopeuttamiseksi. Opinnäytetyön on tilannut Nammo Lapua Oy.

Tietokoneavusteisen virtauslaskennan soveltuvuutta pyörimisvakavoitujen kappaleiden tuotekehitystoiminnan nopeuttamiseksi tutkittiin vertailemalla tietokoneavusteisella virtauslaskennalla saatuja tuloksia Ingallsin G1- ja G7-standardikappaleiden standardiarvoihin ja Nammo Lapua Oy:n valmistamasta 10,0 g:n Scenar^L-luodista mittaamalla määritettyihin arvoihin.

Opinnäytetyö rajattiin käsittelemään vain Solid Edge FloEFD- ja Ansys-virtauslaskentaohjelmistoja, joiden soveltuvuutta aiottuun käyttötarkoitukseen arvioitiin opinnäytetyön edessä. Lopulta tietokoneavusteisen virtauslaskennan soveltuvuutta pyörimisvakavoitujen kappaleiden tuotekehitystoimintaan päätettiin tarkastella vain Ansys-ohjelmistoympäristössä sen käyttöliittymän sekä ohjelmistojen vertailussa saatujen standardikappaleiden vertailutulosten vuoksi.

Ansys-ohjelmistoympäristössä suoritettujen virtauslaskentatapahtumien perusteella opinnäytetyössä tutkittavana ollut menetelmä vaikuttaisi soveltuvan pyörimisvakavoitujen kappaleiden tuotekehitystoimintaa tukevaksi työkaluksi. Opinnäytetyössä tehtyjen virtauslaskentojen myötä havaittiin, että tietokoneavusteinen virtauslaskenta Ansys Fluent -ohjelmistolla saattaisi tarjota vastauksia myös monimutkaisempien laskentatapahtumien suhteen, kuten lentorataa häiritsevien muuttujien huomioimiseen. Havainto tarjoaa mahdollisuuden ulkoisille häiriöille altistuneiden geometrioiden virtauslaskentatapahtumien jatkotutkimuksiin.

¹ Asiasanat: tietokoneavusteinen virtauslaskenta, CFD, ballistiikka, tuotekehitys

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Master's Degree Programme in Technology Competence Management

Author/s: Tommi Niskakangas

Title of thesis: Utilization of computed flow dynamics in product development of rotationally stabilized components

Supervisor(s): Pasi Junell

Year: 2023

Number of pages: 60

Number of appendices: -

In this thesis, the applicability of computed fluid dynamics was studied to speed up the product development activities of rotationally stabilized components. The thesis was commissioned by Nammo Lapua Oy.

The applicability of computed fluid dynamics to speed up the product development activities of rotationally stabilized components was investigated by comparing the results obtained with computed fluid dynamics to the standard values of Ingalls's G1 and G7 standard geometries and to the values determined by measuring the 10,0 g Scenar¹ bullet manufactured by Nammo Lapua Oy.

The thesis was limited to studies using only Solid Edge FloEFD and Ansys computed flow dynamics software's, whose suitability for the intended purpose of use was evaluated as the thesis progressed. In the end, it was decided to examine the applicability of computed flow dynamics for the product development of rotationally stabilized components only in the Ansys software environment due to its user interface and the comparison results of standard geometries obtained when comparing the software's.

Based on the computed flow dynamics calculation events performed in the Ansys software environment, the method investigated in the thesis would seem to be suitable as a tool to support the product development of rotationally stabilized components. With the computed dynamics flow calculations made in the thesis, it was found that computer-aided flow calculation with the Ansys Fluent software might also offer answers regarding more complex calculation events, such as taking into account variables that disturb the flight path. The observation provides an opportunity for further studies of flow calculation events in geometries exposed to external disturbances.

¹ Keywords: computed fluid dynamics, CFD, ballistics, product development

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	8
1 JOHDANTO	9
1.1 Taustat	9
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus	10
1.3 Työn rakenne	11
2 LENTO-OMINAISUUDET	13
2.1 Pyörimisvakavoitujen kappaleiden lento-ominaisuudet käsitteenä.....	13
2.2 Ratalaskennan historiaa.....	18
2.3 Laskentamallien esittely	19
2.3.1 Vertailumenetelmä	20
2.3.2 Kehittyneemmät laskentamallit	24
2.4 Lento-ominaisuuksien todentaminen.....	27
3 VIRTAUSLASKENTA	28
3.1 Virtauslaskennan teoriaa.....	28
3.2 Käytettävät turbulenssimallit.....	28
3.3 Tavoitellut ominaisuudet.....	29
3.3.1 Kytkeä standardikappaleiden geometrioihin.....	30
3.3.2 Kytkeä standardikappaleista poikkeaviin geometrioihin	30
4 VIRTAUSLASKENTA-OHJELMISTOJEN ARVIOINTI	32
4.1 Virtauslaskentaohjelmistojen soveltuvuuden arviointi.....	32
4.2 Solid Edge Simcenter FloEFD.....	33
4.2.1 Solid Edge FloEFD virtauslaskentatulokset standardikappaleella.....	33
4.3 Ansys-ohjelmistoympäristö.....	36
4.4 Ansys-virtauslaskentaverkoston määrittäminen	36

4.5	Ansyst CFX ja Ansys Fluent.....	37
4.5.1	Ansys Fluent -ohjelmiston parametrit.....	38
4.5.2	Ansys Fluent -ohjelmiston virtauslaskentatulokset standardikappaleilla	39
4.6	Johtopäätökset virtauslaskentaohjelmistojen soveltuvuudesta	41
5	VALMISTETTUJEN KAPPALEIDEN GEOMETRIOIHIN PERUSTUVAT VIRTAUSLASKENTATULOKSET	43
5.1	Vertailu valmistettujen kappaleiden mittaustuloksiin.....	43
5.2	Virtauslaskentatuloksista määritetyt graafiset kuvaajat	45
5.2.1	Virtauskenttien nopeudet	46
5.2.2	Turbulenttinen kineettinen energia.....	47
5.2.3	Virtausnopeudet kappaleen pinnalla noin 1.0 Mach nopeuksilla.....	49
6	GRAVITAATION JA ROTAATION VAIKUTUKSET VIRTAUSLASKENTAAN	52
7	TEOREETTINEN HYÖTY TUOTEKEHITYKSEN NÄKÖKULMASTA.....	54
8	YHTEENVETO JA POHDINTA.....	56
	LÄHTEET	59

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Kokovaippaluodin valmistusvaiheet	10
Kuvio 2. Havainnekuva pinta-alkion pinta-alasta	16
Kuvio 3. Painopiste ja aerodynaaminen painopiste	16
Kuvio 4. G1- ja G7-standardikappaleiden geometriat	22
Kuvio 5. Standardikappaleiden vastuskertoimet	23
Kuvio 6. Kuuden vapausasteen laskentamallin komponentit	26
Kuvio 7. Litzin mittauksiin perustuvat vastuskertoimet.....	30
Kuvio 8. G7-standardikappaleen ja 10,0 g Lapua Scenar ^L -luodin geometriat.....	31
Kuvio 9. Solid Edge FloEFD -ohjelmiston G1-virtauslaskentatulokset verrattuna G1- standardikappaleeseen.....	34
Kuvio 10. Solid Edge FloEFD -ohjelmiston G7-virtauslaskentatulokset verrattuna G7- standardikappaleeseen.....	35
Kuvio 11. Ansys-ohjelmistonäkymä virtauslaskentakentän määrittämissä vaiheissa	37
Kuvio 12. Ansys Fluent G7	38
Kuvio 13. Laskentaverkon solukokojen jakauma geometrian pinnalla	39
Kuvio 14. Ansys-ohjelmistoympäristön G1-virtauslaskentatulokset verrattuna G1- standardiin	40
Kuvio 15. Ansys-ohjelmistoympäristön G7-virtauslaskentatulokset verrattuna G7- standardiin	41
Kuvio 16. G7-standardikappaleen turbulenssikenttä.....	42
Kuvio 17. GB552-mittaustuloksien suhtautuminen Ansys-virtauslaskentatuloksiin.....	44

Kuvio 18. Dopplerin ilmiöön perustuvien mittaustulosten suhtautuminen virtauslaskentatuloksiin ja empiirisesti määritettyihin arvoihin.....	45
Kuvio 19. GB552-luodin laskennallisten virtauskenttien nopeudet.....	46
Kuvio 20. G1-standardikappaleen virtauskenttien nopeudet.....	47
Kuvio 21. GB552-luodin geometrian ympärille muodostuneet turbulenssikentät	48
Kuvio 22. G1-standardikappaleen turbulenssikenttä.....	49
Kuvio 23. Virtauskenttien nopeudet kappaleen pinnalla 1,0 Mach nopeudella	50
Kuvio 24. GB552 laskennallinen vastuskerroin gravitaatio ja pyörimisliike huomioiden.....	52
Kuvio 25. GB552 laskennallinen turbulenssikenttä gravitaatio ja pyörimisliike huomioiden	53
Kuvio 26. Ulrichin ja Eppingerin tuotekehitysprosessimalli	54
Kuvio 27. Ulrichin ja Eppingerin sovellettu malli.....	54
Kuvio 28. Tietokoneavusteisen virtauslaskennan mahdollistama Ulrichin ja Eppingerin mallia mukaileva malli	55
Taulukko 1 Ingalls G1- ja G7-arvot	21

Käytetyt termit ja lyhenteet

6-DoF	Six degrees of freedom, kuuden vapausasteen laskentamalli, joka ottaa huomioon X-, Y- ja Z-akselien suuntaiset liikkeet ja näiden akselien yhteyteen syntyvät momentit
BC	Lyhenne BC tulee englannin kielen sanoista Ballistic Coefficient, ballistinen kerroin
Cd₀	Nollavastuskerroin, kuvaa kappaleen ilmanvastusta häiriöttömässä tilassa
GB552	Nammo Lapua Oy:n merkintä .30 kaliiperin (Ø7,82 mm) 10,0 g:n Scenar ^L -luodille
Dopplerin ilmiö	Äänen taajuuden ja havainnoitsijan välisten etäisyyksien erotus
Mach	Machin luku on dimensioton luku, joka kuvaa virtauksen nopeutta äänennopeuden suhteen
OTM-bullet	Open Tip Match, tarkkuusammuntaan suunniteltu luotityyppi
Scenar^L	Nammo Lapua Oy:n tuoteperhe OTM-luodeille

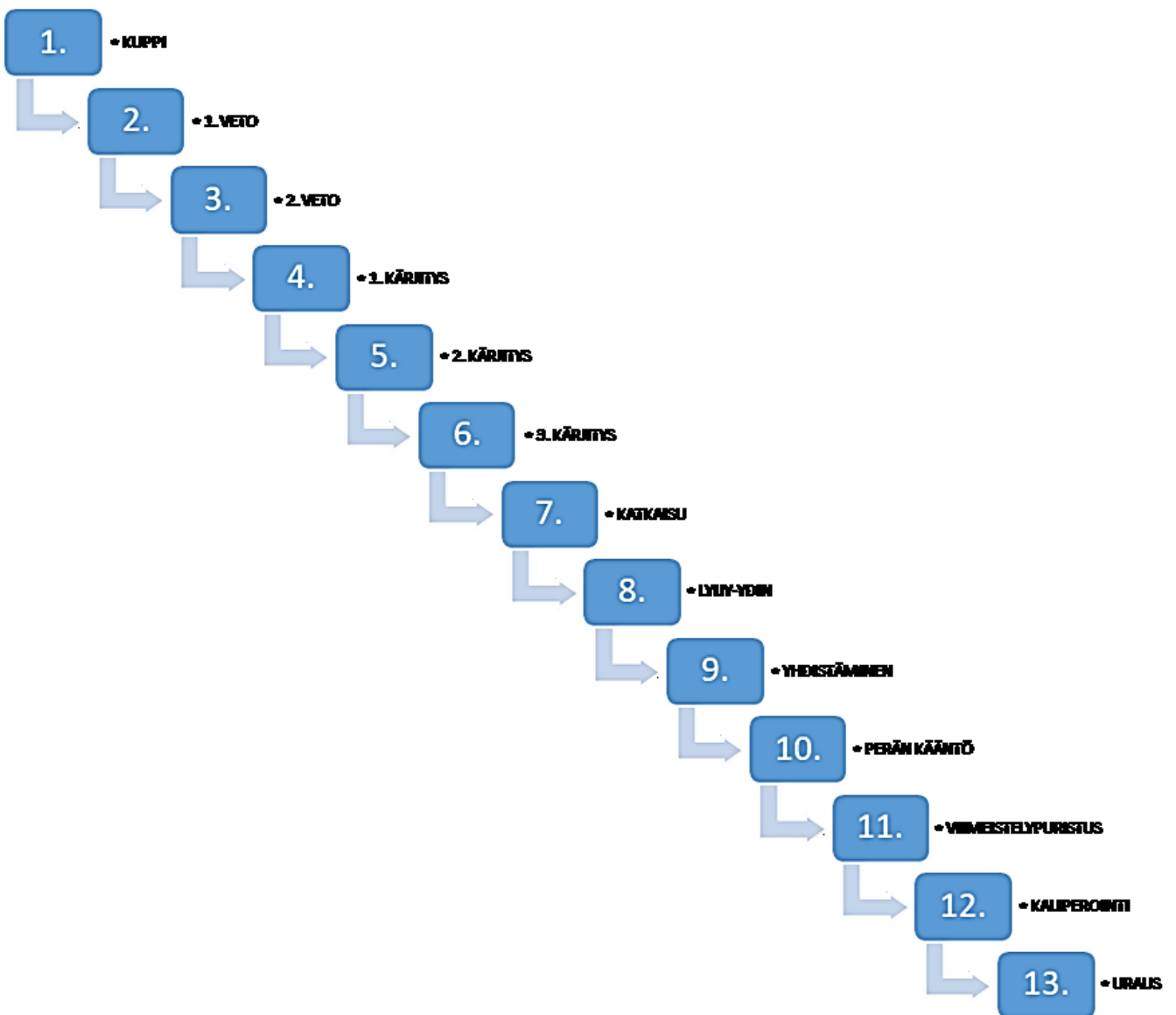
1 JOHDANTO

1.1 Taustat

Tässä opinnäytetyössä syvennytään luotien lento-ominaisuuksiin käsitteenä sekä tutustutaan lento-ominaisuuksien hyvyttä kuvaaviin suureisiin ja lentotapahtuman aikana vallitseviin lainalaisuuksiin. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, voidaanko tietokoneavusteista virtauslaskentaa hyödyntää luotien lento-ominaisuuksien arvioinnissa jo tuotekehitysvaiheessa.

Nykyisin luotien hyvyttä käsitellään pääasiassa jo valmistuneista kappaleista mitattavissa olevilla suureilla. Tuotekehityksellisestä näkökulmasta tällainen ”*yritä ja erehdy*”-metodi on kuitenkin äärimmäisen hidasta, sillä yhden uuden luotityypin valmistamiseen tarvitaan useiden eri vaiheiden sekä valmistuksessa käytettävien työkalujen suunnittelu ja valmistus. Tämän jälkeen on vielä valmistettava luodit uuden idean mukaisilla valmistustyökaluilla.

Nammo Lapua Oy:n, silloinen Patruunatehdas LAPUA Oy:n, julkaisemassa teoksessa LAPUA Latauskäsikirja esitellään kokovaippaluodin valmistus kolmetoistavaiheisena valmistusprosessina (Patruunatehdas LAPUA, 1994, s. 19). Valmistusprosessin vaiheet kuvattuna kuviossa 1. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävän ja Nammo Lapua Oy:n valmistuksessa olevan 10,0 g Scenar^L-luodin valmistus on pääpiirteissään samanlainen kuin kuvion 1 esimerkissä. Erona kuitenkin on, että tarkasteltavana olevan 10,0 g Scenar^L-luodin geometriasta valmistetaan ensin peräosa, kun taas kuvion 1 esimerkissä valmistus aloitetaan luodin kärkiosasta.



Kuvio 1. Kokovaippaluodin valmistusvaiheet (mukaillen Patruunatehdas LAPUA, 1994, s.19)

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, voidaanko tietokoneavusteista virtauslaskentaa hyödyntää luotien lento-ominaisuuksien arviointiin jo tuotekehitysvaiheessa. Virtauslasken-

nan soveltuvuutta luotien geometrinen yksityiskohtien suunnittelun apuvälineeksi arvioidaan vertailemalla opinnäytteeseen valikoitujen kappaleiden standardoituja tai mittauksin määriteltyjä vastuskertoimia tietokoneavusteisen virtauslaskennan tuloksiin.

Opinnäytetyö rajataan käsittelemään kahden yleisesti tunnetun virtauslaskentaohjelmiston, Solid Edge FloEFD ja Ansys, antamia tuloksia. Virtauslaskentaohjelmistojen antamien tulosten kyvykkyyttä arvioidaan hyödyntämällä Ingalls-standardikappaleita G1 ja G7 sekä Nammo Lapua Oy:n valmistamaa tuotetta 10,0 g Scenar^L. Kyseinen tuote valikoitui opinnäytetyössä käytettäväksi tutkimuskohteeksi kolmannen osapuolen julkaisemien tutkimustulosten vuoksi. 10,0 g Scenar^L-luoti on .30 kaliiperinen OTM-tarkkuusluoti, jonka lento-ominaisuudet on selvitetty Dopplerin ilmiöön perustuvilla mittauksilla Nammo Lapua Oy:n toimesta.

1.3 Työn rakenne

Opinnäytetyö etenee työn kannalta olennaisten käsitteiden määrittelystä ja tarkastelusta virtauslaskentaohjelmistojen arviointiin ja mittaustulosten vertailuun. Luvussa 2 tarkastellaan luotien lento-ominaisuuksia käsitteenä sekä esitellään lyhyesti lentoratalaskennan laskentamalleja ja lentoratalaskennassa vallitsevia lainalaisuuksia.

Opinnäytteen luvussa 3 tarkastellaan virtauslaskennan teoriaa ja käsitellään tietokoneavusteista virtauslaskentaa sekä laskentamalleja yleisellä tasolla. Luvussa 4 arvioidaan virtauslaskentaohjelmistojen soveltuvuutta sekä suoritetaan virtauslaskentatapahtumia standardikappaleiden geometrioiden mukaisille kappaleille. Näiden kappaleiden virtauslaskentatoja suoritetaan kahdella kaupallisesti saatavilla olevalla ohjelmistolla, joiden virtauslaskentatapahtumista saatuja laskentatuloksia verrataan standardikappaleista määritettyihin taulukkoarvoihin.

Opinnäytteen 5 luvussa esitellään tuotannollisessa mittakaavassa valmistettujen kappaleiden geometrioihin perustuvat virtauslaskentatulokset ja verrataan näitä Dopplerin ilmiöön perustuviin mittaustuloksiin. Referenssinä käytetään myös kolmannen osapuolen julkaisemia mittaustuloksia.

Opinnäytteen luvussa 6 kartoitetaan mahdollisuuksia sisällyttää virtauslaskentaan gravitaation ja pyörimisen aiheuttamat vaikutukset. Tietokoneavusteisen virtauslaskentatapah-tuman lähtöparametreina käytetään pyörimisliikkeessä olevaa virtauskenttää ja tutkittavan kappaleen geometria altistetaan gravitaatiolle.

Opinnäytteen 7 luvussa pohditaan tietokoneavusteisen virtauslaskennan mahdollistamia hyötyjä tuotekehitystyön nopeuttamiseksi. Tietokoneavusteisen virtauslaskennan todellisia hyötyjä on käytännössä mahdotonta todentaa ilman todellisen tuotekehitysprosessin läpi-käyntiä. Tästä syystä mahdollisia hyötyjä analysoidaan pääasiassa teoreettisesti hyödyn-tämällä Ulrichin ja Eppingerin (2008) tuotekehitysprosessimallia ja muokkaamalla sitä niin, että se sisältää tietokoneavusteisen virtauslaskennan mahdollistaman teoreettisen hyödyn. Opinnäytetyön luvussa 8 käydään läpi virtauslaskentaohjelmistojen laskentatuloksista teh-dyt havainnot, joiden pohjalta pohditaan tietokoneavusteisen virtauslaskennan soveltu-vuutta aiottuun käyttötarkoitukseen.

2 LENTO-OMINAISUUDET

Pyörimisvakavoitujen kappaleiden lento-ominaisuuksista puhuttaessa käytetään yleisesti termiä ballistiikka, joka sanana periytyy kreikan kielen heittämistä tarkoittavasta sanasta "ballein" (Patruunatehdas LAPUA, 1994, s. 56). Modernissa maailmassa aseballistiikka jaotellaan eri osa-alueisiin, joita ovat sisä-, väli-, ulko- ja terminaaliballistiikka ja joista ulko-ballistiikka käsittää luodin lento-ominaisuuksia käsittelevän osa-alueen (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 101–125).

2.1 Pyörimisvakavoitujen kappaleiden lento-ominaisuudet käsitteenä

Pyörimisvakavoitujen kappaleiden lento-ominaisuuksia arvioitaessa on olennaista huomioida Newtonin lait, joista toinen laki eli dynamiikan peruslaki on suurin yksittäinen luodin lentoon vaikuttava fysikaalinen ilmiö. Tämä Newtonin toinen laki kuvataan kaavalla (Valtonen, 2007, s. 193)

$$F = ma \tag{1}$$

Missä

$$a = g = \text{putoamiskiihtyvyys}$$

$$m = \text{luodin massa}$$

Kun tämän ilmiön rinnalla tarkastellaan myös tasaisesti kiihtyvää liikettä, päästään kiinni suureeseen t , jonka muutoksella on huomattavan suuri vaikutus luodin lento-ominaisuuksiin. Suureen t merkitystä kuvataan kaavalla (Valtonen, 2007, s. 192)

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2)$$

Missä

$q = \text{putoamiskiikkyvyys}$

$h = (\text{putoamis})\text{korkeus}$

$t = \text{aika}$

Suureen t merkitystä tarkastelemalla huomataan, että mitä vähemmän luodilta kuluu aikaa tietyn matkan lentämiseen, sitä vähemmän ulkopuoliset voimat ehtivät siihen vaikuttaa. Tällainen oletamus pätee vain staattisissa olosuhteissa, joissa ei huomioida ilmakehän muutoksista johtuvia impulsseja. Luotien lento-ominaisuuksia arvioitaessa voidaan tehdä karkea jako likiarvokaavoja hyödyntäviin standardikappalevertailuihin ja mahdollisimman todenmukaisiksi mitattuihin hidastuvuuksiin perustuviin laskentamalleihin.

James M. Ingalls (McCoy, 2012, s. 98) kehitti 1900-luvun alussa standardikäyrästäön kuvaamaan erimuotoisten kappaleiden vastuskertoimia. Näiden standardikappaleiden perusteella voidaan arvioida standardista poikkeavien kappaleiden lento-ominaisuuksia ballististen kertoimien avulla. Ballistiset kertoimet sovittavat standardigeometriasta poikkeavista kappaleista mitattuja arvoja standardikappaleiden arvoihin. Ballistisilla kertoimilla voidaan siis määrittää laskennalliset vastuskertoimet lähes kaikentyypisille geometrioille. Tämä menetelmä pohjautuu kuitenkin aina standardikappaleisiin ja on riippuvainen standardikappaleen geometriasta. Varsinaiset vastuskertoimet sen sijaan kuvaavat kappaleen lento-ominaisuuksia, jotka perustuvat pelkästään siihen geometriaan, mille vastuskertoimet on määritetty.

Käsiteltäessä vastuskertoimia on hyvä tarkastella kaikkia luodin lento-ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä. Puolustusvoimien yleinen ase- ja asejärjestelmäopas kuvaa kappaleen lentoon vaikuttavia aerodynaamisia voimia ja momentteja seuraavilla tavoilla: aerodynaamiset voimat aiheutuvat kappaleen pinnalla vaikuttavasta paineen ρ ja ilmvirtauksen leikkausjännityksen τ jakaumista (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 124–128). Aerodynaamiset momentit aiheutuvat esimerkiksi aerodynaamisten voimien

suhteista kappaleen painopisteeseen, virtauskentän dimensioihin ja kappaleen sisäisiin hitausmomentteihin, ja sitä kuvataan kaavalla (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 123)

$$\rho = F_p/A, \tau = F_\tau/A_a \quad (3)$$

Missä

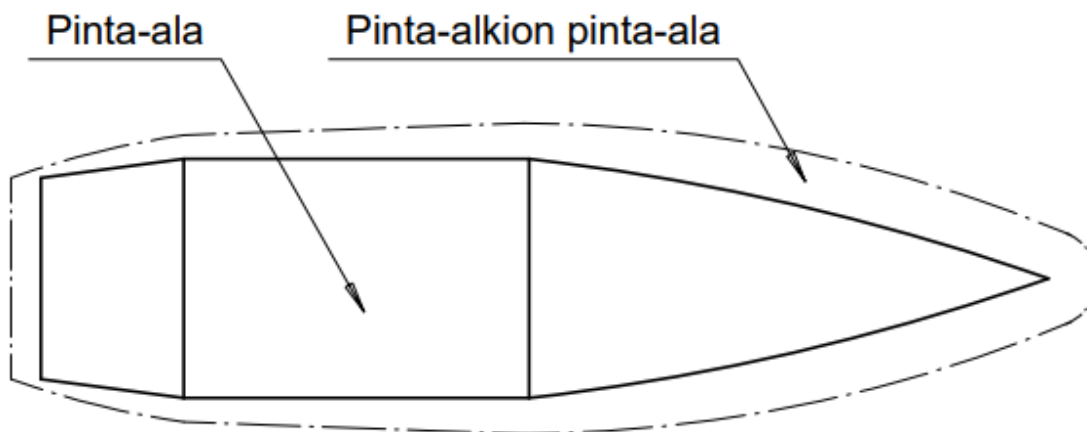
F_p = pintaa vastaan vaikuttava voima

F_τ = pinnan suuntainen voima

A_a = pinta – alkion pinta – ala

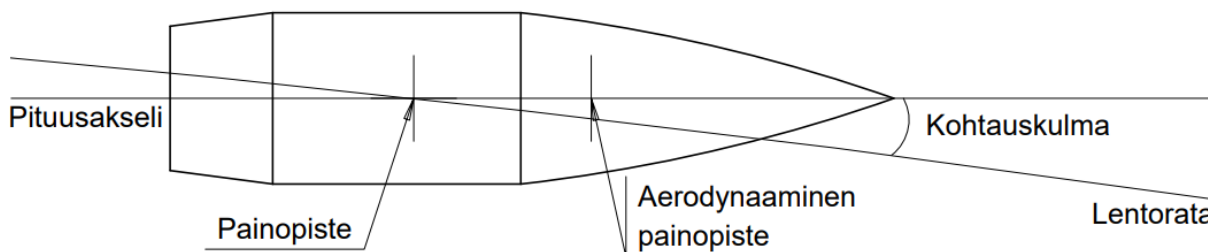
Lennon aikana kappaleen eri osat altistuvat toisistaan poikkeaville paine- ja virtauskentille. Kappaleen kärjessä paine on suurempi kuin kappaleen lieriömäisellä osalla tai kappaleen perässä.

Virtauskenttä muodostuu pääasiassa kappaleen pinnan suuntaisesti alkaen kappaleen kärjestä ja jatkuen kohti kappaleen perää (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 123). Ilman sisäisten viskositeettien takia virtauskentässä on useita kerroksia, joiden virtausnopeus toisiinsa nähden on keskenään erilainen. Kappaleen pintaan kosketuksissa olevan kerroksen ja kappaleen pinnan välinen nopeusero on nolla. Tämän pinnan yläpuolella olevaan rajakerrokseen vaikuttaa hidastavasti tämä näennäisesti liikkumaton rajakerros. Näin muodostuneen pinta-alkion pinta-alaan vaikuttaa kappaleen dimensiot, vallitseva ilmakedä ja kappaleen nopeus. Pinta-alkion pinta-ala on havainnollistettuna kuviossa 2.



Kuvio 2. Havainnekuva pinta-alkion pinta-alasta

Aerodynaamisen voiman kokonaisresultantti R voidaan muodostaa integroimalla paine- ja leikkausjännitys jakaumat koko kappaleen yli (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 123–124). Tämän kulman suuruus vaikuttaa merkittävästi kokonaisresultantin R suuruuteen.



Kuvio 3. Painopiste ja aerodynaaminen painopiste

Lentävään kappaleeseen vaikuttaa kaksi merkittävää voimaa, joista toinen on maan veto-voima, joka vaikuttaa suoraan kappaleen todelliseen painopisteeseen, ja toinen on aerodynaaminen voima, jonka suuruus määräytyy kertomalla kokonaisresultantti aerodynaamisen painopisteen ja todellisen painopisteen välisellä kohtisuoralla etäisyydellä (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 124). Merkittävin aerodynaamisen voiman

kokonaisresultantin R komponenteista on vastusvoima D. Vastusvoima D on kokonaisresultantin R nopeusvektorin suuntainen komponentti.

Vastusvoima voidaan kokonaisuutena kuvata kaavalla (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 125)

$$D = 1/2 * p * v^2 * A * C_D \quad (4)$$

Missä

p = ilman tiheys

v = kappaleen nopeus suhteessa ilmakehään

A = kappaleen poikkileikkauksen pinta – ala

C_D = vastuskerroin

Vastuskertoimet määritetään tyypillisesti tilanteissa, joissa kappaleen lennonaikainen kohtauskulma δ on nolla. Tällä tavalla määritettyä vastuskerrointa kutsutaan nollavastuskertoimeksi C_{D0} (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 125).

$$C_{D0} = C_{Dh} + C_{Db} + C_{Df} \quad (5)$$

Missä

C_{Dh} = kärjen ylipainevastus

C_{Db} = peräpainevastus

C_{Df} = pinnan kitkavastus

Käytettäessä vastuskertoimia ballististen kertoimien sijaan saadaan käyttöön kolmen eri osa-alueella vaikuttavan kertoimen summa yhden koko geometriaa käsittelevän sovituskertoimen sijaan.

2.2 Ratalaskennan historiaa

Lento-ominaisuuksiin perustuvien matemaattisten ratalaskentamallien ja varsinaisen ballistiikatutkimuksen edelläkävijänä voidaan pitää Galileo Galilein tutkimusta vapaasti putoavien kappaleiden nopeuksista (McCoy, 2012, s. 42). Galilein tutkimukset osoittivat, että tyhjiössä tapahtuvassa putoavassa liikkeessä ainoa määräävä suure on maapallon liikkuvaan kappaleeseen aiheuttama putoamiskiihtyvyys. Kappaleen massalla ja muodolla ei toisin sanoen ole lainkaan merkitystä. Tyhjiössä tapahtuvan lennon lentorata on aina paraabelin muotoinen.

Lisättäessä Galilein (McCoy, 2012, s. 42) kehittämään tyhjiömalliin Isaac Newtonin toinen laki, dynamiikan peruslaki, saadaan aikaiseksi laskentamalli, jota voidaan soveltaa lentävien kappaleiden todelliseen ratalaskentaan. Galilein tyhjiöteorian osoittaessa maapallon vetävän tasaisella kiihtyvyydellä lentävää kappaletta puoleensa Newtonin dynamiikan peruslaki osoittaa myös ulkopuolisten voimien vaikuttavan kappaleen lentorataan.

Newtonin toisen lain mukaan kappale ei voi hidastua, mikäli siihen ei vaikuta jokin ulkopuolinen voima (McCoy, 2012, s. 42). Newtonin toinen laki lentoratalaskennan näkökulmasta:

$$m \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \sum \vec{F} + m\vec{g} + m\vec{\Delta} \quad (6)$$

Missä

m = lentävän kappaleen massa

V = nopeusvektori

$\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$ = vektorikiikkyvyys

$\sum \vec{F}$ = aerodynaamisten voimien summavektori

\vec{g} = gravitaatiokiikkyvyys

$\vec{\Delta}$ = coriolisvoiman aiheuttama vektorikiikkyvyys

Luodin lento-ominaisuuksiin vaikuttavien voimien tutkimuksen edelläkävijänä voidaan pitää englantilaista Benjamin Robinsia (McCoy, 2012, s. 10). Vuonna 1740 Robins kehitti ensimmäisen ballistisen heilurin, jolla voitiin mitata kappaleen lentonopeutta eri etäisyyksille ammuttaessa. Tämä innovaatio mahdollisti kappaleeseen vaikuttavien aerodynaamisten voimien tunnistamisen ja havainnollisti aerodynaamisten voimien olevan huomattavasti suurempi lentorataan vaikuttava kokonaisuus kuin aiemmin oli oletettu.

2.3 Laskentamallien esittely

Pyörimisvakavoitujen kappaleiden lentoratojen laskentaan on kehitetty useita malleja. Yleisimmin käytössä olevat mallit hyödyntävät luodin ballistista kerrointa ja perustuvat puoliempiirisiin likiarvokaavoihin (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 128). Ballistisia kertoimia hyödyntävien laskentamallien kilpailijaksi on noussut kolmen, neljän ja kuuden vapausasteen laskentamallit. Ballistisilla kertoimilla laskettaessa luoti käsitetään aina massapisteenä, jolla ei ole varsinaisia dimensioita.

Kolmen ja neljän vapausasteen laskentamalleja kutsutaan niin sanotuiksi modifioituiksi massapistemalleiksi, joissa massapisteelle annetaan yksittäisiä dimensioita, esimerkiksi poikkipinta-ala ja massa (McCoy, 2012, s. 165). Tällaiset modifioidut massapistemallit pyrkivät ottamaan huomioon luotiin lennon aikana vaikuttavat näennäisvoimat, kuten esimer-

kiksi hyrrävoiman. Hyrrävoimien lisääminen komponenttina laskentamalliin parantaa laskennan luotettavuutta varsinkin luodin sivuttaissuuntaisia liikkeitä tarkasteltaessa (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 128).

Kehittynein laskentamalli on kuuden vapausasteen malli, jossa luotia käsitellään todellisten geometrinen muotojen perusteella (McCoy, 2012, s. 29). Tämä laskentamalli jakaa luodin hidastuvuuden komponentteihin luodin todellisen muodon ja luotiin lennon aikana vaikuttavien aerodynaamisten voimien perusteella. Lisäksi tällaisella laskentamallilla päästään huomattavasti suurempiin tarkkuuksiin luodin sivuttaissuuntaisia liikkeitä laskettaessa.

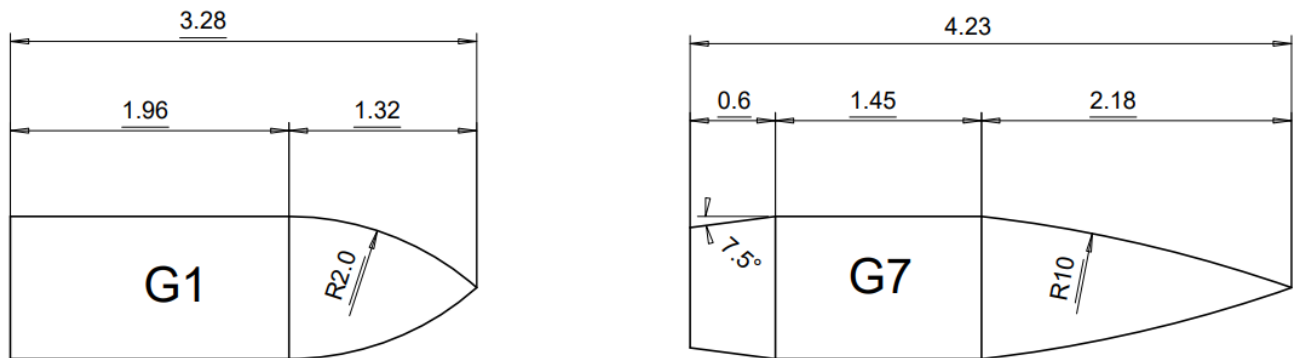
2.3.1 Vertailumenetelmä

Vertailumenetelmien pohjana voidaan käyttää Siaccin metodilla laadittuja James M. Ingallsin vuonna 1900 julkaisemia taulukoita. Ingallsin taulukot pohjautuvat Mayevski-Zabouskin vastusfunktioihin, jotka laadittiin koeammuntojen perusteella vuosina 1875–1881 Saksassa (McCoy, 2012, s. 98). Näitä Ingallsin taulukoita pidetään vertailumenetelmien standarditaulukoina. Nykyisin näistä arvoista käytetään pääasiassa taulukkoja G1 ja G7, jotka ovat havainnollistettuna taulukossa 1.

Taulukko 1. Ingalls G1- ja G7-arvot (McCoy, 2012, s. 98–112, 140).

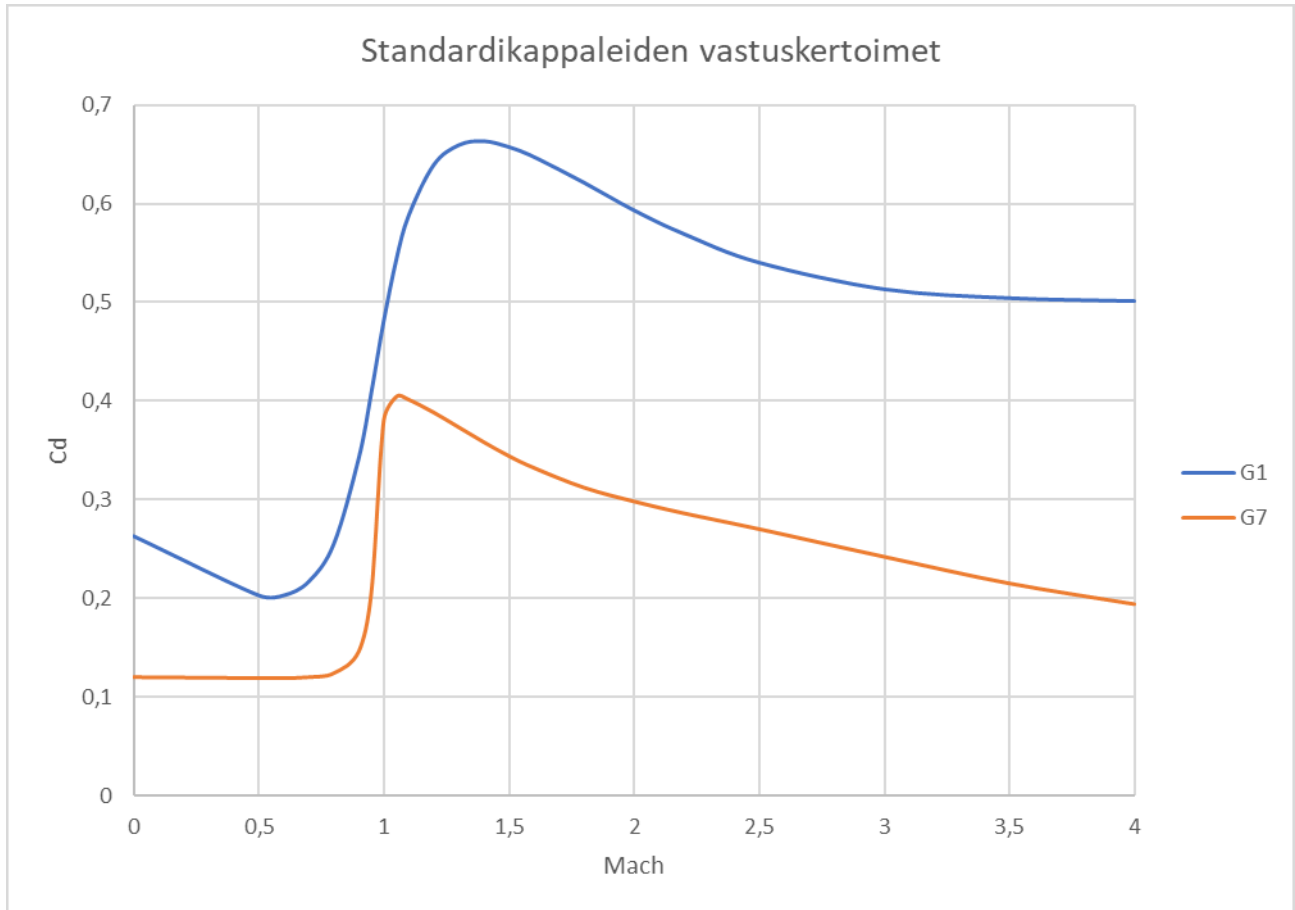
Mach	G1 [Cd]	G7 [Cd]
0,000	0,263	0,120
0,500	0,203	0,119
0,600	0,203	0,119
0,700	0,217	0,120
0,800	0,255	0,124
0,900	0,342	0,146
0,950	0,408	0,205
1,000	0,481	0,380
1,050	0,543	0,404
1,100	0,588	0,401
1,200	0,639	0,388
1,300	0,659	0,373
1,400	0,663	0,358
1,500	0,657	0,344
1,600	0,647	0,332
1,800	0,621	0,312
2,000	0,593	0,298
2,200	0,569	0,286
2,500	0,540	0,270
3,000	0,513	0,242
3,500	0,504	0,215
4,000	0,501	0,194

Ballistiset kertoimet ovat yleisimmin käytetyt määreet luodin lento-ominaisuuksia käsiteltäessä. Ballistinen kerroin on määre, jolla kuvataan luodin kykyä läpäistä vallitseva ilma-kehä. Ballistiseen kertoimeen vaikuttaa luodin paino, poikkipinta-ala ja muotokerroin.



Kuvio 4. G1- ja G7-standardikappaleiden geometriat

Ballististen kertoimien standardikappaleiden vastuskertoimet on määritetty Ingallsin toimesta. Standardikappaleiden vastuskuvaajia on määritetty kahdeksalle erimuotoiselle kappaleelle, joista laskentaan pääsääntöisesti käytetään G1- ja G7-standardien mukaisia kappaleita (McCoy, 2012, s. 98–112, 140). Kuviossa 5 on kuvattuna G1- ja G7-standardikappaleiden vastuskertoimet Machin luvun suhteen.



Kuvio 5. Standardikappaleiden vastuskertoimet

Muotokerroin on puoliempiirisin keinoin määritetty yksikötön suure, jonka olemassaolo perustuu käytössä oleviin standardikappaleisiin G1 ja G7. Muotokerroin on määritettävissä kaavalla (Litz, 2011, s. 564)

$$i = \frac{C_d}{C_{d_{St}}} \quad (7)$$

Missä

i = luodin muotokerroin [yksikötön]

C_d = kappaleen vastuskerroin määrättyssä nopeudessa

$C_{d_{St}}$ = Standardikappaleen vastuskerroin, samassa nopeudessa

Vertailumenetelmiä käytettäessä laskenta perustuu hyvin usein Siaccin kehittämään menetelmään. Siaccin menetelmä laskeekin luotien lentoratoja kohtalaisen luotettavasti nopeusalueilla 1,5–2,5 Mach. Menetelmän heikkoutena voidaan kuitenkin pitää seuraavia

seikkoja: Ensinnäkin luodin lento-ominaisuuksia verrataan pääsääntöisesti yhdellä sovitus-kertoimella standardikappaleen lento-ominaisuuksiin (McCoy, 2012, s. 98). Toiseksi kyseinen menetelmä on kehitetty laskemaan horisontaalisia lentoratoja.

2.3.2 Kehittyneemmät laskentamallit

Tietokoneiden ja laskenta-alustojen kehittyminen mahdollisti monimutkaisempien laskentamallien todellisen hyödyntämisen (McCoy, 2012, s. 187). Ensimmäinen varsinainen moderni laskentamalli oli modifioitu massapistemalli, joka kehitettiin vuonna 1966. Modifioitu massapistemalli käsittelee lentävää kappaletta pisteenä, jolle on lähtötilanteessa laadittu liikkeen differentiaalivektoriyhtälöt massapisteen suhteen. Modifioitu massapistemalli onkin käytännössä ensimmäinen laskentamalli, jolla voidaan arvioida lentävän kappaleen lentorataan vaikuttavia asentomuutoksia. Modifioitu massapistemalli kehitettiin kuuden vapausasteen laskentamallin kevyemmäksi versioksi, jonka käsittely 1960-luvun tietokoneilla oli ajallisesti järkevää.

Kuuden vapausasteen malli, 6-DoF, on laskentamalli, joka pyrkii selvittämään kappaleen asennon ja paikan ottaen huomioon kaikki kappaleeseen vaikuttavat sisäiset ja ulkoiset voimat (McCoy, 2012, s. 187). Kuuden vapausasteen laskentamallia käytettäessä luotien lento-ominaisuuksien arviointiin sekä ratalaskentaan tarvitaan kappaleen vastuskertoimista ja geometrisista dimensioista mahdollisimman todenmukainen tieto.

Kuuden vapausasteen laskentamallissa tarvittavat laskentakomponentit ovat esitettynä kuviossa 6. Kuuden vapausasteen laskentamallin matemaattista kaavaa voidaan kuvata kaavalla (McCoy, 2012, s. 187–188)

$$m \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \sum \vec{F} + m \vec{g} + m \vec{\Delta} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta \vec{H}}{\Delta t} = \sum \vec{M}$$

Missä

m = lentävän kappaleen massa

V = nopeusvektori

$\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$ = vektorikiikkyvyys

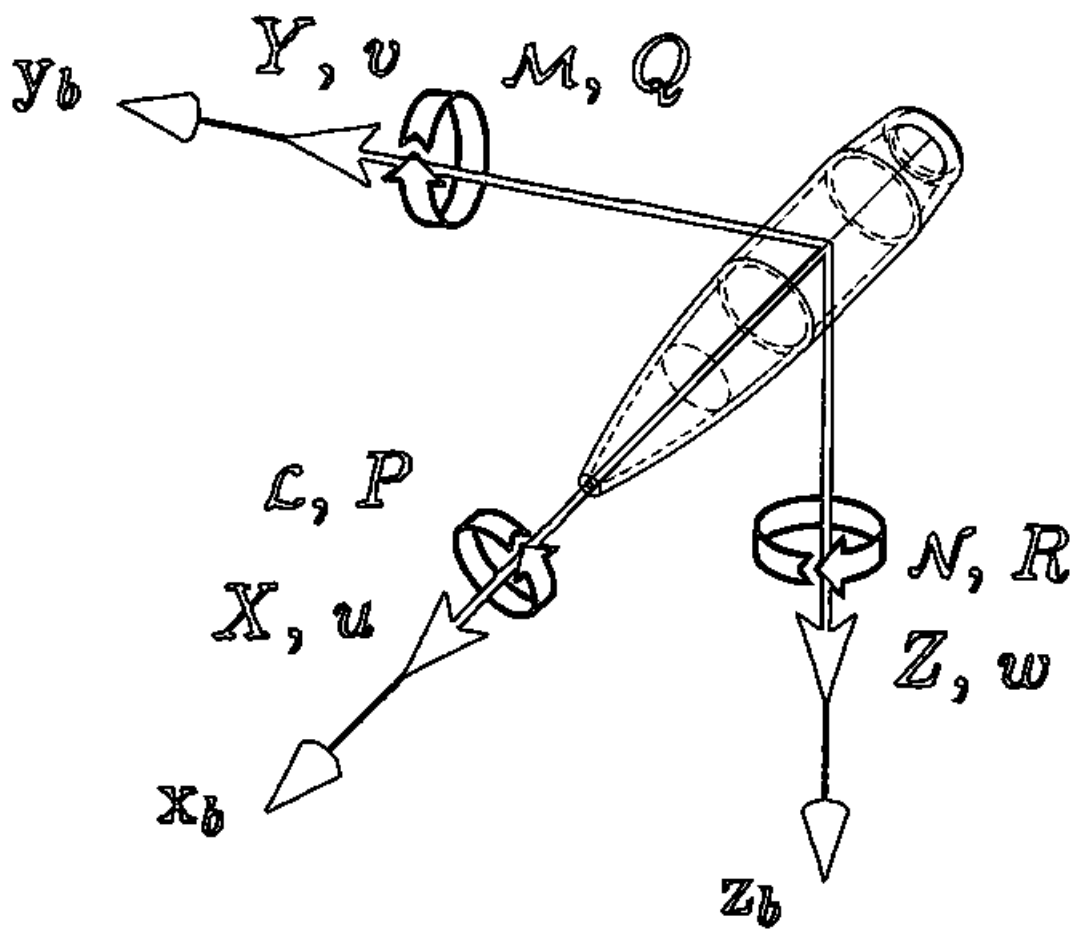
$\sum \vec{F}$ = aerodynaamisten voimien vektorisumma

\vec{g} = gravitaatiokiikkyvyys

$\vec{\Delta}$ = coriolisvoiman aiheuttama vektorikiikkyvyys

\vec{H} = kappaleeseen kohdistuvien kulmamomenttien vektori

$\sum \vec{M}$ = aerodynaamisten momenttien vektorisumma



Kuvio 6. Kuuden vapausasteen laskentamallin komponentit (sisäinen tietolähde i.a.)

2.4 Lento-ominaisuuksien todentaminen

Lento-ominaisuuksien arviointiin ja todentamiseen on vuosien aikana kehitetty useita erilaisia menetelmiä. Nykyisinkin yksinkertaisin menetelmä perustuu osittain Benjamin Robinsin ideaan ballistisesta heilurista (McCoy, 2012, s. 10). Lentonopeuksia eri mittausetäisyyksiltä voidaan kehittyneemmän teknologian ansiosta mitata valoon tai ääneen perustuvilla menetelmillä. Ääneen perustuvien menetelmien reunaehtona on, että mittaukset tulee suorittaa lentoradan sellaisista pisteistä, joissa lentonopeus on suurempi kuin 1 Mach. Tämä johtuu menetelmien pohjautumisesta Machin kartioon ja siitä mitattaviin suureisiin. Kahdesta tai useammasta lentoradan varrella sijaitsevasta pisteestä suoritettuja mittauksia täytyy käytännössä aina verrata Ingallsin taulukoihin ja muodostaa mittaustulosten perusteella kappaleelle ballistinen kerroin.

Kehittyneimmät mittausvälineet perustuvat kappaleen nopeuden muutoksiin mahdollisimman pitkällä mittausalueella ja mahdollisimman suurella näytemäärällä (Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001, s. 128). Tällaisista mittauksista vakiintunein käytäntö perustuu Dopplerin ilmiöön pohjautuvaan mittausjärjestelmään. Dopplerin ilmiöön perustuvat tutkamittaukset ovat käytännössä tämänhetkisistä menetelmistä ainoa, jolla yksittäiselle luotityypille saadaan muodostettua mahdollisimman todenmukainen ja standarditaulukoista riippumaton vastuskerrointaulukko.

Ilmavirran käyttäytymistä luodin pinnalla voidaan tutkia myös tuulitunnelikokein, mutta tämän menetelmän heikkoutena on kappaleen staattisuus mittaustapahtuman aikana ja kappaleen kiinnittämisestä johtuvat virtauskenttää häiritsevät komponentit (US Army Research Laboratory, 2008, s. 3). Omat haasteensa tuulitunnelikokeisiin tuottaa myös kappaleen pintatekstuurin muuttuminen piippuvaiheen aikana.

3 VIRTAUSLASKENTA

Tietokoneavusteinen virtauslaskenta, CFD, on menetelmä, jolla fysikaalisia virtauksia pyritään selvittämään matemaattisin keinoin (SimScale i.a.). CFD:n ideologia perustuu mahdollisuuteen optimoida suunnittelutyötä vähentämällä valmistettavien prototyyppien määrää. Tietokoneavusteisessa virtauslaskennassa laskentatapahtumat suoritetaan huomioiden käyttötilanteessa mahdollisesti vaikuttavat fysikaaliset suureet, kuten esimerkiksi nopeus, paine, lämpötila, viskositeetti ja tiheys.

3.1 Virtauslaskennan teoriaa

SimScalen tietopakettissa tietokoneavusteisesta virtauslaskennasta mainitaan lähes kaikkien virtauslaskentaohjelmistojen hyödyntävän Navier-Stokes-yhtälöihin perustuvia ratkaisumalleja (SimScale i.a.). Piipponen (2019) esittelee Navier-Stokes-yhtälöitä matemaattisemmin ja tarjoaa kattavan kokonaisuuden hydrodynamiikan teorioista.

Seppo Laine (2013, s. 3) tarkentaa esitelmässään, ettei tietokoneavusteinen virtauslaskenta ole pelkästään Navier-Stokesin yhtälöiden numeerista ratkaisua ja yhdistämistä muihin laskentatilanteeseen määritettyihin parametreihin. Numeeristen ratkaisujen lisäksi oikeiden johtopäätösten tekemiseen tietokoneavusteisen virtauslaskennan tuloksista tarvitaan kokemusta myös virtausmekaniikasta.

Artturi Karjalaisen (2021, s. 1–11) kandidaatintyön mukaan nykyaikaiset virtauslaskentaohjelmistot onkin rakennettu huomioimaan käyttäjän kohtaamat ongelmatilanteet mahdollisimman monipuolisesti, ja tämän vuoksi laskenta- ja turbulenssimallit kehittyvät koko ajan monipuolisemmiksi.

3.2 Käytettävät turbulenssimallit

Tietokoneavusteisen virtauslaskennan viitekehyksessä on käytettävissä useita eri soveluksiin soveltuvia turbulenssimalleja. Turbulenssimalli tulee valita virtauslaskennasta toi-

vottujen tulosten mukaiseksi. Opinnäytetyössä käytettävän turbulenssimallin valintaa pohdittiin Karjalaisen (2021) kandidaatintutkielman ja Shawn Wessermanin (2016) artikkelin pohjalta.

Tutkimuksen aikana suoritettiin virtauslaskentaa kolmella turbulenssimallilla. Nämä mallit olivat K-Epsilon, K-Omega SST ja Large Eddy Simulation. K-Epsilon on turbulenttisen virtauksen yleisesti käytetty laskentamalli. K-Epsilonin ei kuitenkaan ole paras laskentamalli tapauksiin, joissa ratkaistaan monimutkaisia kaarevia virtauksia. K-Omega SST on K-Epsilon-mallin ohella yksi käytetyimmistä turbulenssimalleista. K-Omega SST -mallin hyötyinä voidaan pitää laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen rajapinnan mukaan muuttuvaa laskentamallia (SimScale i.a.). Large Eddy Simulation, LES, on laskentamalli, jossa virtauksessa esiintyy kolmen eri kokoluokan pyörteilyä suurimpien pyörteiden ollessa suuruusluokaltaan yhteneviä tarkasteltavan geometrian pituuden kanssa ja pienimpien pyörteiden määräytyessä laskentatapahtuman viskositeetin mukaan (Laine, 2013, s. 36–45). Opinnäytetyötä tehtäessä pääasiallisesti käytössä oli K-Omega SST -turbulenssimalli sen riittävän kyvykkyyden vuoksi.

3.3 Tavoitellut ominaisuudet

Tämän opinnäytetyön viitekehykset huomioiden tarkoituksena on selvittää, voidaanko tietokoneavusteista virtauslaskentaa hyödyntää pyörähdyssymmetristen geometrioiden suunnittelussa. Parhaassa tapauksessa virtauslaskentaa voidaan hyödyntää jopa geometrioiden pienten yksityiskohtien suunnittelussa.

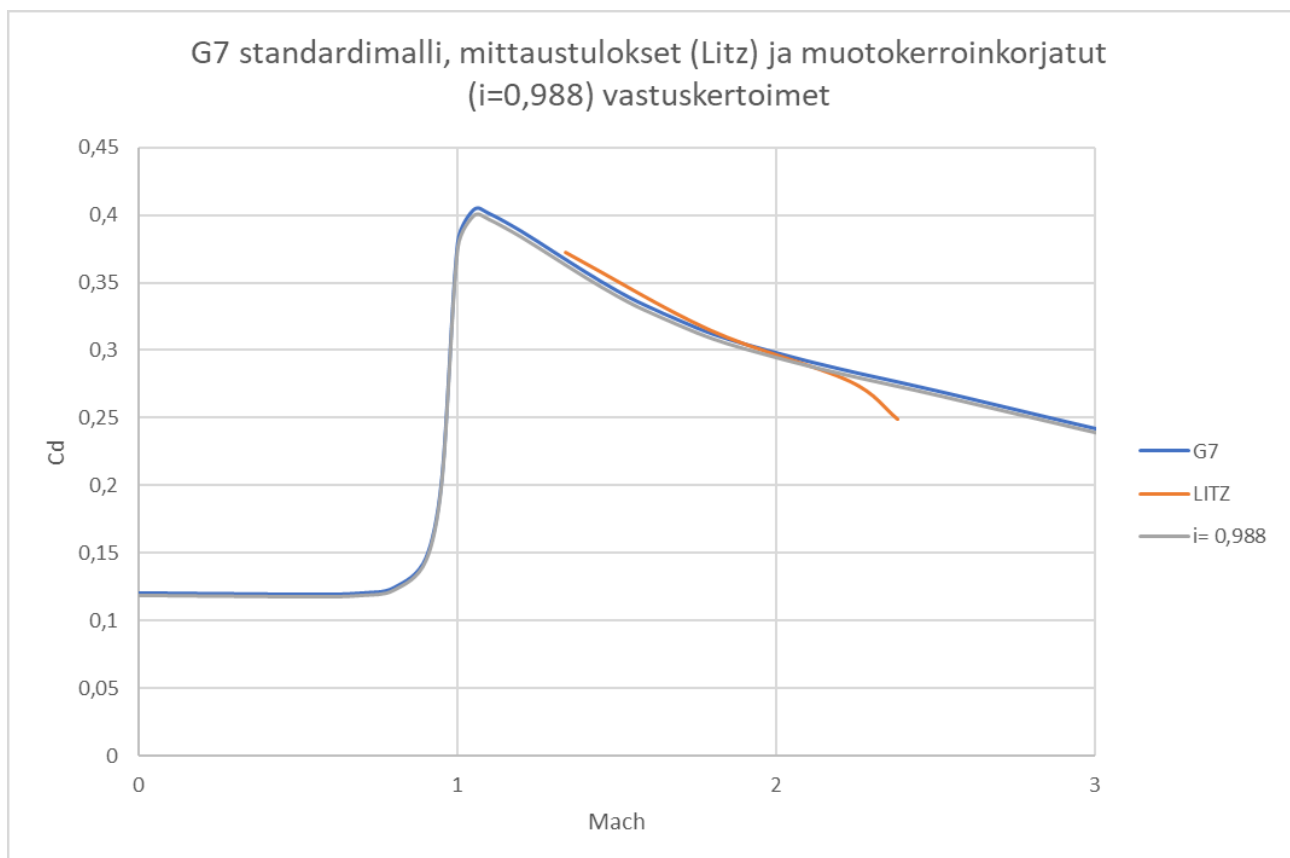
Tietokoneavusteisen virtauslaskennan toimivuutta suunniteltuun toimintaympäristöön arvioidaan vertailemalla standardikappaleiden laskentatuloksia Ingalls-taulukoihin. Standardista poikkeavien kappaleiden kohdalla laskentatuloksia vertaillaan esiteltyihin laskentamalleihin ja julkaistuihin mittaustuloksiin.

3.3.1 Kytkentä standardikappaleiden geometrioihin

Tietokoneavusteisella virtauslaskennalla tuotettujen nollavastuskertoimien oikeellisuutta voidaan arvioida tekemällä vertailuja standardikappaleiden taulukkoarvojen ja standardikappaleiden geometrioihin perustuvien virtauslaskentatulosten välillä. Standardikappaleina käytetään G1- ja G7-standardikappaleiden mukaisia geometrioita.

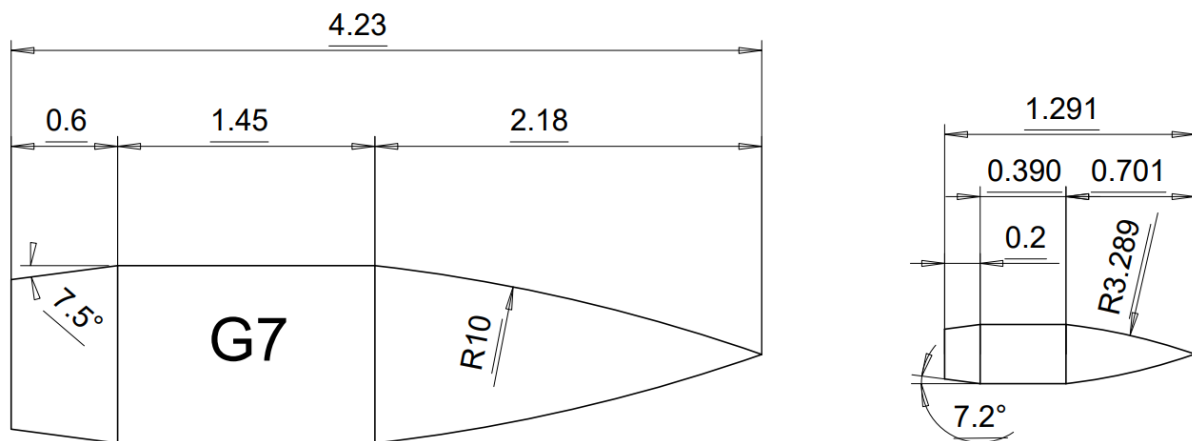
3.3.2 Kytkentä standardikappaleista poikkeaviin geometrioihin

Standardikappaleista poikkeavien kappaleiden kohdalla vastaava vertailu voidaan suorittaa Litzin (2011, s. 564) esittelemää muotokerroinmenetelmää hyödyntäen. Litzin (mts. 527) mukaan Nammo Lapua Oy:n valmistaman 10,0 g Scenar^L-luodin vastuskertoimet olisivat vertailumenetelmän mukaan kuvion 7 mukaiset.



Kuvio 7. Litzin mittauksiin perustuvat vastuskertoimet

Litz toteaa kyseisen luodin Ingalls G7-*taulukon* mukaisen muotokertoimen olevan keskimäärin 0,988 (Litz, 2011, s. 527). Samassa teoksessa julkaistujen dimensioiden perusteella voidaan todeta, että kyseinen luoti onkin mittasuhteiltaan hyvin tarkasti G7-standardikappaleen muotoinen mittakaavassa 1:3. Mittapiirrokset kyseisistä kappaleista ovat kuviossa 8 (Litz, 2011, s. 527 ja McCoy, 2012, s. 140)



Kuvio 8. G7-standardikappaleen ja 10,0 g Lapua Scenar^L-luodin geometriat (Litz, 2011, s. 527; McCoy, 2012, s. 140)

Keskiarvotetulla tarkastelulla ja Litzin (2011, s. 527) pistemäisesti suorittamien mittauksien perusteella kuviossa 7 on havaittavissa, että nopeusalueilla 1,3–2,2 Mach kuvaajat noudattelevat hyvin standardikappaleen kuvaajaa. Nopeusalueilla 2,2–2,7 Mach mitaustulokset taas poikkeavat huomattavasti keskiarvotetuista laskentatuloksista ja Ingalls G7-standarditaulukon mukaisista taulukkoarvoista.

4 VIRTAUSLASKENTA-OHJELMISTOJEN ARVIOINTI

Tässä luvussa esitellään kaksi opinnäytetyön yhteydessä kokeiltua virtauslaskentaohjelmistoa ja ohjelmistoissa käytettyjä laskentamalleja sekä verrataan laskentatuloksia G1- ja G7-standardikappaleisiin. Opinnäytetyössä käytettävät tietokoneavusteiseen virtauslaskentaan soveltuvat ohjelmistot valikoituivat opinnäytetyön tilanteen yrityksen toimintapolitiikan mukaisesti. Yrityksen toimintapolitiikka velvoitti käyttämään vain kaupallisesti saatavia, tunnettujen toimittajien tarjoamia ohjelmistoja.

4.1 Virtauslaskentaohjelmistojen soveltuvuuden arviointi

Virtauslaskennan soveltuvuuden arviointi suunniteltuun käyttötarkoitukseen aloitettiin määrittämällä virtauslaskentatulokset nollavastuskertoimille G1-standardikappaleen mukaisesta kolmiulotteisesta geometriasta. Arvioinnin seuraavassa vaiheessa vastaava menettely toistettiin G7-standardikappaleen mukaiselle geometrialle.

Virtauslaskennalla G1- ja G7-standardikappaleista määritettyjä tuloksia verrattiin pistemäisten laskentatulosten pohjalta, joista koostettiin vastuskäyrät. Pistemäisiksi nopeusalueiksi valittiin pisteet 1,5 ja 2,0 sekä 2,5 Mach. Kyseisillä nopeusalueilla standardikappaleiden vastuskertoimet poikkeavat toisistaan siten, että vastuskerroin kasvaa noin 10–15 % nopeusalueen pienenytessä 0,5 Mach. Pistemäisillä vertailuilla voidaan näin ollen määrittää kohtalaisen luotettavasti, riittääkö tietokoneavusteisen virtauslaskennan tarkkuus aiottuun käyttötarkoitukseen. Kyseisiltä nopeusalueilta on saatavilla kattava määrä valmistetuista kappaleista määritettyjä mittaustuloksia, joihin tietokoneavusteisella virtauslaskennalla määritettyjä arvoja voidaan opinnäytetyön myöhemmissä vaiheissa verrata.

Nopeusalueet 1,5 Mach hitaammilla nopeusalueilla jätettiin tarkoituksellisesti virtauslaskennan soveltuvuuden arvioinnin ulkopuolelle kappaleen pinnalla vaihtelevien virtauskenttien takia. 1,5 Mach hitaammilla nopeusalueilla kappaleen pinnalla vaikuttavat virtauskentät vaihtelevat aliäänisestä yliääniseen, joten virtauslaskentatulosten vertaaminen määritettyihin mittaustuloksiin on äärimmäisen haastavaa.

4.2 Solid Edge Simcenter FloEFD

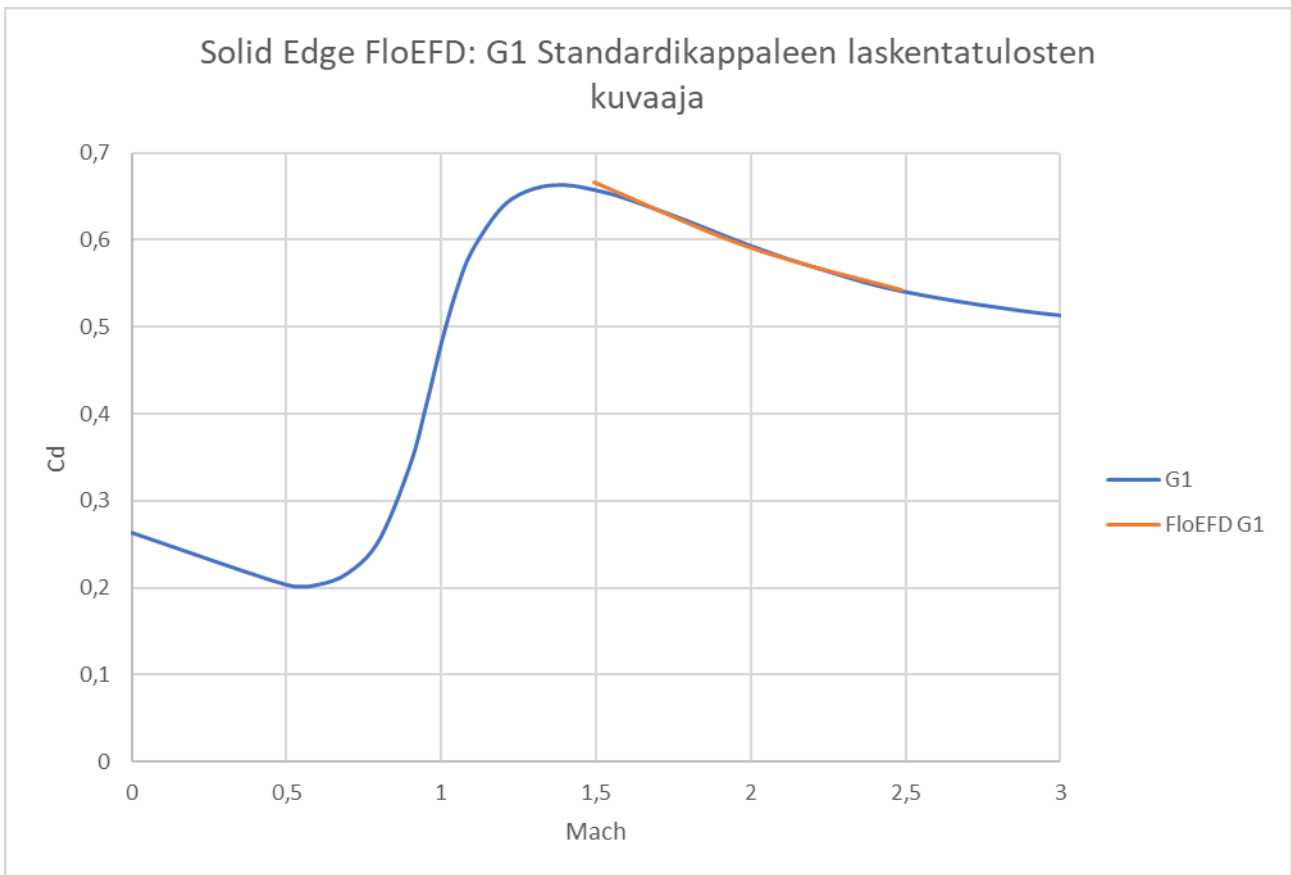
Siemensin Solid Edge -ohjelmiston Simcenter FloEFD -opiskelijaversiossa virtauslaskentatapahtumat tuottivat vain kappaleeseen vaikuttavat kokonaisvoimat ja akselien suuntaiset vektorivoimat. Virtauslaskentatapahtumien tuloksista on määritetty saatujen voimien ja virtausnopeuksien perusteella vastuskertoimet. Määrittämissä on käytetty Newtonin toisen lain eli dynamiikan peruslain kaavaa (1).

Solid Edge -ohjelmistoon on saatavilla FloEFD-lisäosa, jolla voidaan suorittaa virtauslaskentaa. FloEFD-lisäosa toimii siis Solid Edge -ohjelmiston sisällä. Solid Edge FloEFD -ohjelmisto on tarkoitettu pääasiassa suunnitteluohjelmistoksi. Tällainen ratkaisu on toimiva, kun laskettavan kappaleen geometriaa tai virtauslaskennassa käytettävää laskentaverkkoa halutaan hienosäätää virtauslaskennan yhteydessä.

Negatiivisena asiana Solid Edge FloEFD -ohjelmistolla tehdyssä virtauslaskennassa havaittiin automatisoitujen laskentatapahtumien tarkkuuden riittämättömyys kappaleilla, joiden geometrian suurin halkaisija ei ulotu kappaleen perään asti (Siemens, i.a.). Tällaisesta kappaleesta hyvänä esimerkkinä toimii G7-standardikappale. Tämä ilmiö saattaa osaltaan selittää G7-standardikappaleen geometriasta saatuja virtauslaskentatuloksia (kuvio 10).

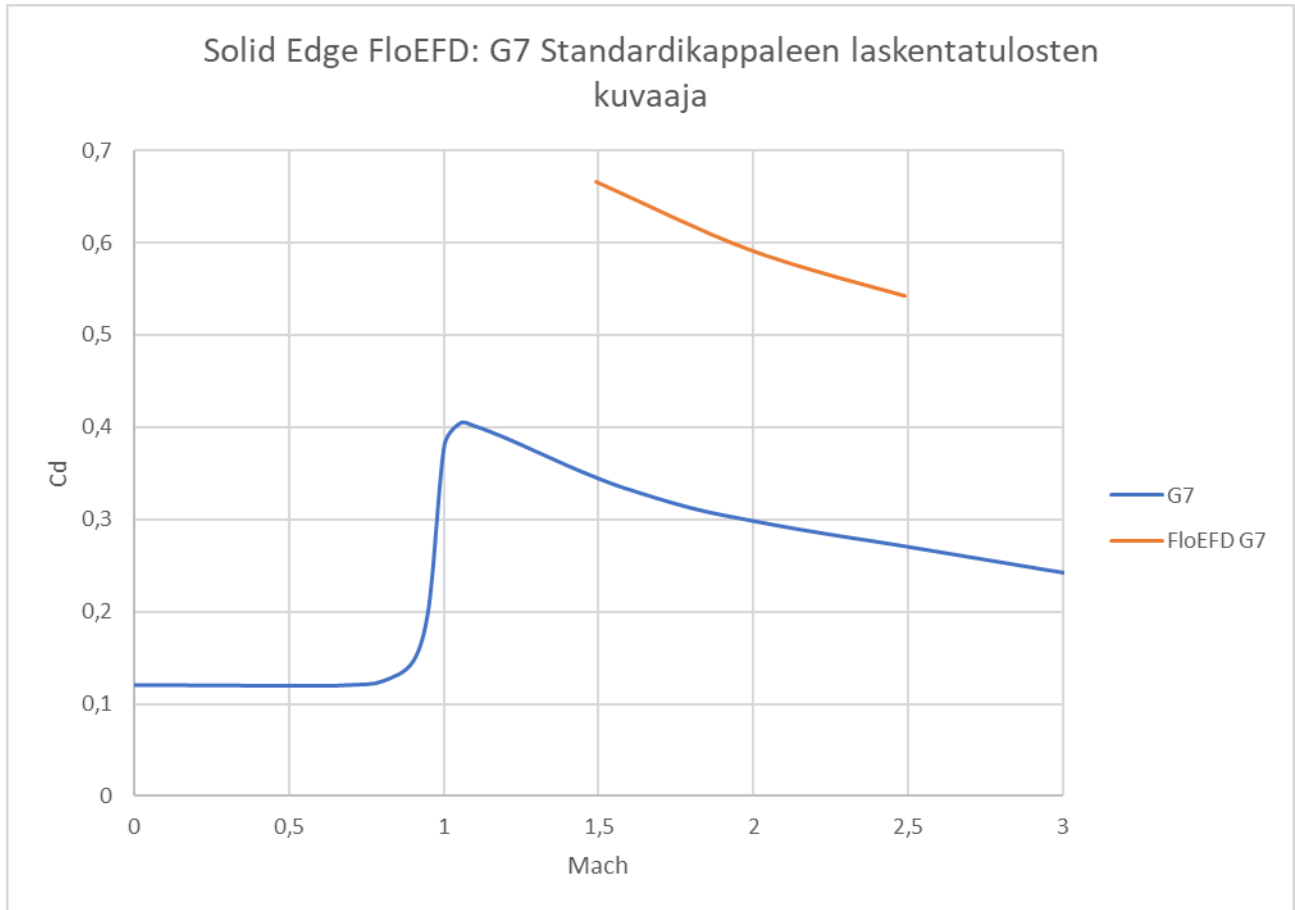
4.2.1 Solid Edge FloEFD virtauslaskentatulokset standardikappaleella

Solid Edge FloEFD -ohjelmistolla saadut tulokset nopeusalueilla 1,5–2,5 Mach olivat G1-kappaleella hyvin lähellä standardikappaleen taulukkoarvoja. Solid Edge FloEFD:in virtauslaskentatulosten vertailu G1-standardikuvaajaan on esitetty kuviossa 9.



Kuvio 9. Solid Edge FloEFD -ohjelmiston G1-virtauslaskentatulokset verrattuna G1-standardikappaleeseen

G7-standardikappaleella vastuskertoimet poikkesivat huomattavasti standardikappaleen arvoista. Tämä ilmiö selittyy todennäköisesti virtauskentän parametreista tai ohjelmiston käyttämästä turbulenssimallista. Vertailtaessa kuviossa 9 ja kuviossa 10 esitettyjä laskennallisia vastuskertoimia voidaan todeta laskennallisten vastuskertoimien olevan lähes samansuuruisia. Tulokset saattavat selittyä sillä, että suurin osa virtauksesta irtoaa kappaleesta jo peräkartion ja lieriömäisen osan leikkauksessa aiheuttaen huomattavan suuren peräpainevastuksen.



Kuvio 10. Solid Edge FloEFD -ohjelmiston G7-virtauslaskentatulokset verrattuna G7-standardikappaleeseen

4.3 Ansys-ohjelmistoympäristö

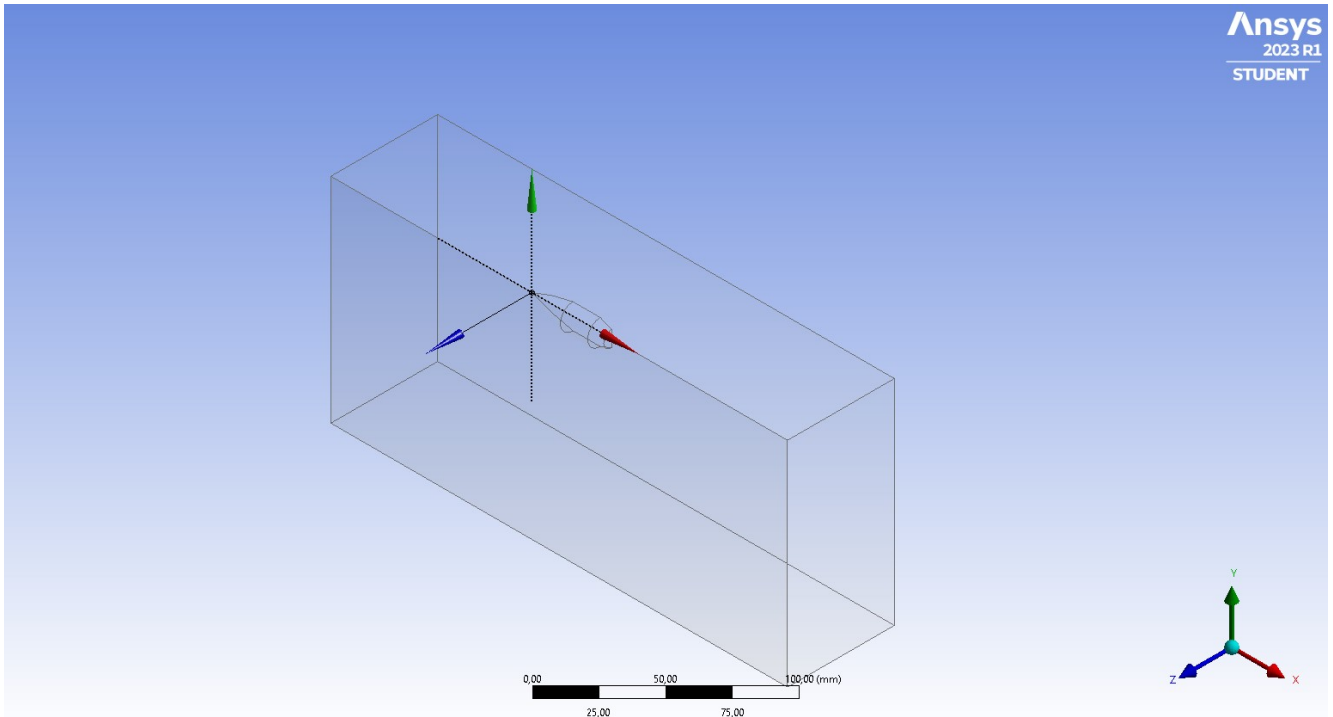
Ansys on ohjelmistoympäristönä monipuolinen kokonaisuus, ja se on suunniteltu pääasiassa simulaatioita varten. Toisin kuin Solid Edge -ohjelmistoympäristössä, Ansys-ohjelmistoympäristössä laskentageometria, hilaverkkojen määrittäminen ja varsinainen virtauslaskenta suoritetaan ohjelmistoympäristön eri ohjelmilla, joita voidaan hallita Ansys Workbench -ohjelmiston kautta. Tällä tavalla toimiessa virtauslaskennan kaikki yksittäiset vaiheet on käyvä läpi oikeassa järjestyksessä. Workbench-ohjelmistoa käytettäessä Ansys-ohjelmistoympäristön eri ohjelmistot tallentavat tiedoston aina automaattisesti oikeaan tiedostomuotoon ja näin ollen työn eteneminen on sujuvaa, vaikka käytetäänkin useita eri ohjelmistoja.

Ansys-virtauslaskentaohjelmistoympäristössä on tarjolla eri metodeihin perustuvia virtauslaskentamalleja. Tämän opinnäytetyön yhteydessä virtauslaskentaohjelmiston soveltuvuutta aiottuun käyttötarkoitukseen tutkittiin Ansys CFX- ja Ansys Fluent -ohjelmistoilla. Ohjelmistojen valintaan vaikutti ohjelmistovalmistajan lupaus virtauslaskentaohjelmistojen kyvykkyydestä jopa hypersoonisilla virtauksilla (Ansys CFX, i.a ja Ansys Fluent, i.a).

4.4 Ansys-virtauslaskentaverkoston määrittäminen

Ansys-ohjelmistoympäristössä virtauslaskentaketään laskentaverkosto määritetään ohjelmistokokonaisuuteen kuuluvalla CFD PrePost -ohjelmistolla. Virtauslaskentaverkoston määrittämisen yhteydessä voidaan laskentaketään osille määrittää haluttuja parametreja, jotka aktivoituvat automaattisesti siirryttäessä varsinaiseen virtauslaskentaan.

Ansys-ohjelmistoympäristön opiskelijaversio rajoitusten takia virtauslaskenta suoritettiin laskentaverkostossa, joka oli määritetty suorakaiteen muotoiseksi. Kuviossa 11 on Ansys-ohjelmistoympäristön näkymä virtauslaskentaketään määrittämisvaiheessa.



Kuvio 11. Ansys-ohjelmistonäkymä virtauslaskentakentän määrittelyvaiheessa

4.5 Ansys CFX ja Ansys Fluent

Tämän opinnäytetyön aikana suoritettiin virtauslaskentaa Ansys CFX- ja Ansys Fluent -ohjelmistoilla. Tutkimuksen pääpaino pidettiin Ansys Fluent -ohjelmistossa Fluentin teoreettisesti paremman laskentatarkkuuden takia.

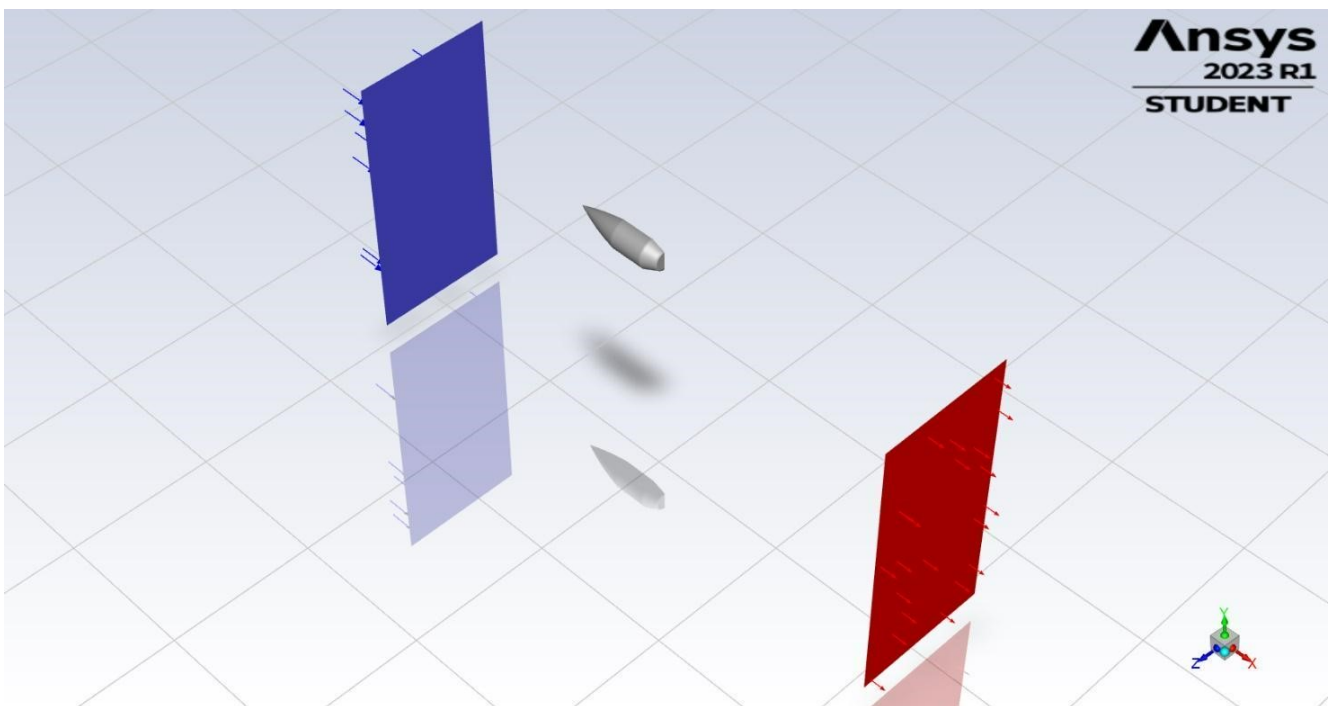
Acharya (2016) on tutkinut Ansys-virtauslaskentaohjelmistokokoneisuudesta löytyvien CFX- ja Fluent-ohjelmistojen eroavaisuuksia. Acharya (2016, s. 14) esittää Ansys CFX -ohjelmistossa laskennan perustuvan laskentaverkon solmupisteisiin ja Fluent-ohjelmiston hyödyntävän solukeskeistä laskentamenetelmää. Solukeskeinen laskentamenetelmä vaatii huomattavasti enemmän laskentatehoa kuin solmukeskeinen laskenta.

Laskentaverkkojen rakenteellisten erojen takia Ansys suosittelee käyttämään CFX-ohjelmistoa muun muassa turboahtimien virtauslaskennoissa (Ansys CFX, i.a.). Fluent-ohjelmiston käyttöä suositellaan muun muassa lentomekaniikkaa sivuavien virtauslaskentapahtumien arviointiin (Ansys Fluent, i.a.). Ohjelmistovalmistajan suositusten perusteella tämän opinnäytetyön yhteydessä tutkittiin pääasiassa Ansys Fluent -ohjelmiston soveltuvuutta pyörähdyksivakavoitujen kappaleiden tietokoneavusteiseen virtauslaskentaan.

4.5.1 Ansys Fluent -ohjelmiston parametrit

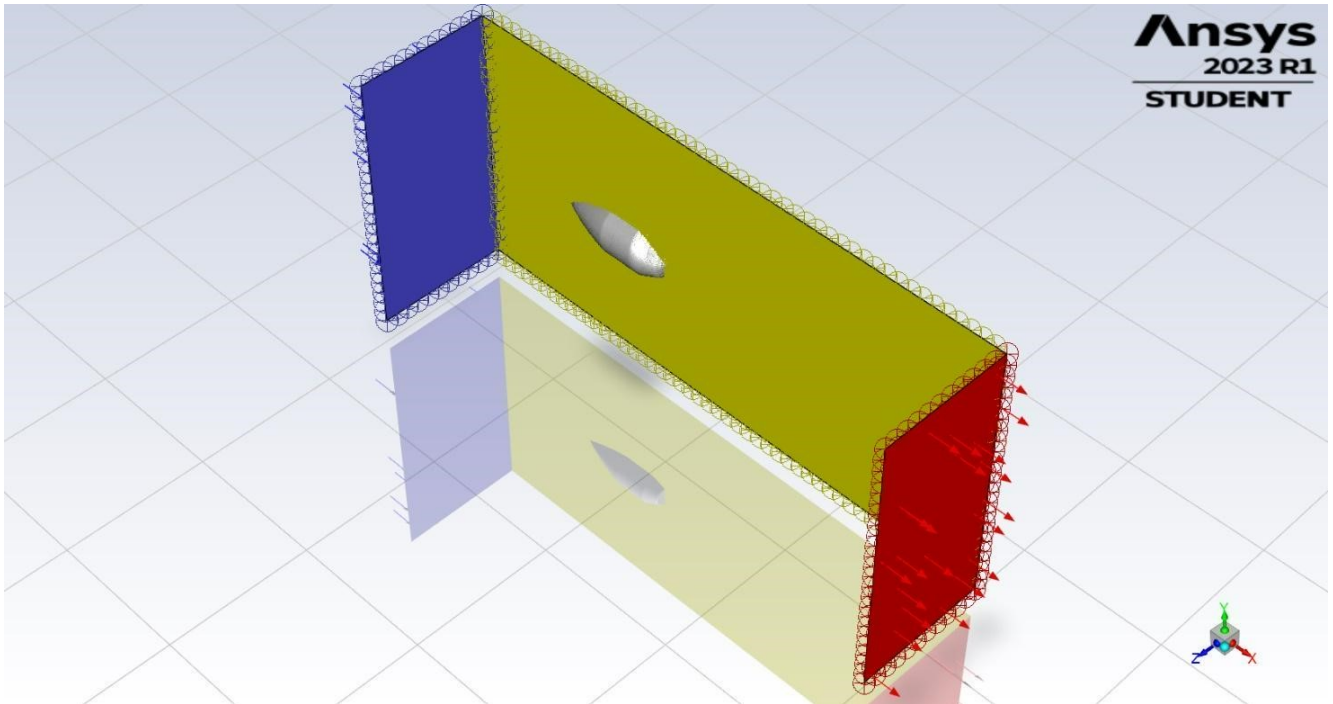
Ansys Fluent -virtauslaskentaohjelmiston opiskelijaversioon on asetettu muutamia rajoituksia. Konkreettisimmin nämä rajoitukset tulevat esiin laskentaan käytettävän laskentakapasiteetin ja laskentaverkon solujen yhteydessä. Laskentakapasiteettia on rajoitettu siten, että laskentaan voi käyttää lokaalin laskenta-aseman prosessorista ainoastaan ydintä. Laskentaverkon solujen määrä taas on rajoitettu 512 000 kappaleeseen.

Yllä mainittujen rajoitusten vuoksi tässä opinnäytetyössä laskentaa suoritettiin pääasiassa pituusakselin suuntaisesti symmetrisesti leikatuille kappaleille. Esimerkki G7-standardikappaleen laskentanäkymästä Ansys Fluent -ympäristössä on kuviossa 12.



Kuvio 12. Ansys Fluent G7

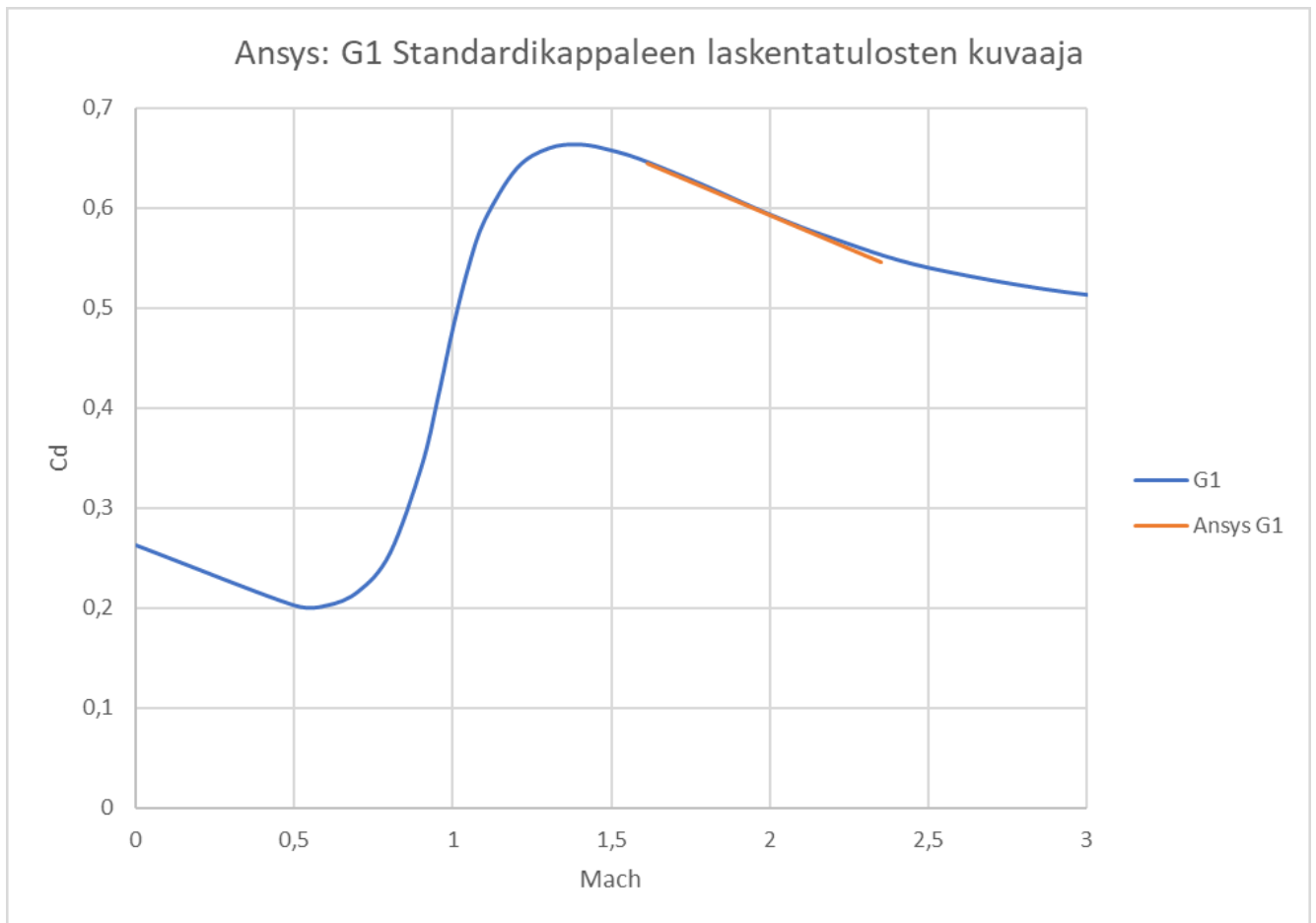
Laskentaverkon solumäärärajoituksen takia laskentaverkot laadittiin siten, että soluverkon kooltaan pienimmät solut sijoitettiin tutkittavan geometrian kärki- ja lieriömäisille muodoille. Kappaleen perään ja fluidin virtauskenttään jäävät isommat solut ovat havainnollistettuna kuviossa 13.



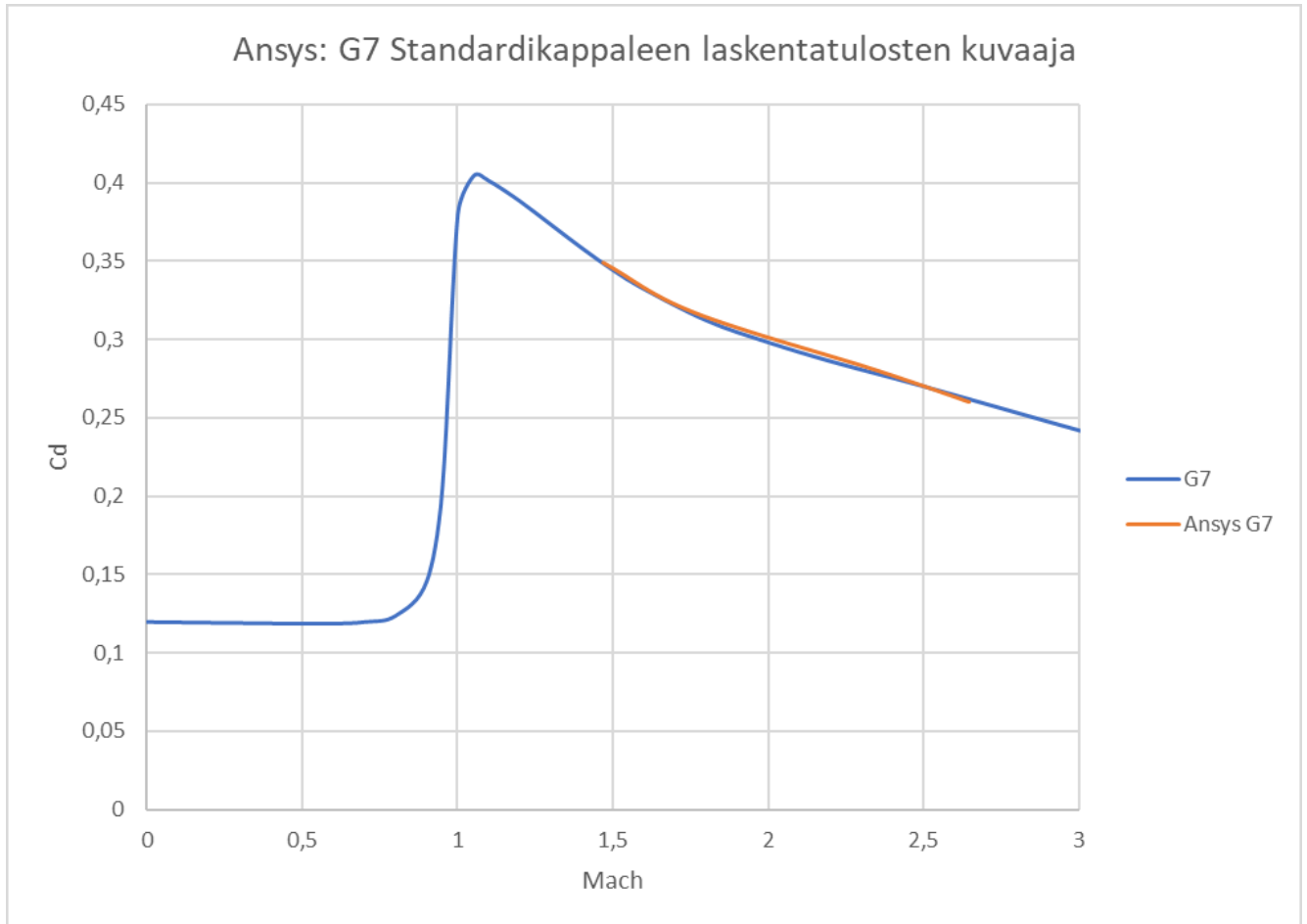
Kuvio 13. Laskentaverkon solukokojen jakauma geometrian pinnalla

4.5.2 Ansys Fluent -ohjelmiston virtauslaskentatulokset standardikappaleilla

Ansys Fluent -laskentaohjelmistolla saadut tulokset olivat todella lähellä standardikappaleista määritettyjä tuloksia. Laskentatulosten perusteella laaditut kuvaajat G1- ja G7-standardikappalevertailuista ovat esitettyinä kuvioissa 14 ja 15.



Kuvio 14. Ansys-ohjelmistoympäristön G1-virtauslaskentatulokset verrattuna G1-standardiin



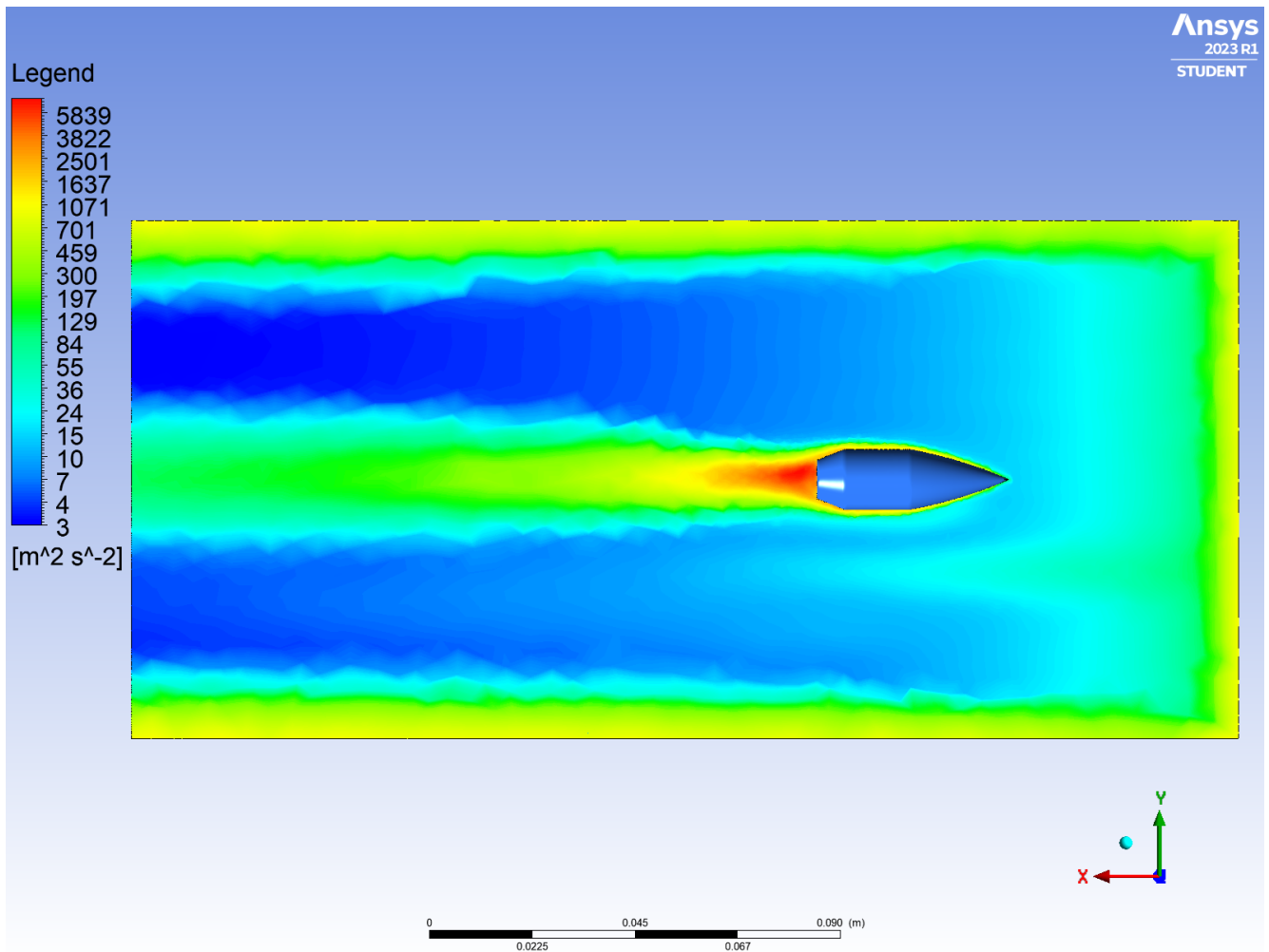
Kuvio 15. Ansys-ohjelmistoympäristön G7-virtauslaskentatulokset verrattuna G7-standardiin

4.6 Johtopäätökset virtauslaskentaohjelmistojen soveltuvuudesta

Solid Edge FloEFP -ohjelmiston supersoonisten virtauksien laskentatarkkuus geometrisesti monimutkaisille kappaleille ei ollut riittävä aiottuun käyttötarkoitukseen. Valmistajan mukaan kyseinen ohjelmisto onkin tarkoitettu pääasiassa lämmönsiirtymisen ja yksinkertaisempien virtausten laskentaan (Siemens, i.a.). Opinnäytetyössä tehdyt havainnot tukevat hyvin valmistajan lupausta.

Ansys-ohjelmistoympäristön monipuolisuus ja mahdollisuus laskea jopa hypersoonisia virtauksia on positiivinen havainto. Ansys Fluent -ympäristön virtauslaskentatuloksista on visuaalisesti havaittavissa virtauskentän jatkuminen koko kappaleen ulkogeometrialla, mikä

puolestaan osoittautui haastavaksi Solid Edge FloEFP -ohjelmistolla. Ansys Fluent -ohjelmistolla suoritetuissa virtauslaskennoissa virtauskentän jatkuvuutta koko kappaleen geometrialla on kuvattu kuviossa 16.



Kuvio 16. G7-standardikappaleen turbulenssikenttä

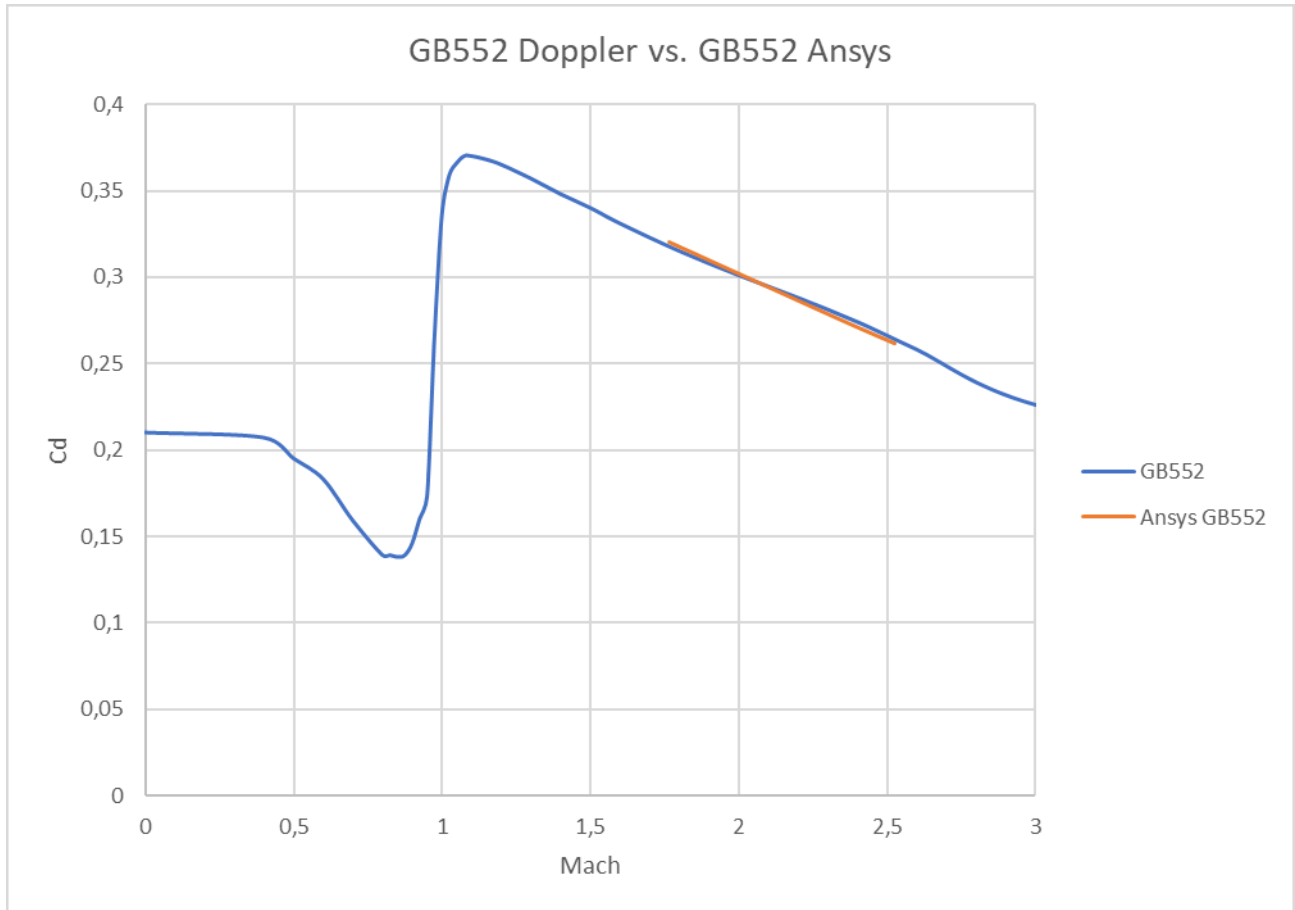
Tietokoneavusteisen virtauslaskennan soveltuvuutta pyörimisvakavoitujen kappaleiden tuotekehitystyöhön päätettiin jatkaa vain Ansys -ohjelmistoympäristössä. Valintaan vaikutti Ansys -virtauslaskentaohjelmistoympäristön käyttöliittymä ja tässä opinnäytetyössä saatu- jen standardikappalevertailujen tulokset.

5 VALMISTETTUJEN KAPPALEIDEN GEOMETRIOIHIN PERUSTUVAT VIRTAUSLASKENTATULOKSET

Tässä luvussa esitellään Ansys Fluent -ohjelmistolla suoritettujen virtauslaskentatapausten tuloksia. Virtauslaskentatapauksien lähtötietoina on käytetty teollisessa mittakaavassa valmistettujen kappaleiden geometrioita. Virtauslaskennan tuloksia verrataan Nammo Lapua Oy:n (sisäinen tietolähde, i.a.) määrittämiin arvoihin nopeusalueilla 1,0–2,8 Mach sekä Litzin (2011, s. 527) empiirisesti määrittämiin arvoihin nopeusalueilla 1,3–2,4 Mach.

5.1 Vertailu valmistettujen kappaleiden mittaustuloksiin

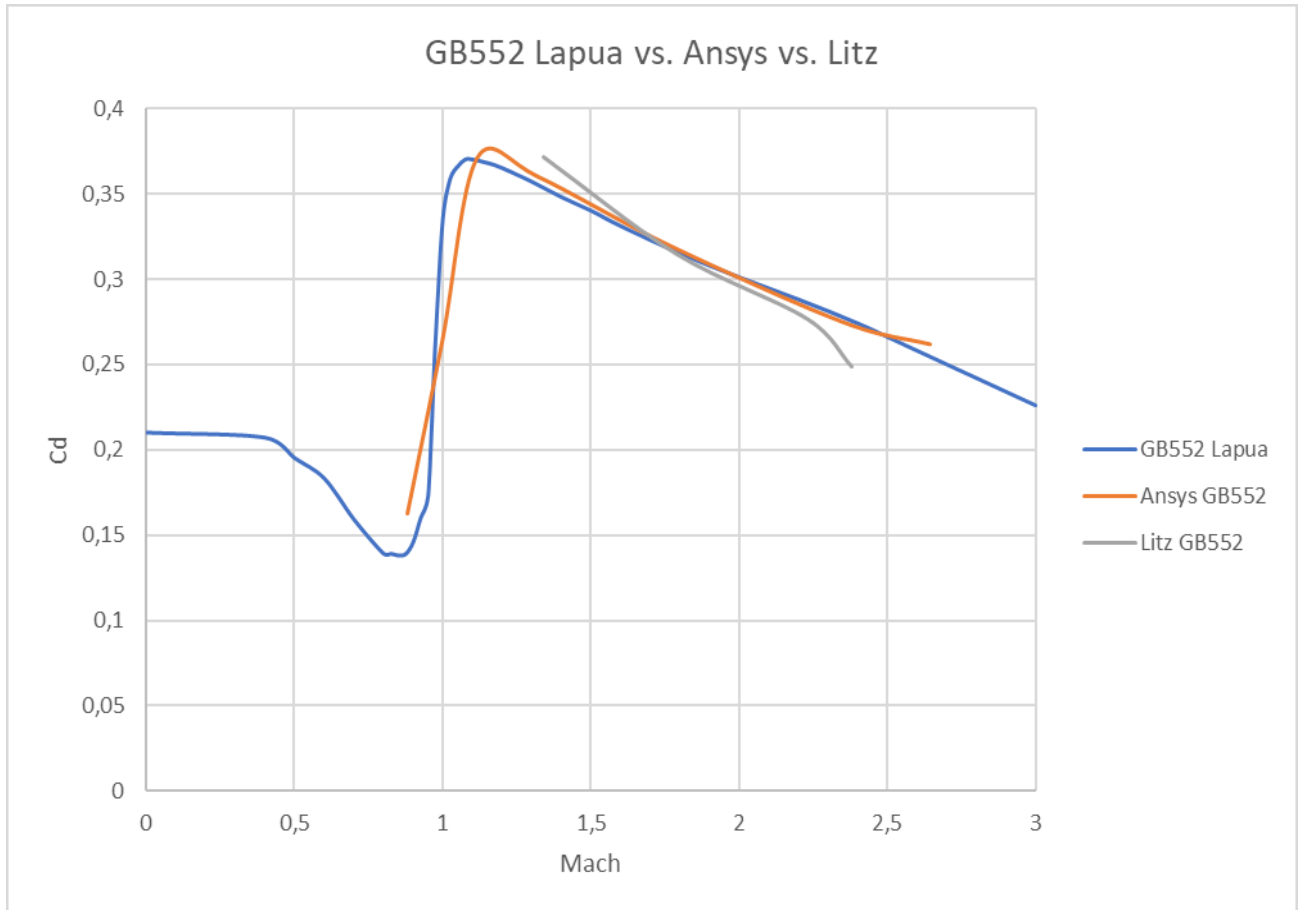
Virtauslaskennan soveltuvuutta tuotannollisessa mittakaavassa valmistettujen kappaleiden vastuskertoimien arviointiin suoritettiin Nammo Lapua Oy:n valmistamien 10,0 g Scenar^L-luotien geometriaan perustuvien laskentatulosten pohjalta. Kyseisen luodin geometrinen pintamalli on luotu Litzin (2011, s. 527) julkaiseman mittakuvan pohjalta. Kyseisen kappaleen dimensiot ovat esitettyinä kuviossa 8. 10,0 g Scenar^L-luodin, GB552, vastuskertoimina käytetään sekä Litzin (mt. s.527) määrittämiä empiirisiin mittauksiin perustuvia vastuskertoimia, että Nammo Lapua Oy:n julkaisemia Dopplerin ilmiöön perustuvien mittaustulosten mukaan määritettyjä vastuskertoimia.



Kuvio 17. GB552-mittaustuloksien suhtautuminen Ansys-virtauslaskentatuloksiin

Ansys-virtauslaskentaohjelmiston laskentatulosten korrelaatio Dopplerin ilmiöön perustuviin mittaustuloksiin on todella hyvällä tasolla, kuten kuvioista 17 voidaan havaita. Kuviossa esitetty GB552-kuvaaja on laadittu Nammo Lapua Oy:n julkaisemien vastuskertoimien mukaan (sisäinen tietolähde, i.a.). Kuvaaja Ansys GB552 on laadittu Ansys-virtauslaskentaohjelmistosta saatujen virtauslaskentatulosten perusteella.

Verrattaessa Ansys-virtauslaskennan tuloksia empiirisesti määritettyihin vastuskertoimiin voidaan havaita laskentatuloksien korreloivan huomattavasti paremmin Dopplerin ilmiöön perustuviin mittaustuloksiin kuin empiirisesti määritetyt vastuskertoimet. Vastuskertoimien eroavaisuudet ovat havainnollistettuna kuviossa 18.



Kuvio 18. Dopplerin ilmiöön perustuvien mittaustulosten suhtautuminen virtauslaskentatuloksiin ja empiirisesti määritettyihin arvoihin

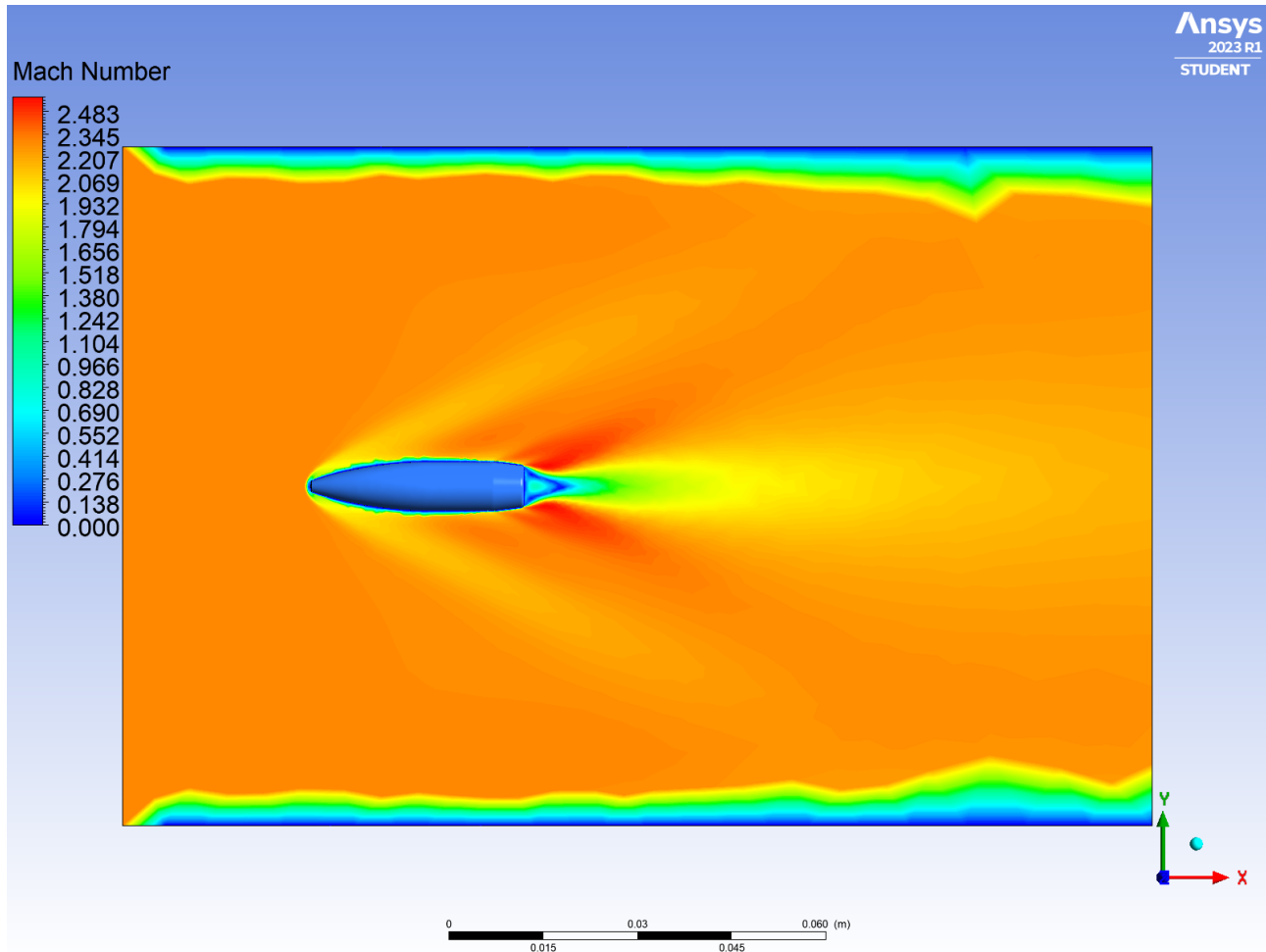
5.2 Virtauslaskentatuloksista määritetyt graafiset kuvaajat

Tässä aluvussa esitetään opinnäytetyössä saatuja virtauslaskentatuloksia visuaalisessa muodossa ja analysoidaan teoreettisella tasolla niiden todenperäisyyttä. Aluvussa esitetyt kuvat on laadittu opinnäytetyössä tehtyjen laskentojen tuloksista. Jokaiseen laskentapahtumaan on laadittu uusi laskentaverkosto ja uudet laskentaparametrit. Tällä menetelmällä pyrittiin varmistamaan laskentatapahtumien toistettavuutta ja luomaan käsitys laskentatulosten luotettavuudesta.

Tämän aluvun alulukujen kuvioiden graafisissa esityksissä on pyritty havainnollistamaan virtauskenttien ja laskentaverkkojen muotoja. Graafisesti esitetyistä virtauskentistä pitäisi löytyä kolme toisistaan poikkeavaa virtauskenttää. Nämä virtauskentät ovat kaavan (5) mukaiset kärjen ylipainevastuksen, kitkavastuksen ja peräpainevastuksen aiheuttamat virtauskentät.

5.2.1 Virtauskenttien nopeudet

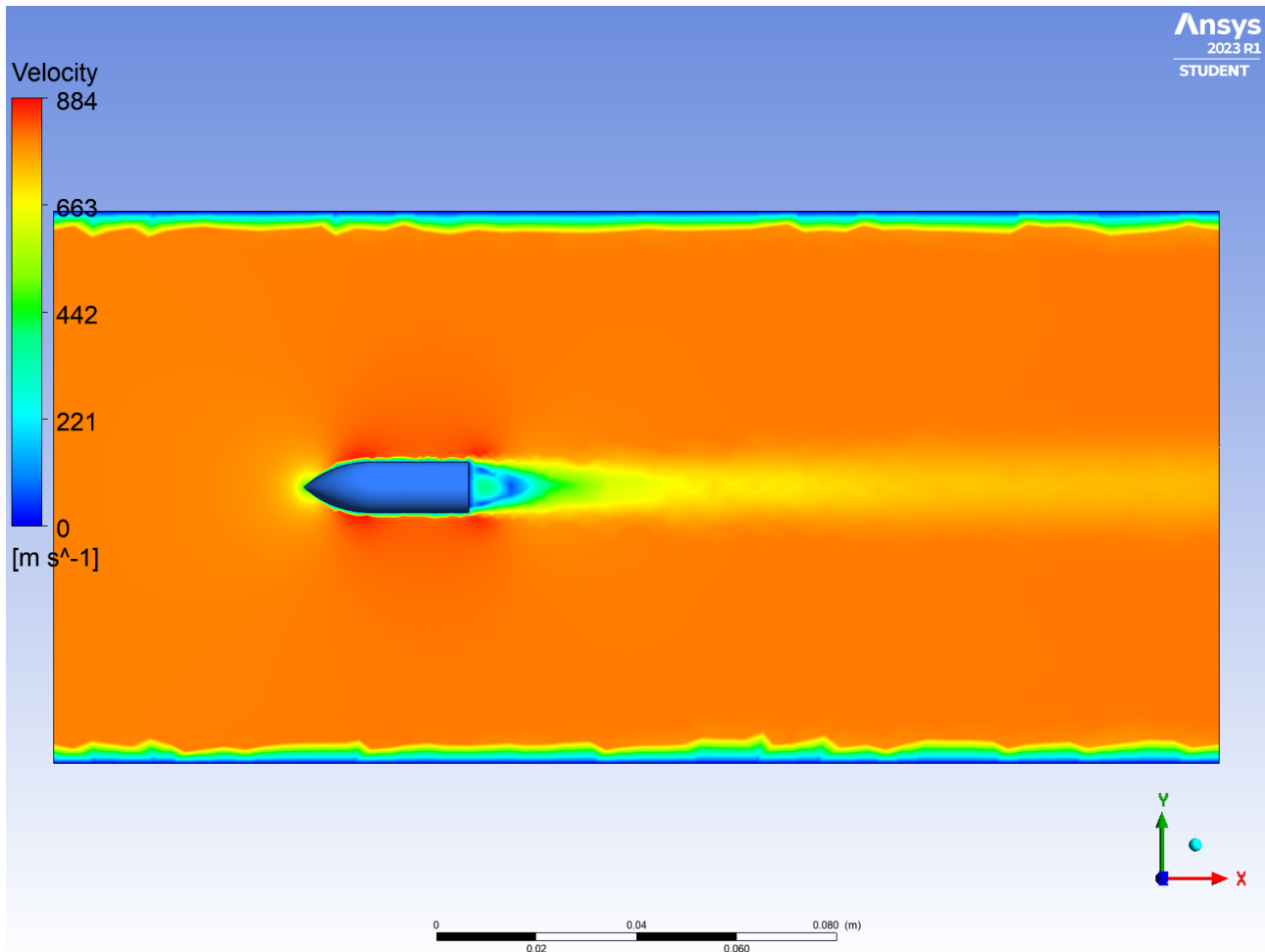
Virtauskenttien nopeuksia on kuvattu kuvioissa 19 ja 20. Esitettyjen tapausten laskentaparametreina on käytetty nopeutta 800 m/s joka vastaa noin 2,35 Mach-arvoa. Kuviosta 19 voidaan havaita useita eri nopeuksilla virtaavia kenttiä, joiden muodot muistuttavat Machin kartiota. Kyseinen havainto viittaa virtauslaskentatuloksen oikeellisuuteen.



Kuvio 19. GB552-luodin laskennallisten virtauskenttien nopeudet

Luodin perään muodostuva, huomattavasti hitaampia nopeuksia sisältävä kenttä puolestaan indikoi laskennan huomioivan kappaleen geometriaa myös niillä geometrian alueilla, joissa geometrian suurin halkaisija on jo ohitettu.

G1-standardikappaleelle tehtyjen virtauslaskentojen tuloksista on muodostettu vastaava havainnollistava kuvaaja kuvioon 20. Kuviosta voidaan havaita kappaleen peräosassa valitsevan hitaamman virtauksen virtauskentän olevan visuaalisestikin huomattavasti suurempi kuin kuvion 19 virtauskentässä.

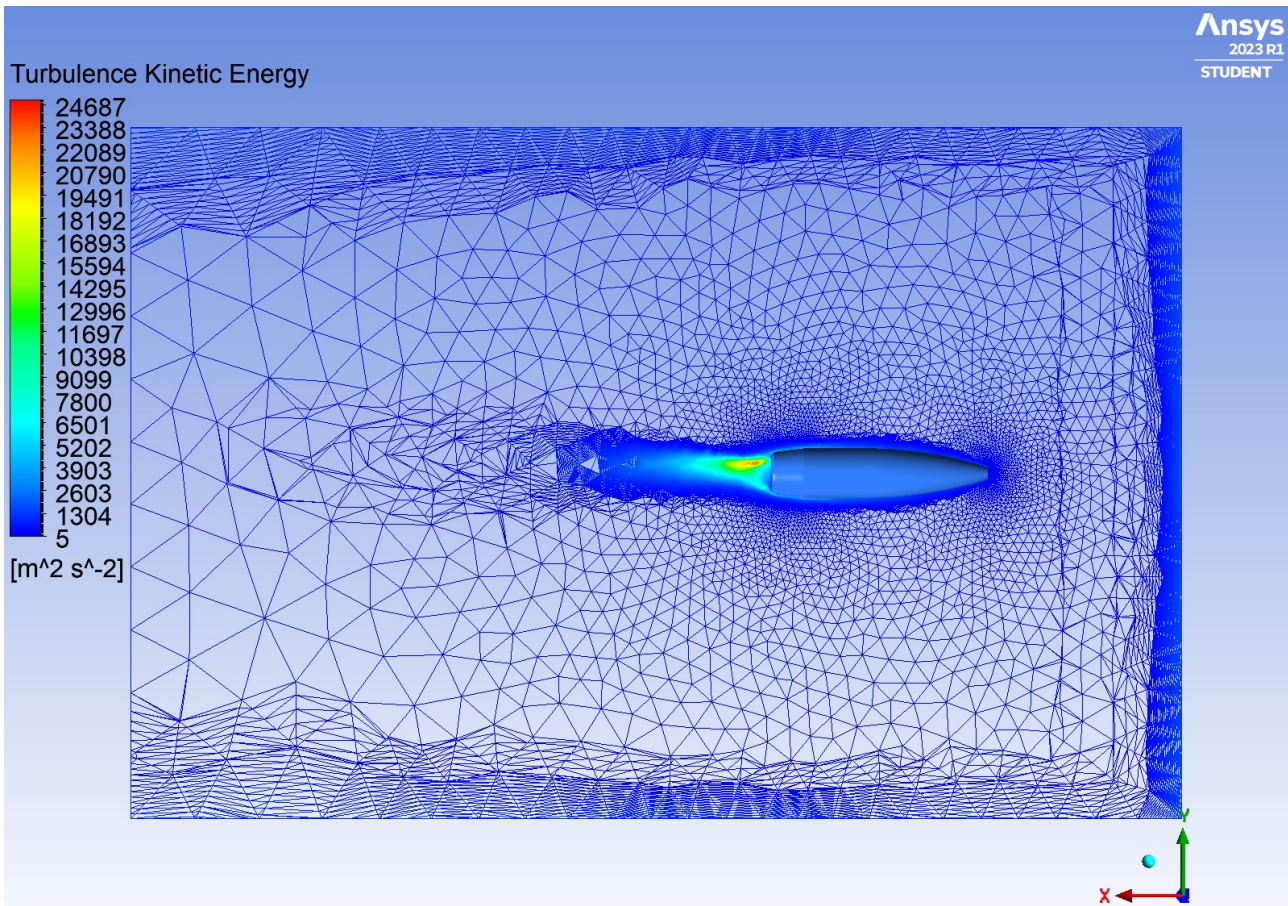


Kuvio 20. G1-standardikappaleen virtauskenttien nopeudet

5.2.2 Turbulenttinen kineettinen energia

Turbulenssianalyysistä GB552-luodilla on havaittavissa toisistaan poikkeavat turbulenssi-alueet kappaleen eri puolilla turbulenssivaihteluiden ollessa suurimmillaan luodin peräosassa ja luodin peräosan ulkopuolella. Tämä todennäköisesti johtuu laminaarisen virtauksen jatkumisesta luodin geometrian suuntaisena virtauksen irrottua kappaleen todellisesta ulkopinnasta.

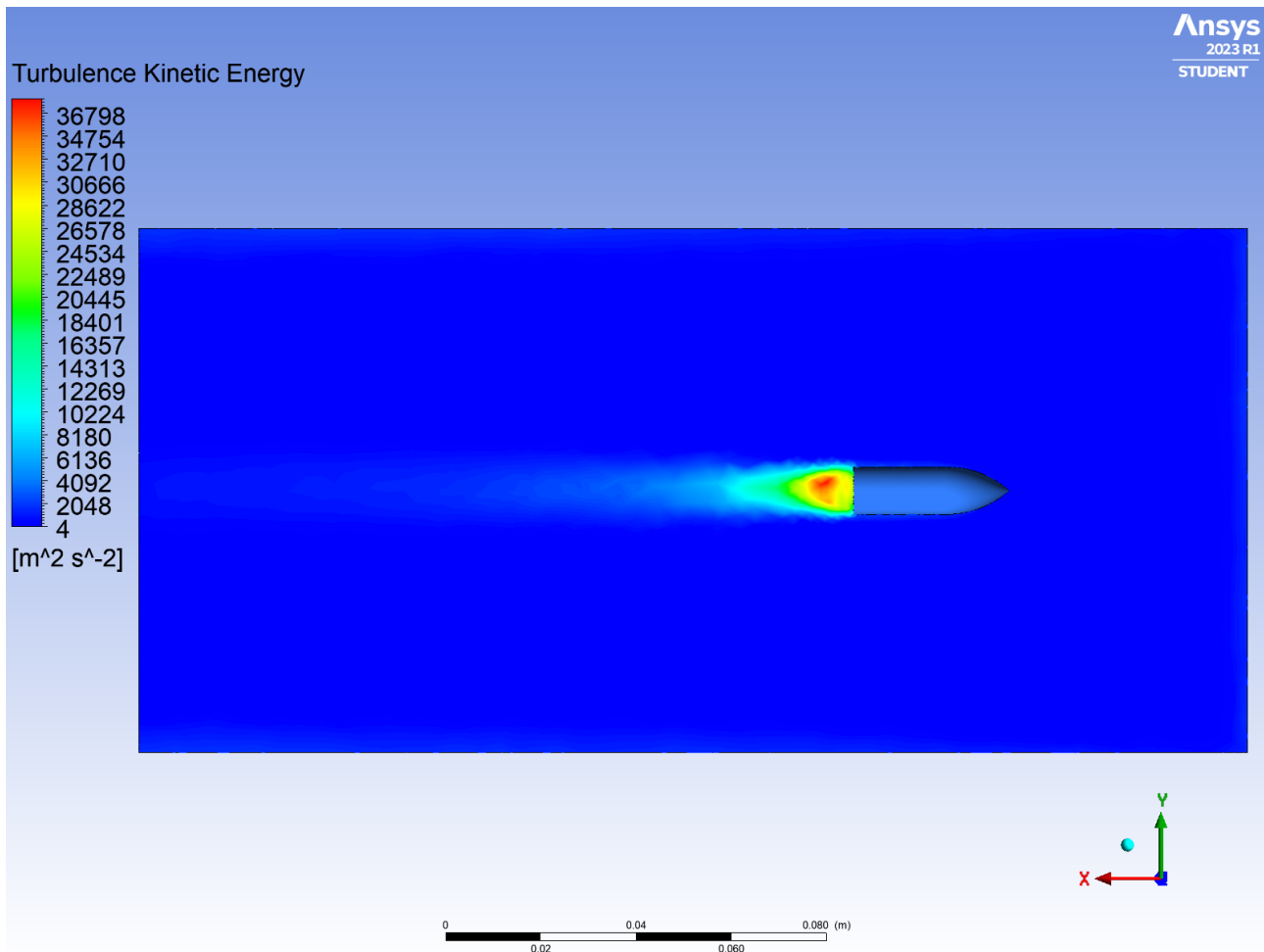
Tässä virtauslaskentatapahtumassa laskentaverkon geometria kauempana laskettavan geometrian pintaprofiilista on tarkoituksellisesti määritetty epäsymmetriseksi. Kyseisen epäsymmetrian vaikutukset ovat hyvin havaittavissa myös luodin peräosaan muodostuvista laskennallisista turbulenssikentistä. Epäsymmetrisen laskentaverkon tarkoituksena oli selvittää, kuinka pienet muutokset laskentaparametreissa vaikuttavat virtauslaskentatuloksiin.



Kuvio 21. GB552-luodin geometrian ympärille muodostuneet turbulenssikentät

Turbulenttisen kineettisen energian laskentatulosten kuvaajasta on hyvin havaittavissa laskentaverkon solujakauma tutkittavan geometrian ympärillä ja virtauskentässä kauempana tutkittavasta geometriasta. Kuvioista 21 ilmenee hyvin myös epäsymmetrisestä laskentaverkosta turbulენტtiseen kineettiseen energiaan syntyvät painopisteet.

Vastaavanlainen turbulენტtisen kineettisen energian perusteella tehty tarkastelu suoritettiin myös G1-standardikappaleen geometrialla. Kuvioista 22 ilmenee laskentamallien kyvykyys turbulენტtisen kineettisen energian painopisteiden määrittämiseksi.



Kuvio 22. G1-standardikappaleen turbulenssikenttä

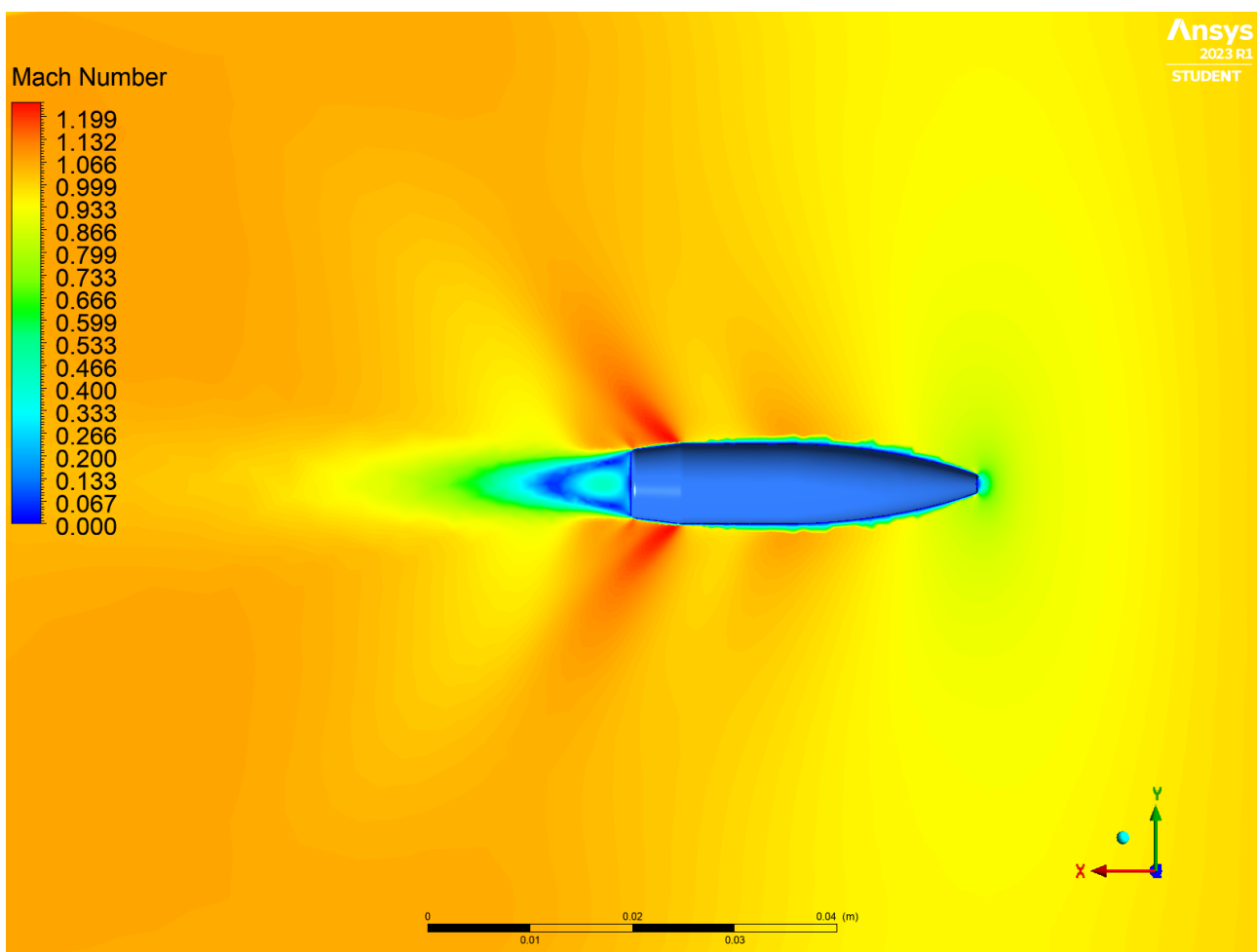
Vertailtaessa GB552- ja G1-laskentatuloksia turbulentsista kineettisestä energiasta laskennallisesti määritetyt huippuarvot eroavat toisistaan huomattavasti. Kuvioista 21 ja 22 voidaan huomata myös laskennallisten turbulenssikenttien pinta-alojen poikkeavan toisistaan. Nämä havainnot vastaavat luotien aerodynamiikkaa käsitteleviä teorioita. Näistä esimerkkitapauksista voidaan todeta Ansys-ohjelmistolla suoritetun virtauslaskennan huomioivan hyvin kappaleiden ja virtauskenttien geometriset muodot.

5.2.3 Virtausnopeudet kappaleen pinnalla noin 1.0 Mach nopeuksilla

Tietokoneavusteisella virtauslaskennalla määritetyt luodin nollavastuskertoimet korreloivat todella hyvin fyysisistä kappaleista mittaamalla määritettyjä arvoja. Suurimmat eroavaisuudet löytyvät nopeusalueen 1,0 Mach ala- ja yläpuolelta. Kyseinen ilmiö saattaa osittain selittyä tietokoneavusteisen virtauslaskennan lähtöparametreista. Lähtöparametreiksi on

määritelty luodin olevan staattinen kappale, joka altistuu lähtöparametreissa määritellylle, tietyllä nopeudella virtaavalle virtauskentälle. Mittaamalla määritetyissä arvoissa mitattava kappale liikkuu mittaushetkellä vallitsevalla nopeudella ilmakehän läpi. Tällaisessa tapauksessa liikkuva kappale itsessään aiheuttaa kappaleeseen vaikuttavan virtauskentän.

Kuviossa 23 on esitetty kappaleen pinnalla vallitsevien virtauskenttien nopeus. Lähtötilanteessa tässäkin virtauslaskentatapahtumassa tutkittava kappale on määritetty staattiseksi ja altistettu 1,0 Mach virtaukselle.



Kuvio 23. Virtauskenttien nopeudet kappaleen pinnalla 1,0 Mach nopeudella

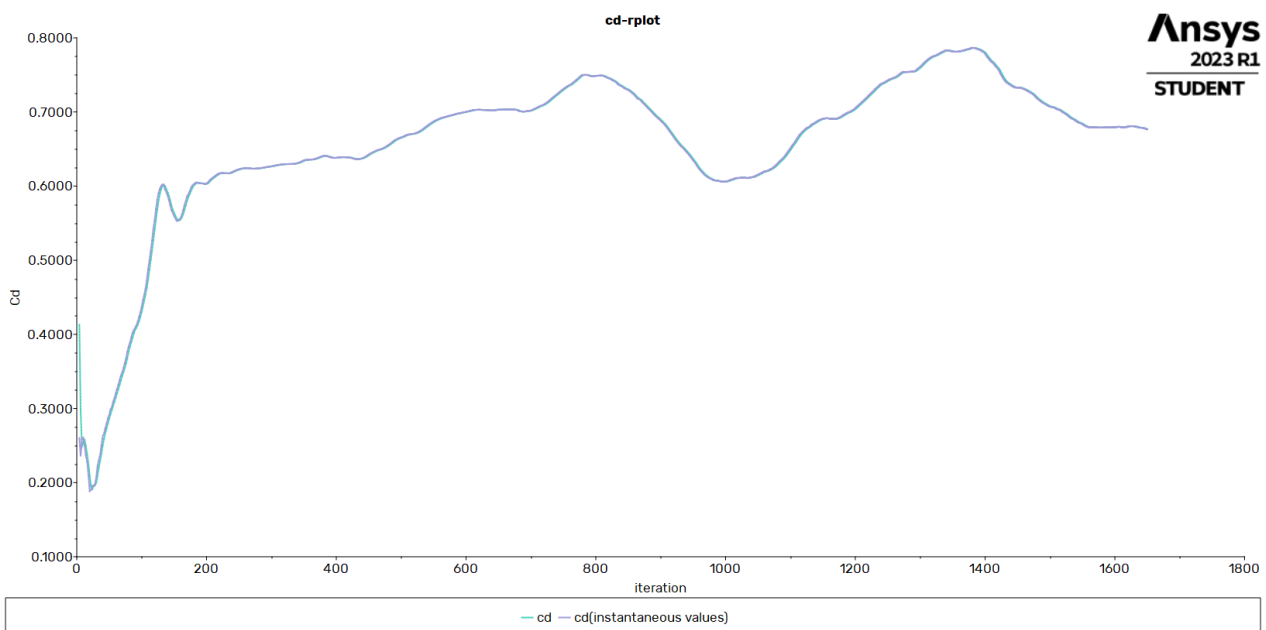
Kuten kuvio 23 osoittaa, kappaleen ympärillä vallitsee keskimääräisesti 1,0 Mach nopeudella liikkuva virtauskenttä. Virtauskenttien nopeudet kappaleen eri puolilla vaihtelevat kuitenkin noin 0,5 Mach virtauskentän ollessa hitaimmillaan noin 0,7 Mach ja nopeimmillaan jopa 1,2 Mach. Tuloksia arvioitaessa on muistettava virtauslaskentatapahtumissa käytetyt lähtöparametrit. Tässä opinnäytteessä virtauslaskenta on pääasiassa

suoritettu staattiselle kappaleelle, joka altistetaan halutulle virtauskentälle. Doppler-ilmiöön perustuvissa mittauksissa tutkitaan liikkuvan kappaleen nopeuksien muutoksia laskennallisesti staattisessa ilmakehässä. Näistä menetelmäeroista johtuen staattisille kappaleille määritettyjen virtauslaskentatulosten perusteella ei kannata tehdä yksiselitteisiä päätelmiä laskentatulosten oikeellisuudesta nopeusalueen ollessa noin 1,0 Mach.

6 GRAVITAATION JA ROTAATION VAIKUTUKSET VIRTAUSLASKENTAAN

Tässä luvussa esitellään virtauslaskentatulokset GB552-tuotteen mukaiselle geometrialle. Laskentaparametreina on käytetty 800 m/s nopeudella liikkuvaa ja 4000 Hz taajuudella pyörivää virtauskenttää. Gravitaation vaikutus kohdistuu kappaleen tilavuuspainopisteseen todellisen massakeskipisteen sijaan. Virtauslaskenta rajattiin 1650 iteraatiokierrokseen. Esimerkkitapauksen tarkoituksena on selvittää, voisiko virtauslaskennasta olla hyötyä myös häiriölle altistuneen virtauksen analyyseissä.

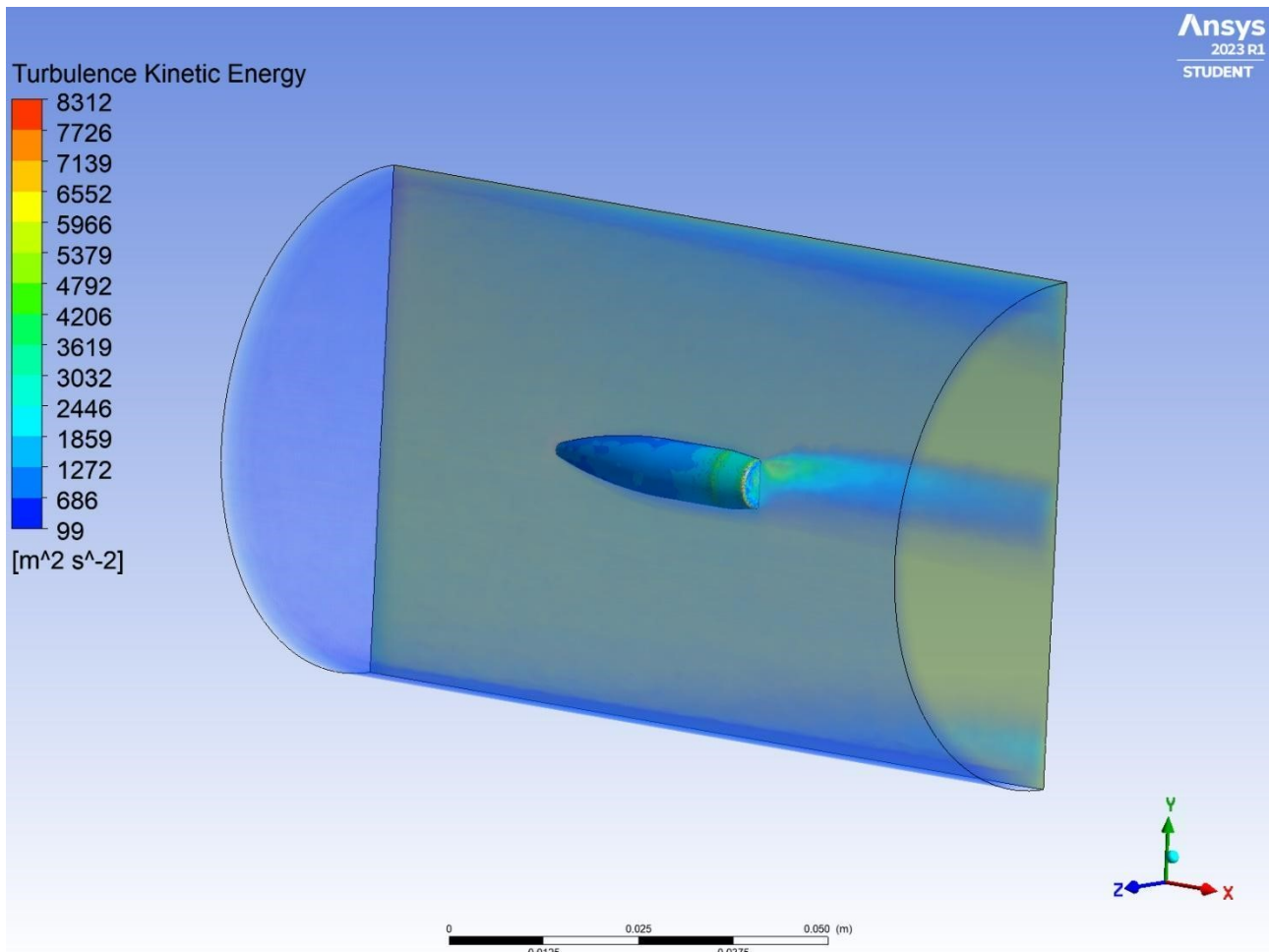
Nollavastuskertoimen määrittämiseen tähtäävästä virtauslaskennasta kuvio 24 noudattelee ensimmäisten iteraatiokierrosten osalta hyvin samanlaista kuvaajaa kuin staattisten tilanteiden laskennoissa. Staattisista tilanteista virtauslaskennalla määritetty vastuskerroin tasaantuu tyypillisesti ensimmäisen kymmenen iteraatiokierroksen aikana tietylle tasolle ja seuraavat iteraatiokierrokset vain hienosäätävät laskentatuloksen viimeisiä desimaaleja.



Kuvio 24. GB552 laskennallinen vastuskerroin gravitaatio ja pyörimisliike huomioiden

Gravitaatiolle ja rotaatiolle altistuneen kappaleen laskennalliset vastuskertoimet taas romahtavat ensin epätavallisen alhaiselle tasolle ja lähtevät sen jälkeen jyrkkään nousuun. Tähän esimerkkiin varatut 1650 iteraatiokierrosta eivät riittäneet vakauttamaan laskentatulosta ohjelmiston asettamien laatuksien rajoihin.

Samasta laskentatapahtumasta laadittu turbulenssikenttiä kuvaava kuvio 25 selittää hyvin poikkeuksellisen korkeaa laskennallista vastuskerrointa. Kuten kuviosta voi havaita, laskennallinen vastuskerroin on määritetty huomattaville kohtauskulmille altistuneelle kappaleelle. Tämä havainto perustuu kappaleen kärki- ja peräosissa näkyviin huomattavan epäkeskeisiin turbulenssien painopisteisiin.



Kuvio 25. GB552 laskennallinen turbulenssikenttä gravitaatio ja pyörimisliike huomioiden

7 TEOREETTINEN HYÖTY TUOTEKEHITYKSEN NÄKÖKULMASTA

Tietokoneavusteisen virtauslaskennan hyötyjä tuotekehitystoimintaa tehostavana työkaluna on mahdotonta arvioida ilman käytännön kokemusta, mutta mahdollisia hyötyjä voidaan kuitenkin tarkastella teoreettisella tasolla. Teoreettisessa tarkastelussa esimerkiksi voidaan käyttää kuviossa 26 esitettyä Ulrichin ja Eppingerin (2008, s. 9) mukaista tuotekehitysprosessimallia.



Kuvio 26. Ulrichin ja Eppingerin tuotekehitysprosessimalli (mukaillen Ulrich & Eppinger, 2008, s. 9)

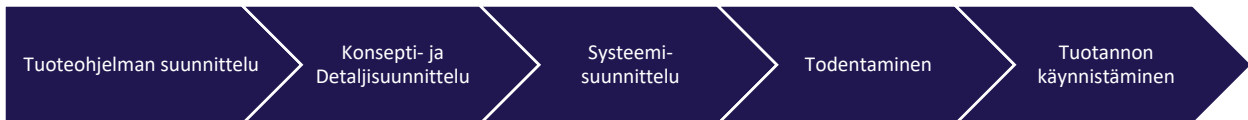
Sovellettaessa Ulrichin & Eppingerin (2008, s. 9) tuotekehitysprosessimallia tässä opinnäytetyössä esitettyyn viitekehikseen tulisi tuotekehitysprosessimallia muokata siten, että testaus- ja parannusvaiheita käsiteltäisiin ajankäytöllisesti yhtä suurina osatekijöinä kuin prosessin muita vaiheita. Tällaisella muutoksella tuotekehitysprosessin malli muodostuisi kuvion 27 mukaiseksi.



Kuvio 27. Ulrichin ja Eppingerin sovellettu malli

Arvioitaessa tietokoneavusteisen virtauslaskennan hyötyjä Ulrich & Eppingerin tuotekehitysprosessimallia mukaileva tuotekehitysprosessi muotoutuisi kuvion 28 mukaiseksi. Kuten kuvion 28 Ulrich ja Eppinger -mallia mukailevasta mallista voidaan huomata,

konsepti- ja detaljisuunnittelu voidaan parhaassa tapauksessa suorittaa samassa tuotekehitysprosessin vaiheessa. Testaus- ja parannusvaiheet voidaan korvata tietokoneavusteisesta virtauslaskennasta saatujen virtauslaskentatulosten todentamisella.



Kuvio 28. Tietokoneavusteisen virtauslaskennan mahdollistama Ulrichin ja Eppingerin mallia mukaileva malli

Mikäli tuotekehitysprosessin jokaiseen vaiheeseen käytettäisiin keskenään sama määrä aikaa, voidaan tuotekehitysprosessin läpimenoajan suhteen tehdä karkeita arvioita kokonaisajankäytöstä. Tällaisen teoreettisen arvion perusteella tietokoneavusteinen virtauslaskenta voisi siis parhaassa tapauksessa lyhentää tuotekehitysprosessin läpimenoaikaa noin 70 prosenttiin alkuperäisestä.

8 YHTEENVETO JA POHDINTA

Opinnäytetyössä ensisijaisena tavoitteena oli selvittää, voiko tietokoneavusteinen virtauslaskenta toimia aputyökaluna pyörimisvakavoitujen kappaleiden tuotekehitystyössä. Tätä kysymystä lähestyttiin suorittamalla virtauslaskentaa standardikappaleille ja sen jälkeen tuotannollisessa mittakaavassa valmistetuille kappaleille.

Opinnäytetyön toissijaisena tavoitteena oli selvittää, voiko tietokoneavusteisella virtauslaskennalla päästä kiinni lentoratalaskentaa häiritseviin muuttujiin. Tätä kysymystä selvitettiin opinnäytetyön luvussa 6 suorittamalla virtauslaskentaa gravitaatiolle ja pyörivälle virtauskentälle altistetulle kappaleelle. Kuten luvussa 6 esitetyistä kuvaajista voidaan huomata, tietokoneavusteinen virtauslaskenta pystyy laskentatapahtumissa huomioimaan tutkittavan kappaleen laskentatapahtuman aikana kokemat asentomuutokset. Laskentamallia muuttamalla tietokoneavusteinen virtauslaskenta saattaisi tarjota vastauksia myös kysymyksiin lentorataa häiritsevistä muuttujista.

Opinnäytetyön ensimmäisenä arviointipisteenä voidaan pitää standardikappaleiden geometrioiden perusteella suoritettujen virtauslaskentatapahtumien tuloksien oikeellisuutta. Standardikappaleiden geometrioihin perustuvat virtauslaskentatapahtumat ja niiden kuvaukset ovat esitettynä luvussa 4. Näiden tulosten perusteella opinnäytetyössä selvitettävien asioiden tutkimista jatkettiin pelkästään yhdellä virtauslaskentaohjelmistolla.

Rajallinen laskentatehon määrä ja syvällisempään soveltuvuusarviointiin käytetyn ohjelmiston opiskelijalisenssin rajoitukset asettivat opinnäytetyön aikaisille laskentatapahtumille tiukat reunaehdot. Näistä rajoituksista huolimatta tietokoneavusteisen virtauslaskennan soveltuvuudesta aiottuun käyttökohteeseen saatiin kuitenkin muodostettua selkeä käsitys. Oikein valitulla laskentamallilla ja oikeilla laskentaparametreilla virtauslaskennalla saadaan luotua hyvä käsitys pyörimisvakavoitujen kappaleiden lento-ominaisuuksista jo tuotekehityksen suunnitteluvaiheessa.

Opinnäytetyön toisena arviointipisteenä voidaan pitää tuotannollisessa mittakaavassa valmistettujen kappaleiden geometrian mukaisilla parametreilla suoritettua virtauslaskentaa. Tutkimuksessa käytetyn Ansys-virtauslaskentaohjelmiston laskentatulokset vastasivat todella hyvin kappaleista suoritettujen mittaustapahtumien mittaustuloksia. Ratalaskennan

näkökulmasta virtauslaskennalla määritetyillä vastuskertoimilla ratalaskennan luotettavuutta voidaan pitää jopa parempana kuin ballistisiin kertoimiin perustuvaa ratalaskentaa. Ansys-ohjelmiston käyttöönottoa tuotekehitystyötä nopeuttavaksi työkaluksi on syytä harmitella vakavasti.

Havaintona tietokoneavusteisesta virtauslaskennasta täytyy mainita turbulenssimallin ja laskentaverkon todella suuri vaikutus laskentatuloksiin. Vaikutukset ilmenevät varsinkin niissä tilanteissa, joissa virtauskentän nopeus on alle 2 Mach. Tämä ilmiö korostuu kappaleilla, joiden geometrisesti suurin halkaisija ei ole kappaleen perässä. Hyvänä esimerkkinä tällaisesta kappaleesta toimii G7-standardikappale.

Opinnäytetyön 6 luvussa suoritettiin kokeellinen virtauslaskenta gravitaatiolle ja rotaatiolle altistuneelle geometrialle. Tässä esimerkkitapauksessa virtauslaskentaohjelmistona käytettiin Ansys Fluent -ohjelmistoa. Kyseisen virtauslaskentatapauksen oikeellisuutta ei kuitenkaan voida tämän tutkimuksen viitekehyksen puitteissa arvioida. Virtauslaskentatapah-tuman tulokset indikoivat Ansys-virtauslaskentaohjelmiston kyvykkyydestä myös monimutkaisempien laskentatapah-tumien suhteen. Tämän havainnon pohjalta onkin perusteltua toistaa ulkoisille häiriöille altistuneiden geometrioiden virtauslaskentatapah-tumia. Näiden mahdollisten jatkotutkimuksien parissa on syytä tutkia mahdollisuutta lisätä laskentaparametreiksi myös tutkittavan geometrian fysikaaliset ominaisuudet, esimerkiksi kappaleen rakenteen aiheuttamat jäyhyysmomentit ja painopisteet. Luvussa 6 kuvattu virtauslaskentatapaus olisi syytä toistaa myös Ansys CFX -ohjelmistolla. Tällä menetelmällä voisi mahdollisesti selvittää solmukeskeisen ja solukeskeisen virtauslaskentaverkoston eroavaisuudet tarkasteltaessa pyörivää kappaletta.

Tässä opinnäytetyössä ei selvitetty, olisiko virtauslaskennalla mahdollista selvittää pinta-alkion pinta-alan muuttumista virtauskenttien nopeuksien suhteen. Teoreettisesti tarkasteltuna turbulenttisen virtauksen vaikutus lentävän kappaleen efektiiviseen pinta-alaan pitäisi olla mahdollista. Aiheen tarkempi tutkiminen tässä opinnäytetyössä ei kuitenkaan ollut mahdollista Ansys-ohjelmiston opiskelijaversio rajoitusten takia.

Luvussa 7 pohdittiin tietokoneavusteisen virtauslaskennan teoreettisia hyötyjä tuotekehitysprosessin läpimenoaikaan. Esiitettyjen havaintojen perusteella tietokoneavusteinen virtauslaskenta vaikuttaisi olevan varteenotettava työkalu pyörimisvakavoitujen kappaleiden lento-ominaisuuksien ennustamiseksi jo tuotekehitysvaiheessa.

LÄHTEET

- Acharya, R. (2016). *Investigation of Differences in Ansys Solvers CFX and Fluent* [maisterintutkielma, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm]. DiVa. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Asth%3Adiva-203937>
- Ansys CFX. (i.a.). *Ansys CFX is the industry leading CFD software for turbomachinery applications*. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx#tab1-2>
- Ansys Fluent. (i.a.). *Ansys Fluent generates accurate and reliable fluid simulation results*. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent#tab1-2>
- Karjalainen, A. (2021). *Numeerisen virtauslaskennan luotettavuus ja käytettävyys* [kandidaatintyö, Tampereen yliopisto]. Trepo. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202105134934>
- Laine, S. (18.10.2013). *Katsaus virtauslaskennan kehitykseen*. [PowerPoint-esitys]. Docplayer. <http://docplayer.fi/25495164-Katsaus-virtauslaskennan-kehitykseen-seppolaine-lentotekniikan-emeritusprofessori-cfd-paiva-hanasaari2013.html>
- Litz, B. (2011). *Applied Ballistics for Long Range Shooting*. Applied Ballistics.
- McCoy, R. L. (2012). *Modern Exterior Ballistics*. Schiffer Publishing.
- Patruunatehdas LAPUA. (1994). *LAPUA Latauskäsikirja*.
- Piipponen, M. (2022). *Relativistinen Navier-Stokes-teoria* [Kandidaatintutkielma, Jyväskylän Yliopisto]. JYX. <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/85505>
- Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus. (2001). *Yleinen ase- ja asejärjestelmäopas*.
- Siemens. (i.a.). *Computational Fluid Dynamics (CFD) Student Edition: Simcenter FloEFD for Solid Edge*. https://www.plm.automation.siemens.com/plmapp/education/solid-edge-floefd/en_us/free-software/student
- Simscale. (i.a.). *What is CFD Computational Fluid Dynamics*. <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2008). *Product desing and development*. McGraw-Hill.
- US Army Research Laboratory. (2008). *Effect Of Rifling Grooves On The Performance Of Small-Caliber Ammunition*. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA505719.pdf>

Valtonen, E. (2007). *Tekniikan taulukkokirja (15)*. Genesis-Kirjat

Wasserman, S. (2016). *Choosing the Right Turbulence Model for Your CFD Simulation*.
<https://www.engineering.com/story/choosing-the-right-turbulence-model-for-your-cfd-simulation>